

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

2022

**LUKÁŠ
HOLEČEK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Holeček** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **466536**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**
Studijní program: **Energetika a procesní inženýrství**
Specializace: **Energetika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Posouzení omezení elektroodových kotlů pro poskytování podpůrných služeb a návrhy opatření k minimalizaci jejich dopadů.

Název diplomové práce anglicky:

Identifying limits of the electrode boiler technology providing ancillary services and mitigating their effects

Pokyny pro vypracování:

Analyzujte nasazení elektroodových kotlů pro poskytování podpůrných služeb, navrhněte možná opatření k posunutí nalezených limitů této technologie v souvislosti s nově platným Kodexem provozování přenosové soustavy a jeho dalšími možnými změnami. Body zadání:

- 1) Zpracujte rešerši využití technologií elektroodových elektroodů pro poskytování podpůrných služeb přenosové soustavy v ČR.
- 2) Analyzujte Kodex ČEPS, identifikujte kritické části certifikace technologie elektroodových kotlů.
- 3) Identifikujte technické limity elektroodů pro toto využití při budoucím zpřísnění kodexu ČEPS.
- 4) Navrhněte a analyzujte možné způsoby posunutí těchto technických limitů pro daný účel se zaměřením na technologii celo-plněného elektroodového kotle.
- 5) Vyhodnoťte proveditelnost navržených opatření.
- 6) Zhodnoťte přínos implementace navržených opatření se zaměřením na celo-plněný elektroodový kotel.

Seznam doporučené literatury:

Webové zdroje, prezentace předních výrobců.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Zdeněk Funda, Ph.D. BFS Energo a.s.

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.06.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2023**

Ing. Zdeněk Funda, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze, dne

.....

Bc. Lukáš Holeček

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Lukáš Holeček
Název diplomové práce:	Posouzení omezení elektrodových kotlů pro poskytování podpůrných služeb a návrhy opatření k minimalizaci jejich dopadů
Anglický název:	Identifying limits of the electrode boiler technology providing ancillary services and mitigating their effects
Akademický rok:	2021/2022
Ústav/odbor:	Ústav energetiky
Vedoucí diplomové práce:	Ing. Zdeněk Funda, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 77 Počet obrázků: 32 Počet tabulek: 3 Počet příloh: 2
Klíčová slova:	Elektrokotel, podpůrné služby, regulace, Power-to-heat
Keywords:	Electrode boiler, ancillary services, governance, Power-to-heat

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá analýzou možností a technických limitů elektrodových kotlů nasazovaných za účelem poskytování podpůrných služeb v České republice. Práce uvádí legislativní rámec, teorii a principy jednotlivých druhů elektrokotlů, identifikuje jejich technické limity a navrhuje opatření k potlačení těchto limitů. K simulování dopadu navržených opatření u celoplněných kotlů byl pro účely práce vytvořen výpočetní model.

Abstract:

This diploma thesis analyses technical limits of electrode boilers providing ancillary services in the Czech Republic. The thesis describes the legislative framework, as well as electrode boiler theory and types. The author then identifies technical limits of this technology and brings up several counter measures to mitigate the negative effects. A computational model was developed to simulate and demonstrate counter measures proposed for a top-filled electrode boiler type.

Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval panu Ing. Zdeňkovi Fundovi, Ph.D. za trpělivé vedení mé diplomové práce, jeho vstřícný přístup a veškerou poskytnutou pomoc a čas. Děkuji rovněž pánům Ing. Tomášovi Ludvíkovi, Ing. Matoušovi Bartošovi, Ing. Vojtěchovi Bumerlovi a Ing. Tomášovi Molnárovi ze společnosti BFS Industry, s.r.o. za možnost konzultovat provozní aspekty elektrokotlů, za trpělivost, vstřícnost a ochotu poradit.

Obsah

Seznam zkratk a pojmů.....	8
1. Úvod.....	9
2. Elektrokotle.....	10
2.1. Představení elektrokotlů.....	10
2.2. Elektrodotové elektrokotle	10
2.2.1. Celoplněné horkovodní elektrokotle.....	11
2.2.2. Poloplněné horkovodní elektrokotle.....	14
2.2.3. Ponorné parní elektrokotle poloplněné.....	17
2.2.1. Ponorné parní elektrokotle se štítí	19
2.2.1. Tryskající parní elektrokotle	20
2.3. Odporové elektrokotle pro nízké napětí.....	21
2.4. Význam úpravy vody pro elektrodotové kotle.....	22
3. Elektrokotle pro podpůrné služby.....	24
3.1. Podpůrné služby a současný stav využití elektrokotlů v ČR.....	24
3.2. Změny a trendy v poskytování PpS.....	26
3.2.1. Změny v poskytování PpS od roku 2022	26
3.2.2. Změny v poskytování PpS od roku 2023	26
3.2.3. Avizované změny v poskytování PpS po roce 2023	27
3.3. Technické možnosti elektrokotlů vzhledem k PpS	28
3.3.1. Kritické body v certifikačním procesu	28
3.3.1.1. Služba mFRR _{12,5}	28
3.3.1.2. Služba aFRR-.....	31
3.3.1.3. Služba mFRR ₅	32
4. Technické limity elektrokotlů a možná opatření.....	33
4.1. Výstup teoretické části.....	33
4.2. Technické limity a porovnání jednotlivých druhů elektrokotlů.....	33
4.3. Návrh opatření k posunutí identifikovaných limitů	34
4.3.1. Opatření pro celoplněné elektrokotle.....	35
4.3.2. Opatření pro poloplněné elektrokotle	42

5.	Modelování vlivu implementovaných opatření u celoplněného elektrokotle.....	44
5.1.	Zvolený postup řešení.....	44
5.2.	Principy fungování modelu.....	45
5.3.	Vstupy modelu.....	46
5.4.	Struktura a předpoklady modelu.....	46
5.5.	Modelované scénáře.....	55
5.5.1.	Nájezd s odběrem tepla.....	55
5.5.2.	Nájezd bez odběru tepla.....	55
5.5.1.	Zavedení NN přitápění do nádoby.....	56
5.5.2.	Zavedení průtočného NN přitápění.....	56
5.5.3.	Vliv rychlosti pohonu regulačních štítů.....	57
5.5.1.	Ostatní trendy vyplývající z navrženého modelu.....	57
6.	Aplikace modelu na případ modelového elektrokotle.....	58
6.1.	Simulace modelového elektrokotle.....	58
6.2.	Vliv implementace opatření na dobu studeného startu.....	59
6.2.1.	Nájezd bez odběru tepla a s bypassem výměníku.....	60
6.2.2.	Možnosti implementace NN přitápění.....	61
6.2.3.	Vliv rychlosti pohonu regulačních štítů.....	64
6.2.4.	Vliv snížení minimálního průtoku oběhového čerpadla.....	66
6.2.5.	Vliv změny konduktivity na dobu nájezdu.....	66
6.2.6.	Vliv velikosti zbytkového objemu nádoby na dobu nájezdu.....	67
6.2.1.	Porovnání elektrokotle před a po implementaci sady opatření.....	68
7.	Závěr.....	70
8.	Zdroje.....	72
	Seznam obrázků.....	76
	Seznam tabulek.....	77
	Seznam příloh.....	77

Příloha 1: Výpočtové vztahy použité ve výpočetním modelu

Seznam zkratk a pojmů

AB	Agregační blok
CZT	Centralizované zásobování teplem
ELK	Elektrokotel
FAT	Čas do plné aktivace („Full activation time“)
Kodex	Kodex přenosové soustavy (vydáváný ČEPS)
NN	Nízké napětí
PpS	Podpůrné služby
PPS	Provozovatel přenosové soustavy
SVR	Služby výkonové rovnováhy
VN	Vysoké napětí

1. Úvod

Nasazení technologie elektrodových elektrokotlů pro poskytování podpůrných služeb se v uplynulých letech začalo uplatňovat i v podmínkách střední Evropy. [1]

V kontextu energetické situace a předpokládaného vývoje skladby energetických zdrojů v ČR představují elektrokotle, nasazené především v teplárenství, dostupnou možnost pro zvýšení kapacit pro poskytování podpůrných služeb, jejichž rostoucí potřeba se dnes často skloňuje zejména ve spojitosti s výhledem na rostoucí podíl intermitentních obnovitelných zdrojů (v ČR dominantně fotovoltaické elektrárny). Tradičním teplárnám zároveň zakomponování elektrokotle do současné skladby zdrojů umožňuje zvýšit svou konkurenceschopnost možným zvýšením nabízeného regulačního rozsahu právě pro služby výkonové rovnováhy, případně dovolí těmto subjektům začít podpůrné služby nabízet a poskytovat. Kombinace zmíněných aspektů pak staví elektrokotle do pozice jednoho z pojících článků mezi stávající a očekávanou budoucí energetikou. [1]

Zároveň dochází v systému podpůrných služeb k zásadním změnám, tyto změny mají za úkol harmonizovat systémy v ČR se systémy v EU a připravit systém poskytování podpůrných služeb na očekávané změny v elektroenergetice.

Tato práce cílí na identifikaci limitů technologie elektrodových elektrokotlů z hlediska zpřísňujících se požadavků provozovatele přenosové soustavy ČR na certifikaci a provoz zařízení pro poskytování podpůrných služeb.

Motivace k řešení tohoto tématu přichází přímo ze současné průmyslové praxe, ze které vyvstávají konkrétní otázky a problémy, jejichž adresování bude nezbytné k dalšímu efektivnímu využívání elektrokotlů pro poskytování podpůrných služeb. Mezi tyto patří například otázka regulovatelnosti elektrokotlů mezi 0-5 % nominálního výkonu, či dosažitelnost požadované rychlosti v případě studeného startu podle požadavku na čas do plné aktivace dle Kodexu ČEPS pro různé podpůrné služby.

Pro tento účel je nejprve představena problematika podpůrných služeb a elektrokotlů obecně a dále pak hlavně ve vzájemném vztahu. Jsou identifikována limitující místa v konstrukci a regulaci různých typů elektrokotlů, stejně jako kritické body v certifikačním procesu pro poskytování podpůrných služeb. S důrazem na celoplněné elektrokotle jsou dále navrženy možné úpravy k posunutí identifikovaných limitací a zároveň je vyhodnocena jejich proveditelnost.

Možný dopad opatření cílících ke zkrácení doby do plné aktivace u celoplněných elektrokotlů byl předpověděn pomocí modelu, který umožňuje řešit a simulovat chování individuálních elektrokotlů na základě sady vstupních parametrů, stejně tak jako umožnil zformulovat zobecnitelné závěry. Vytvořený model byl aplikován na modelový elektrokotel.

2. Elektrokotle

2.1. Představení elektrokotlů

Elektrokotle jsou zařízení, která přeměňují elektrickou energii na energii tepelnou. Využívají se dva konstrukční principy, podle kterých lze elektrokotle dělit na elektrokotle s elektrodami (elektrodové) a elektrokotle s topnými elementy (odporové). Bližší princip fungování je popsán dále v příslušných podkapitolách.

Mezi společné výhody pro oba konstrukční principy elektrokotlů patří poměrná jednoduchost zařízení, nižší finanční i časová náročnost na instalaci jednotky tepelného výkonu a lepší místní čistota provozu v porovnání s jinými zdroji tepla. Dále lze elektrokotle považovat za lokálně bezemisní zdroj tepla, ovšem reálný dopad z pohledu emisí závisí na zdroji vyrobené elektřiny – v ČR pochází velká část elektřiny z fosilních paliv a elektrokotle zastávají roli spotřebiče elektrické energie. Proto jsou využívány primárně pro poskytování PpS. Nasazení elektrokotlů určených primárně pro výrobu a dodávku tepla zatím není v ČR publikováno. [25][35]

Se spotřebou elektřiny souvisí další výhodná vlastnost, kterou může nasazení elektrokotle přinášet, a to možnost akumulace energie. Skladování elektrické energie pro účely balancování sítě je v praxi zatím nepřilíživě rozvinuté oproti technologiím pro skladování energie v jiných formách. Mezi všemi v současnosti používanými způsoby skladování energie je dominantním způsobem akumulace tepla. Zde právě technologie elektrokotle umožní využít okamžitou elektrickou energii v síti a využít vyrobené teplo v soustavě CZT, tzv. „power to heat“. To staví elektrokotle nasazené v teplárnách do pozice technologie z principu vhodné pro poskytování podpůrných služeb, navíc případně jako záložní zdroje tepla v případech odstávky primárních zařízení v teplárně. [30]

Na druhou stranu, pokud konkrétní projekt elektrokotle postrádá možnost efektivně využít vyrobené teplo, tak obecný přínos takového projektu stojí čistě na přínosu poskytnutých podpůrných služeb.

Tato práce se dále zaměřuje pouze na elektrodové elektrokotle.

2.2. Elektrodové elektrokotle

Principem ohřevu vody v elektrodových elektrokotlích je přímý průtok elektrického proudu médiem v elektrokotli. Na fázové elektrody ponořené do vody je přivedeno vysoké elektrické napětí a mezi fázovými elektrodami a nulovou elektrodou je upravená voda primárního okruhu o definované konduktivitě, která se ohřívá v reakci na protékající elektrický proud. [22][24][25]

Z důvodu potřeby definované konduktivity vody v elektrokotlích, je u horkovodních kotlů nutné rozdělení vodních okruhů na primární okruh s hlavními komponentami, mezi něž patří zejména oběžné čerpadlo, kotel s elektrodami, tepelný výměník, nutná měření a případně regulační ventil, a sekundární okruh, který přebírá teplo z primárního okruhu v tepelném výměníku a dodává ho většinou do sítě centrálního zásobování. Parní elektrokotle sekundární okruh nevyužívají. Bližší představení následuje v příslušné podkapitole. [22][23][24][25]

Elektrodové elektrokotle se zapojují do hvězdy (Y) do normou definované třífázové distribuční sítě typu IT, přímo na vysoké napětí zpravidla v rozmezí 6-10,5 kV, ovšem je možné připojení i na vyšší napětí až 22 kV. V některých zapojeních tak není potřeba vysokonapěťový transformátor. [36]

Síť IT se vyznačuje odizolováním všech živých částí od země nebo uzemněním se zemí přes velkou impedanci. Neživé části jsou přímo uzemněny. Schématické znázornění zapojení elektrokotle do této sítě je na Obr. 5.4. [41]

Tento princip ohřevu má velmi vysokou účinnost dosahující kolem 99,9 % - jedinou ztrátou v procesu jsou tepelné ztráty z povrchu elektrokotle do okolí. [22]

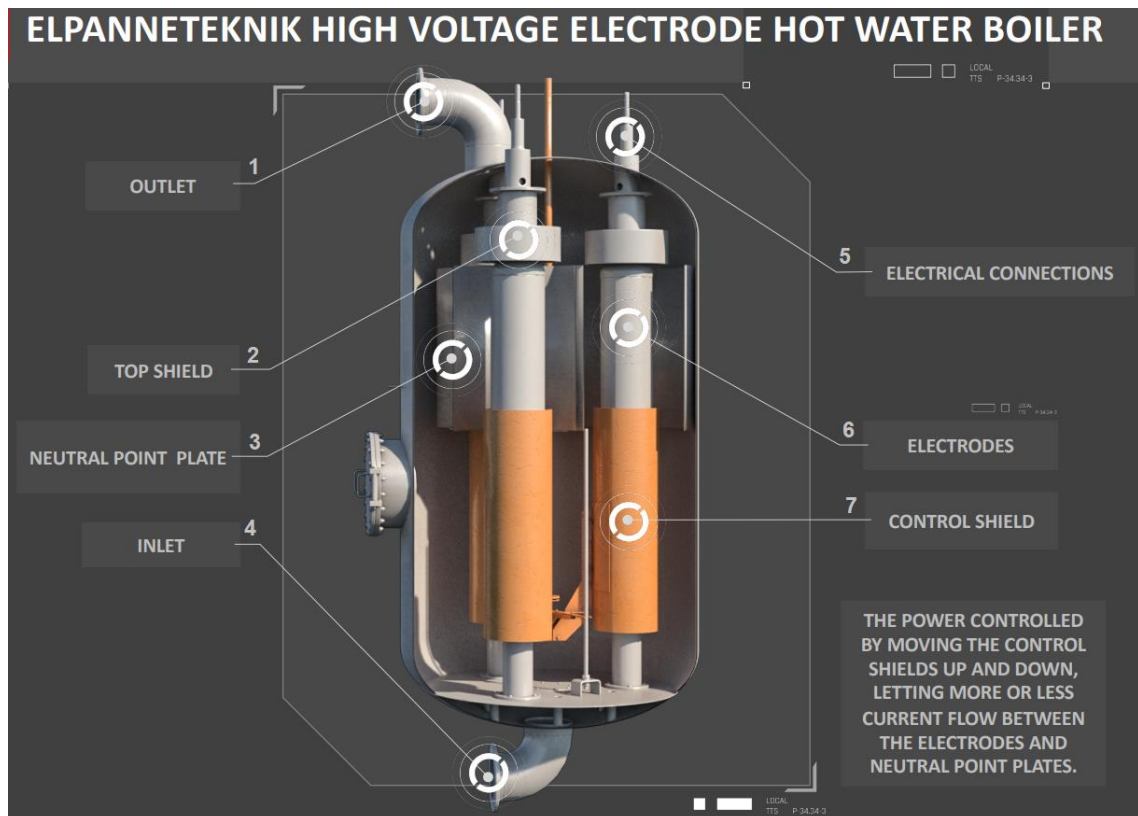
Elektrodové kotle lze dále rozdělit do několika podtypů, a to dle principu regulace výkonu a podle toho, zda je na výstupu z kotle horká voda nebo pára. Jednotlivé podtypy jsou představeny v následujících podkapitolách.

2.2.1. Celoplněné horkovodní elektrokotle

Prvním z popisovaných typů elektrodových kotlů je celoplněný horkovodní elektrokotel. Alternativně lze tento typ označit jako „plněplněný“ nebo anglicky „top-filled electrode boiler“. Je nutné poznamenat, že terminologie v oblasti elektrokotlů není v ČR z důvodu malého počtu instalací pevně ustálená.

Nádoba elektrokotle je zcela zaplněna vodou, ve které jsou zcela ponořené elektrody a na ně je přivedeno vysoké napětí. Oběhová voda primárního okruhu je oběhovým čerpadlem přiváděna do dna nádoby, která je přepážkou oddělené od zbytku nádoby. Voda ze spodní části tak může proudit pouze vzhůru třemi rozváděcími trubkami, které přivedou studenou vodu cíleně co nejbližší k fázovým elektrodám. Když voda projde mezi elektrodami, zůstává v prostoru hlavní nádrže elektrokotle, dokud není vyvedena výstupem v horní části nádoby elektrokotle do zbytku primárního okruhu. [35][37]

Schématický řez celoplněným elektrokotlem je na Obr. 2.1, a lze na něm popsat hlavní části: 1-výstup horké vody; 2-vrchní štít; 3-nulová elektroda; 4-vstup vody; 5-připojení elektrod; 6-fázové elektrody; 7-regulační stínící štíty.



Obr. 2.1: Schématický boční řez celoplněným horkovodním elektrodovým kotlem.
(Upraveno z [22])

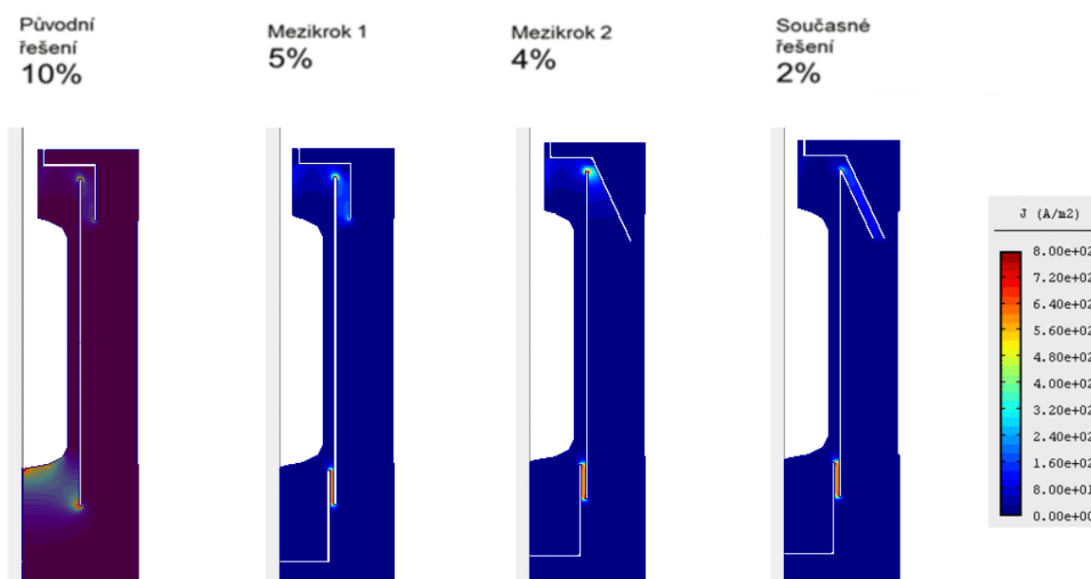
Celoplněné elektrokotle se instalují do sítě IT a proto je vnější nádoba oddělena od země izolátory o definované impedanci a rovněž i veškerá potrubí připojená k nádobě elektrokotle obsahují izolační element. Zapojení elektrokotle do trojúhelníku znamená, že pro stav symetrie fází neprotéká nulovým vodičem žádný proud. Elektrický proud protéká nulovým vodičem pouze při výskytu fázové asymetrie. Nulové elektrody v celoplněném elektrokotli jsou přímo spojeny s tlakovou nádobou, což znamená, že v případě asymetrie fází bude proud protékat také přímo pláštěm vnější nádoby. Elektrokotle s touto vnitřní konstrukcí tak mohou být bezpečně provozovány pouze za předpokladu instalace vnější ochranné klece kolem celého elektrokotle zamezující možnosti dotyku povrchu kotle, kdy dojde k automatickému odstavení napájení v případě otevření vstupních dveří do této ochranné klece. [37]

Hlavní regulační element celoplněného horkovodního elektrodového kotle představují válcové štíty z elektricky nevodivého materiálu, které po obvodu obklopují každou z do vody plně ponořených elektrod. Regulace výkonu kotle spočívá v přesném paralelním posouvání štítů axiálně podél elektrod, čímž dochází k většímu či menšímu stínění v prostoru mezi každou z fázových elektrod a nulovou elektrodou. To vede ke změně plochy, kterou může procházet elektrický proud, a to vyústí k cílené regulaci výkonu. Změnu polohy štítů obstarává průmyslový pohon spřažený ocelovým lanem přes kladkový mechanismus s nosným věncem, se kterým jsou pevně spojeny všechny regulační štíty. Poloha štítů je řízena hodnotou dosahovaného a zadaného příkonu. Otáčky oběhového čerpadla primárního okruhu jsou řízeny teplotou vody na výstupu z elektrokotle. [22][31][37]

Štíty mohou být vyrobeny z polyethylenu (HDPE) při teplotách výstupní vody z kotle cca do 110 °C. Obvykle je z důvodu vyšší teplotní odolnosti uplatňován polypropylen (PPH, PPR), a to pro teploty výstupní vody z kotle cca do 130 °C. Výhodou uvedených materiálů jsou dobré vlastnosti k technologickému zpracování, zejména svařování, a lze tudíž vyrobit štíty složitějšího tvaru za účelem dosažení nižšího minimálního výkonu. Pro aplikace s vyšší teplotou se poté používají štíty z nákladnějšího teflonu (PTFE). Teflon má ovšem pouze omezené možnosti technologického zpracování a nelze ekonomicky racionálně realizovat tvar optimalizovaných štítů. To vede k vyššímu minimálnímu výkonu při použití tohoto materiálu štítů. Určitou alternativou k teflonu by mohlo v budoucnu představovat použití polyvinylidenfluoridu (PVDF) s dlouhodobou teplotní odolností minimálně 150 °C a širšími možnostmi technologického zpracování v porovnání s teflonem, náklady jsou ovšem srovnatelné s teflonem, a proto je v praxi více upřednostňován návrh a úprava elektrokotlů na nižší teplotu, a tedy k použití polypropylenových štítů. [33][34][37]

Rychlost změny výkonu tohoto typu kotle najetého na provozní teplotě závisí na rychlosti servopohonu štítů. Požadavek na vyšší rychlost může u běžných pohonů vést ke snížení dosažitelné přesnosti řízení polohy. Rychlost změny výkonu při startu ze studeného stavu závisí navíc kromě rychlosti pohybu štítů také na rychlosti změny konduktivity vody a tudíž na rychlosti změny teploty vody primárního okruhu. [30][35]

Regulační rozsah tohoto typu regulace je spojitý, nicméně typicky nedosahuje plného rozsahu 0-100 %, protože i při plně zastíněných elektrodách dovolí konduktivita vody průchod zbytkového elektrického proudu mezi fázovou a nulovou elektrodou. Obvyklá hodnota minimálního výkonu je 2-8 % nominálního výkonu, v závislosti na teplotě v kotli a na výrobcu a modelu, respektive na konstrukčním řešení regulačních štítů. Pokročilejší tvary štítů dokážou omezit více zbytkový průchod elektrického proudu při plném zastínění elektrod. Příklad takových opatření je na Obr. 2.2. Skutečně nulového odběru celoplněného elektrokotle lze dosáhnout pouze faktickým vypnutím hlavního vypínače s omezenou životností vypínače podle počtu cyklů. Logicky tedy mezi nulovým a minimálním výkonovým stavem existuje nespojitý výkonový skok. [13][22][25]



Obr. 2.2: Změna minimálního výkonu v reakci na změnu konstrukce regulačních štítů (upraveno z [13])

Studený start tohoto typu elektrokotle se v závislosti na konkrétním konstrukčním provedení, objemu nádoby, dispozici potrubních tras a aktuálních provozních parametrech konduktivity a teploty pohybuje v rozmezí 3,5-8 minut. [35][36][40]

Tento typ elektrokotle je při uvádění do pohotovosti celý napuštěn vodou, definovanou procedurou odvzdušnění a pracuje v uzavřeném okruhu při zvýšeném tlaku se stálým množstvím vody. Objemové změny média řeší uzavřená expanzní nádoba s membránou nebo systém odpouštění a dopouštění upravené vody s jejím skladováním. [37]

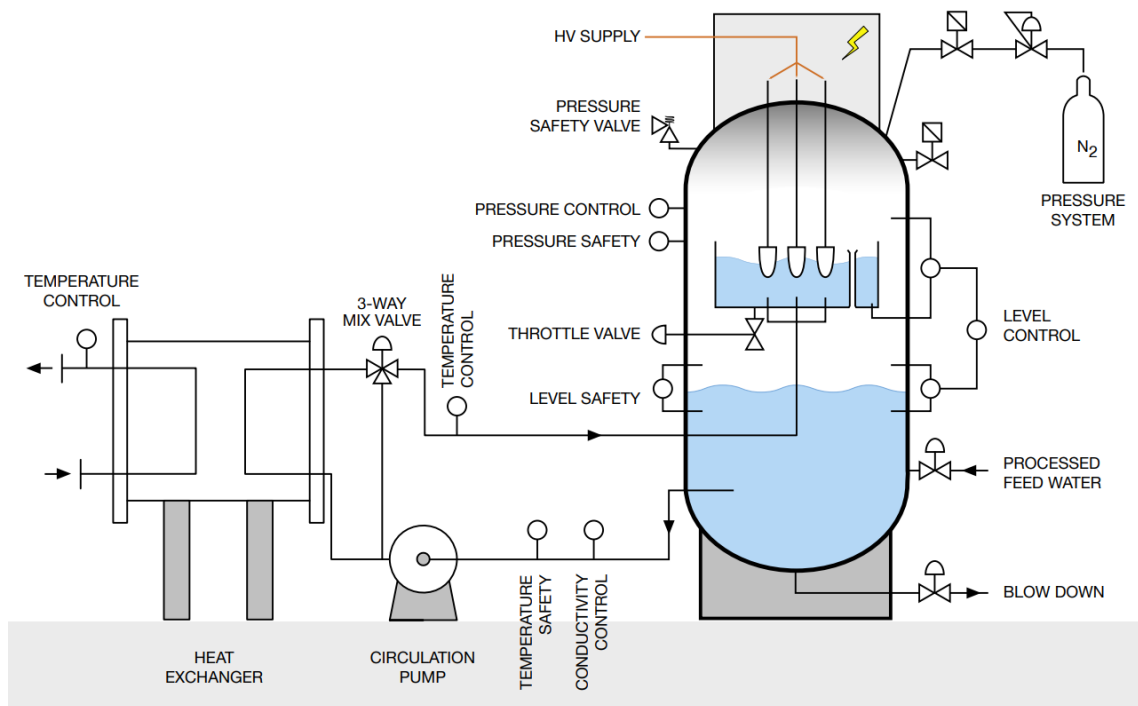
Příkladem celosvětově významných výrobců celoplněných elektrokotlů jsou tradiční evropští výrobci Zander & Ingeström (Švédsko) a Elpanneteknik Sweden AB (Švédsko), přičemž maximální standardně nabízený výkon je na úrovni 40 MW (Z&I) až 60 MW (Elpanneteknik).

2.2.2. Poloplněné horkovodní elektrokotle

Poloplněný elektrokotel, anglicky nazvatelný „electrode boiler with an insulated inner vessel“, není na rozdíl od předchozího typu celý naplněný vodou. Místo toho voda v nádobě zaujímá pouze část objemu a zbytek objemu je vyplněn inertním plynem.

Jak je patrné ze schématu na Obr. 2.3, uvnitř vnější tlakové nádoby elektrokotle je ještě jedna menší otevřená nádoba. V této vnitřní nádobě jsou ponořeny fázové elektrody, na které je přivedeno vysoké napětí.

Primární okruh pracuje následovně: voda je ze spodní části vnější nádrže oběhovým čerpadlem čerpána ven z elektrokotle přes externí výměník tepla zpět do elektrokotle do vnitřní nádoby. Pomocí rozváděcích trysek je nasměrována přímo na elektrody, u kterých se ohřívá průchodem elektrického proudu. Z vnitřní nádrže pak otvorem ve dně vnitřní nádoby gravitačně vytéká přes regulační klapku zpět do spodní části vnější tlakové nádoby elektrokotle. [24]



Obr. 2.3: Schéma systému poloplněného horkovodního elektrodového kotle [24]

Regulační princip poloplněných elektrodových horkovodních kotlů je odlišný od celoplněných. Ačkoliv poloplněné kotle rovněž regulují výkon kotle skrze aktivní plochu elektrod, místo štítů stínících trvale plně zaplavené elektrody se zde uplatňuje řízení měrou zaplavení elektrod. Frekvenčním měničem řízené cirkulační čerpadlo čerpá vodu z vnější nádoby přes tepelný výměník do vnitřní nádrže skrze distribuční trysky, zatímco regulační klapka na výpusti z vnitřní nádrže uzavírá odtok. Převaha přítoku do vnitřní nádrže nad odtokem vede ke zvyšování hladiny ve vnitřní nádrži, což vede k zaplavování a zvyšování aktivní plochy elektrod, a to vyústí ke zvýšení výkonu elektrokotle. Naopak snížení výkonu lze docílit otevřením regulačního ventilu výpusti z vnitřní nádoby. Výkon elektrokotle je přímo úměrný úrovni zaplavení elektrod. [24][25][35]

Poloplněné elektrokotle lze regulovat v celém rozmezí výkonu 0-100 %, což dovoluje nulový odběr i v pohotovostním režimu (stand-by) se sepnutým hlavním vysokonapěťovým vypínačem. V tomto stavu je vnitřní nádoba jednoduše vypuštěná. Při náběhu z nulového výkonu ovšem i tento typ vykáže skokovou změnu výkonu před ustálením na minimálním výkonu. Toto je dáno neideálním průběhem při napouštění zcela prázdné vnitřní nádrže, kdy při praktické velikosti elektrod jejich prvotní smočení znamená právě skokové zvýšení výkonu v řádu nízkých jednotek procent. Mezi minimálním nenulovým a maximálním výkonem je potom regulace spojitá. [24][25][26]

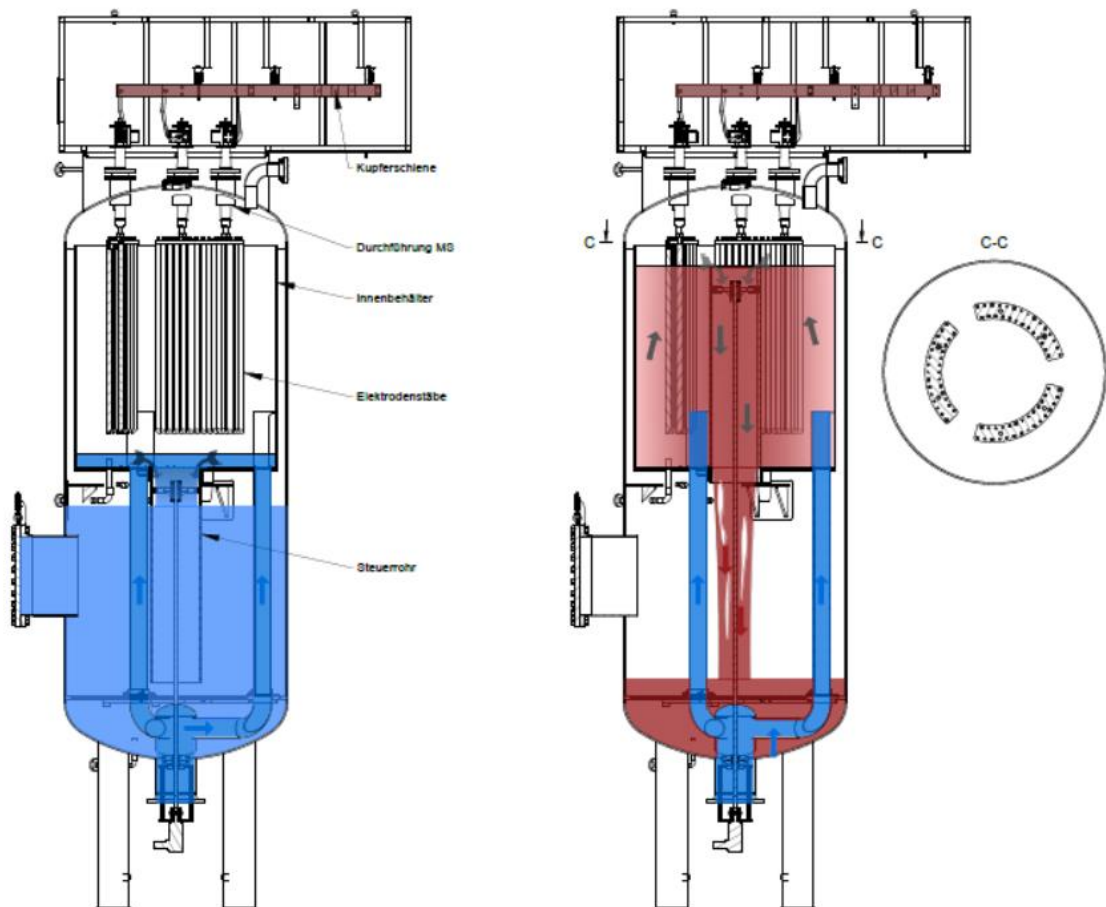
Výrobce Parat Halvorsen AS uvádí za předpokladu dodržení sady podmínek u tohoto typu elektrokotle studený start do 5 minut a provozní možnost změny výkonu z minimálního na maximální do 30 sekund. [24]

Tento typ elektrokotle je opět zapojen do trojúhelníku, a tak platí, že v případě symetrie fází neprotéká nulovou elektrodou žádný proud. Při případné asymetrii fází slouží přímo

vnitřní nádoba jako nulová elektroda. Vnitřní nádoba je odizolována od vnější nádoby, a proto není nutné instalovat ochrannou klec kolem celé nádoby elektrokotle, protože na vnější nádobu se nemůže dostat napětí v žádném (ani poruchovém) stavu. [38]

Inertním plynem v nádobě je typicky dusík. Dusíkové hospodářství se stará o zajištění nekorozivní atmosféry v nádobě a rovněž plní funkci expanzního systému a držení tlaku. Nutnost dusíkového hospodářství patří mezi nevýhody tohoto typu elektrokotle, neboť při provozu dochází ke znečištění dusíku ve vrchlíku nádoby vodíkem vlivem postranně probíhající elektrolýzy vody a je nutné směs dusíku s vodíkem z vrchu nádrže odvětrávat dle předpisů a znovu doplňovat.[35]

Alternativní koncepcí konstrukce v principu stejného typu elektrokotle je model ZBVA švédského výrobce Zander & Ingeström AB, který místo regulační klapky na výtokovém otvoru vnitřní nádrže používá vnitřní mechanismus, který v důsledku své činnosti mění výšku přepadu ve vnitřní nádobě a tím reguluje výkon.[35]



Obr. 2.4: Schéma alternativní konstrukce poloplněného elektrokotle [35]

Poloplněné elektrokotle jsou výrobcem Zander & Ingeström považovány za rychlejší a celkově vhodnější pro dynamické aplikace (typicky PpS), než celoplněné. Nicméně i přes toto tvrzení není v ČR instalován žádný elektrokotel této konstrukce od tohoto výrobce.

Při požadavku na další zrychlení dynamického chování těchto kotlů ovšem vyvstává požadavek na výkonnější oběhové čerpadlo a může hrozit problém s vlněním hladiny ve vnitřní nádrži. [25]

Poloplněné kotle je potřeba odkalovat častěji než celoplněné, a to v objemu až vyšších stovek litrů za den. To zvyšuje energetickou ztrátu a klade větší požadavky na kapacitu výrobní přídavné vody. Přídavná voda navíc obsahuje kyslík, což přináší korozní potenciál, a proto výrobce předepisuje odplynění vody. Rovněž uvádění do provozu je u poloplněného kotle složitější a zdlouhavější, protože je potřeba celý kotel napřed naplnit vodou a potom přebytečnou vodu vytlačit inertním plynem (dusíkem).[34][35]

Mezi etablované výrobce tohoto typu elektrokotle patří PARAT Halvorsen AS (Norsko), Zander & Ingeström AB (Švédsko) a BVA Elektrokessel (Německo) a maximální standardně nabízený výkon je 60 MW.

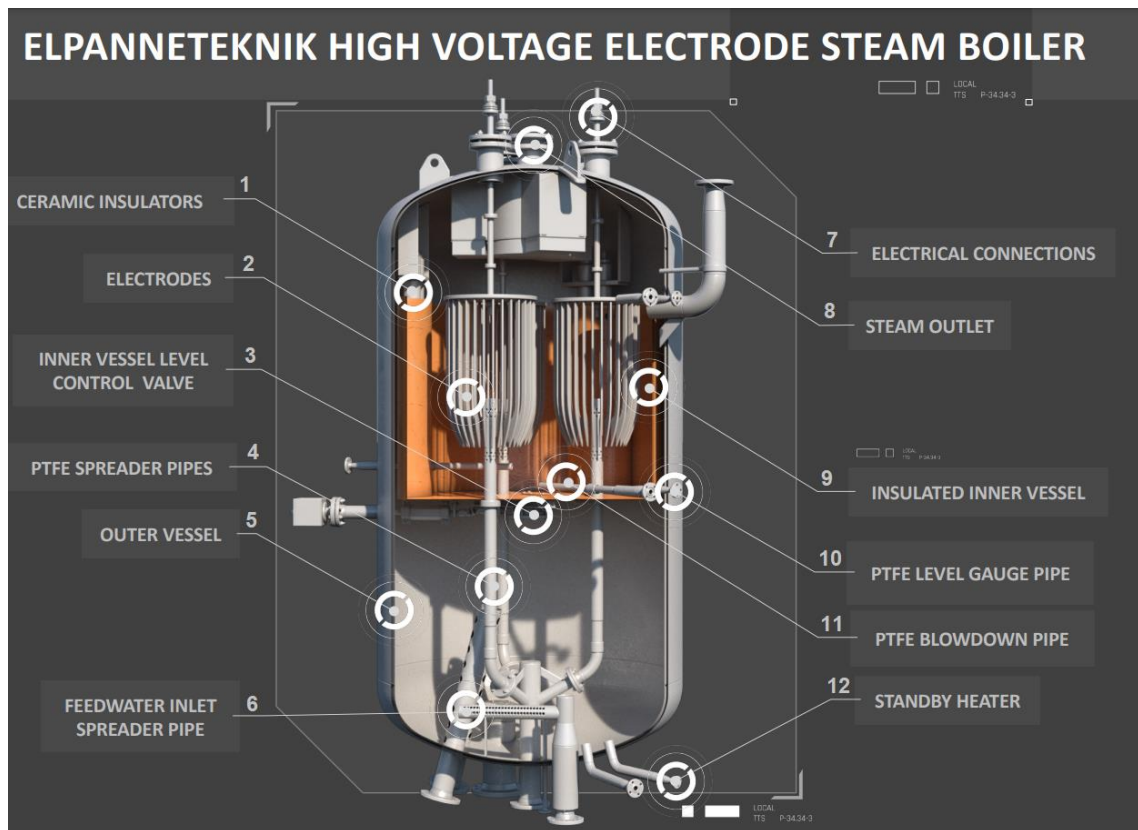
2.2.3. Ponorné parní elektrokotle poloplněné

Poloplněné ponorné parní elektrokotle, anglicky „immersion type steam electrode boilers“, jsou v současné době standardním typem a zároveň jediným v Evropě nabízeným konstrukčním řešením elektrodového parního kotle.

Parní elektrokotle vyrábí sytou páru, což je také požadavek většiny aplikací. Výrobci ovšem nabízejí také možnost instalace elektrického přehříváku pro nízké napětí. Pro většinu aplikací však není toto řešení ekonomicky smysluplné. [24][35]

Maximální standardně nabízený výkon tohoto typu elektrokotle přesahuje 60 MW (~90 t/h). Dosažitelná čistota páry z tohoto typu elektrokotle je obecně na velmi vysoké úrovni, vhodná pro všechny aplikace využívající páru, včetně jaderných elektráren. [25][36][38]

Schématický řez tímto typem elektrokotle je na Obr. 2.5. Konstrukce je v principu velmi blízká poloplněnému horkovodnímu kotli, popsanému v předchozí podkapitole. Rozdíl je v absenci dusíkového hospodářství, v přidaném vývodu syté páry z vrchní části tlakové nádoby a přídavném druhém regulačním ventilu na přívodním potrubí k elektrodám (první regulační ventil je na výpusti vnitřní nádoby). Činnost primárního okruhu jinak zůstává v podstatě stejná.



Obr. 2.5: Schématický řez ponorným parním elektrodovým kotlem. (Upraveno z [23])

Části parního elektrokotle: 1-keramické izolátory; 2-elektroda; 3-regulační ventil hladiny ve vnitřní nádrži; 4-teflonové rozstřikovací rozvodné trubky; 5-vnější nádrž; 6-vstupní potrubí napájecí vody; 7-připojení elektrod; 8-výstup páry; 9-vnitřní nádoba odizolovaná od vnější; 10-teflonový port měření hladiny; 11-teflonové odkalovací potrubí; 12-přídavný NN ohřev.

Regulace parních ponorných elektrokotlů je v principu taktéž velmi blízká poloplněnému horkovodnímu typu, nicméně řízení procesu regulace je komplexnější v tom, že se část vody přivedené do vnitřní nádrže odpařuje a odchází z regulačního okruhu. [23][25]

Studený start elektrokotle spočívá v prvotním přehřevu nízkonapětovým topným tělesem, a to cca do 20 minut, poté je elektrokotel ve stavu ekvivalentnímu teplému startu. Teplý start ze standby zabere 8-10 min, přičemž odběr elektřiny může být zahájen v řádu sekund. Většinou je parní elektrokotel i v době mimo provoz udržován ve stand-by právě pomocí ponorného ohříváče. [36]

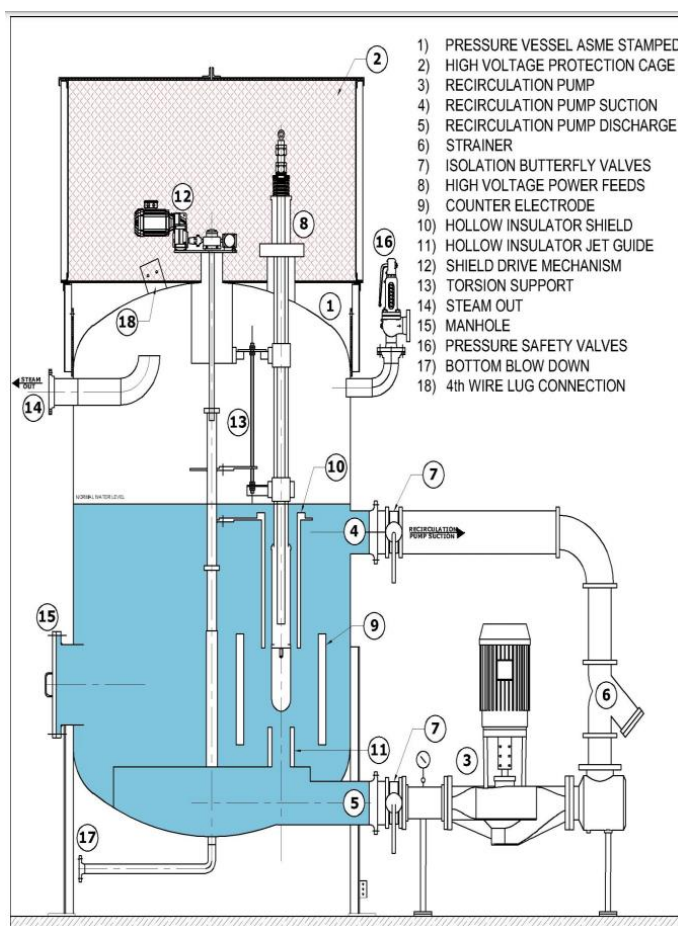
Všichni již zmínění evropské výrobci mají ve svém portfoliu i parní elektrokotle tohoto typu, lze tedy znovu zmínit PARAT Halvorsen AS, Zander & Ingeström AB, Elpanneteknik Sweden AB či BVA Elektrokessel.

2.2.1. Ponorné parní elektrokotle se štíty

Parní elektrokotel se štíty nenabízí na evropském trhu žádný výrobce. V celosvětovém měřítku nabízí tento typ elektrokotle původem kanadský dodavatel ACME Engineering Prod. Ltd., který kotle dodává do Kanady, USA a Asie (Indie, Čína).

Ze schématu na Obr. 2.6 je patrné, že se v tomto případě jedná o jakýsi parní ekvivalent horkovodního celoplněného kotle. Zde přirozeně není tlaková nádoba celá zaplněna vodou, protože v horní části nádoby se akumuluje vyrobená pára, nicméně elektrody jsou trvale zaplaveny a podobně jako u horkovodního celoplněného kotle je výkon regulován regulačními štíty. V horní části nádoby je vývod páry. Vývod vody primárního okruhu je ve stěně nádoby, kde voda cirkuluje přes filtr, mísí se s přídatnou vodou a je hnána cirkulačním čerpadlem přes usměrňující trysku zpět k fázovým elektrodám. [28]

Výrobce u tohoto typu kotle uvádí studený start v rozmezí 30-40 minut a teplý start 1 minuta. Udávaný regulační rozsah je 10-100 % a nulového odběru lze dosáhnout pouze vypnutím VN vypínače.[28]



Obr. 2.6: Ponorný parní elektrokotel s regulačními štíty.

Části: 1-Tlaková nádoba; 2-ochranná klec; 3-oběhové čerpadlo; 4-sání oběhového čerpadla; 5-výtlač oběhového čerpadla; 6-filtr; 7-izolující klapky; 8-přívod VN napájení; 9-nulová elektroda; 10-regulační štít; 11-vodící sedlo štítů+přívodní tryska; 12-pohon regulačních štítů; 13-výztuha; 14-výstup páry; 15-servisní otvor; 16-pojistný ventil; 17-odkalovací potrubí; [28]

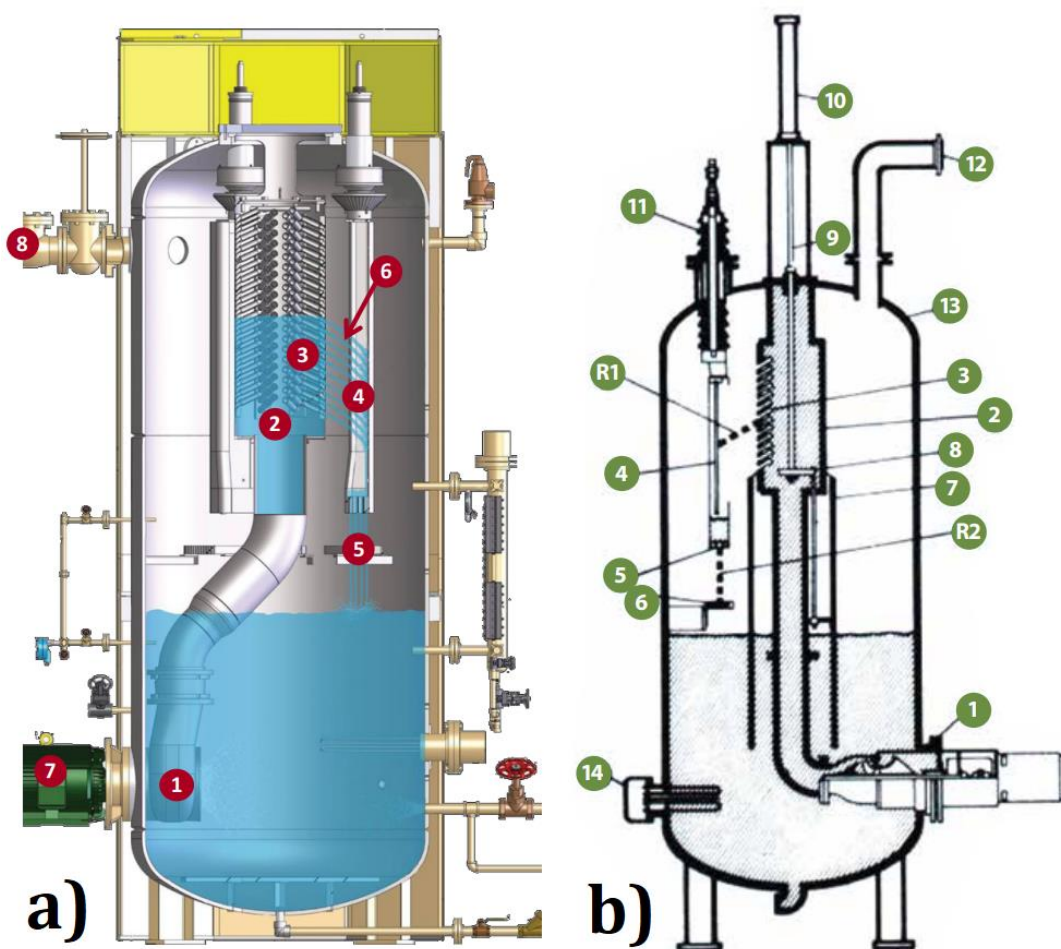
2.2.1. Tryskající parní elektrokotle

Doplňkově lze uvést i dnes již v Evropě nepoužívaný princip tryskajících elektrodových parních kotlů, anglicky „Jet-type steam electrode boilers“. Jedná se o koncept původem ze Švýcarska, dnes na trhu ještě např. v USA.

Na Obr. 2.7a je schéma původního konstrukčního typu tryskajícího elektrokotle, který nabízí výrobce Precision Boilers. Pára je v tomto typu elektrokotle vyvíjena ostřikováním neponořené elektrody. Voda je oběhovým čerpadle vháněna do vnitřní nádoby s velkým počtem trysek. Voda z trysek ostřikuje elektrody, stéká po fázové elektrodě a odkapává na nulovou elektrodu a neodpařený podíl vody odtud teče zpět do spodní části tlakové nádoby.[27]

Regulace výkonu probíhá změnou hladiny ve vnitřní nádobě. Tím dochází k zaplavování různého počtu trysek tomu odpovídá změna průtoku vody na elektrody.

Na Obr. 2.7b je modifikovaný konstrukční typ tohoto elektrokotle nabízený firmou ACME. Modifikace spočívá v implementaci řídicích štítů, které kryjí určitý počet trysek a tím je regulován výkon. Hladina vnitřní nádrže tak může být udržována na konstantní úrovni. [29]



Obr. 2.7: a) Tryskající parní elektrokotle: a) Precision Boilers, b) ACME (upraveno z [27][29])

Hlavními nevýhodami této koncepce je vysoká proudová hustota, vedoucí k vyšší tendenci k výbojům, a tím pádem k opotřebením a dále k riziku výbuchu vodíku vzniklého z elektrolýzy na elektrodách. Jediný evropský případ výbuchu tohoto typu elektrokotle vedl ke kompletnímu zastavení prodeje tohoto typu kotle na území Evropy. [36][38]

Kromě toho dosahují tyto elektrokotle pouze nižší čistoty a suchosti páry. To je dáno malou plochou výparu, pára tak prostor opouští značnou rychlostí, strhává s sebou i neodpařené vodní kapky a z toho plyne nižší suchost páry. Nižší čistota je pak dána tendencí tohoto parního kotle akumulovat v kotelní vodě přídavné látky, které při únosu v kapalné podobě mají erozivní potenciál. [36][38]

Další nevýhodou těchto kotlů je umístění oběhového čerpadla integrovaně do tlakové nádoby. To zesložituje konstrukci, zabraňuje možnosti zálohování čerpadla a komplikuje údržbu. [38]

Realizace tohoto elektrokotle je o něco méně náročná na plochu, ovšem výrazně náročnější na výšku než alternativní koncepty. Přídavnou volnou výšku navíc vyžadují nároky na servisní prostor nad elektrokotlem. [38]

Výše uvedené vlastnosti vedly v Evropě k útlumu a náhradě tohoto typu elektrokotle ponorným poloplňným parním typem popsaným výše.

2.3. Odporové elektrokotle pro nízké napětí

Odporové elektrokotle pro nízké napětí, alternativně „elektrokotle s topnými tělesy“, anglicky „heating element electric boilers“ ohřívají vodu nepřímou. Elektrický proud neprotéká přímo vodou, ale topným elementem, který se díky svému odporu zahřívá a předává přes teplosměnnou plochu teplo vodě v okolí. Nabízeny jsou ve vodním i parním provedení.

Celkový výkon odporových elektrokotlů bývá složen s dílčích výkonů jednotlivých odporově topných elementů. Možnost regulace tak spočívá v selektivním vypínání určitých topných elementů z celkového počtu. Jedná se tedy o nespojitou, krokovou regulaci v rozsahu 0-100 % nominálního výkonu. Regulační koncepce může buď sestávat ze stejně velkých samostatných jednotek, nebo lze regulační rozsah složit z elementů různé velikosti a pomocí přepínání různých jejich kombinací dosahovat požadovaného výkonu. Při požadavku na určitou spojitost v regulaci lze pro některé elementy v sestavě použít dražší tyristorové elementy, které dovolují spojitě měnit elektrický odpor prvku a tím výkon. [35]

Zásadní nevýhodou těchto elektrokotlů pro nasazení pro podpůrné služby je potřeba řešit transformaci napětí, protože typicky výrobci odporové elektrokotle dodávají pro nízké napětí na běžných úrovních v rozmezí 230-690 V. Nasazení takových kotlů v teplárnách to spolu s požadovaným výkonem prakticky vždy znamená nový dedikovaný transformátor, což významně přispívá k navýšení měrných nákladů. Měrné náklady na instalovanou kW jsou obecně u těchto elektrokotlů zřetelně vyšší oproti elektrodovým kotlům, což tvoří hlavní důvod, proč v praxi nejsou nasazovány za účelem poskytování podpůrných služeb v teplárenství.[30]

Standardní modelová řada většiny výrobců obsahuje elektrokotle od 100 kW do několika jednotek megawatt, přičemž někteří výrobci jsou schopni individuálně dodat i vyšší výkon, až do 10 MW. Porovnání s běžným výkonovým rozsahem uváděným výrobcí u elektrodoových kotlů ukazuje, že jeden nízkonapěťový kotel dokáže obsáhnout pouze malý zlomek možného výkonu jednoho elektrodoového kotle.

Mnozí výrobci elektrodoových kotlů nabízejí i kotle odporové – z již zmíněných například tedy PARAT a Zander & Ingeström, přičemž v oblasti odporových elektrokotlů působí hlavně v oblasti nižších výkonů větší množství výrobců a další do tohoto segmentu vstupují – v aktuálním roce např. Bosch s modelem ELSB.

2.4. Význam úpravy vody pro elektrodoové kotle

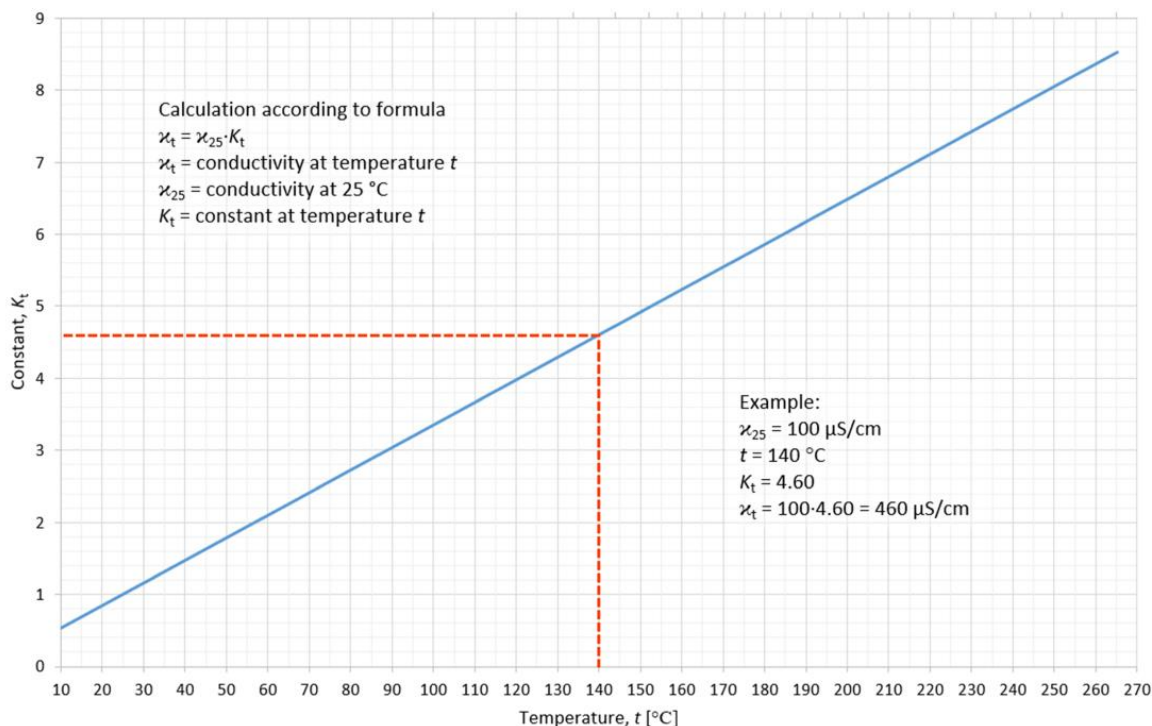
Úprava vody na určitou konduktivitu má v energetice významnou roli. V případě elektrodoových kotlů však kromě dosahování obvyklých efektů souvisí úprava vody přímo s hlavním principem jejich fungování, a proto tato podkapitola pojednává o významu konduktivity v elektrodoových kotlích.

Průchod elektrického proudu médiiem je ovlivněn jeho vodivostí a tím pádem jeho konduktivitou (převrácenou hodnotou rezistivity). U elektrokotlů je médiiem specificky upravená voda mezi fázovou a nulovou elektrodou.

Přídavná voda pro napájení elektrodoového elektrokotle je nejprve upravena reverzní osmózou nebo pomocí ionexů na kvalitu demi vody. V případě parních elektrokotlů poté následuje odplynění v napájecí nádrži. Poté se do takto předupravené přídavné vody o konduktivitě do 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a pH 8 až 9,5 dává fosforečnan sodný (Na_3PO_4), siřičitan sodný (Na_2SO_3) nebo hydroxid sodný (NaOH), což v závislosti na požadovaném provozním chování zvýší konduktivitu k hodnotám většinou v rozmezí 60 až 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (přepočteno na 25 °C) a k pH 9 až 11. [22][38][37]

Regulace konduktivity je automatizovaná. Zvyšování probíhá pomocí dávkování zmíněných látek, snižování potom pomocí odkalovacího potrubí a doplňování čisté demi vody.

Konduktivita upravené vody je funkcí teploty. Vyšší teplota vede k vyšší disociaci H_2O na H^+ a OH^- a znamená vyšší vodivost. Závislost konduktivity na teplotě popisuje Obr. 2.8. Na svislé ose je koeficient (zvaný „Conductivity increasing factor“), který představuje násobek známé konduktivity přepočtené na 25 °C. [35][39]



Obr. 2.8: Závislost konduktivity vody na teplotě [35]

Pro závislost z grafu lze odvodit předpis pro zmíněný koeficient jako funkce teploty:

$$K = \frac{18}{575} \cdot T + \frac{5}{23} \quad [1] \quad (1)$$

Konkrétní hodnota konduktivity nastavená v elektrokotli se může lišit mezi různými zařízeními i v rámci jednoho zařízení v různém čase. Záleží na zamýšleném provozním chování, kde lze např. nastavit vyšší konduktivitu a upřednostnit rychlost studeného startu na úkor zvýšení minimálního výkonu u celoplněných elektrokotlů.

Maximální konduktivita je shora fyzikálně omezena zvyšující se tendencí k elektrickým výbojům a přeskokům a zvyšuje se rovněž opotřebení elektrod. Měřítkem přiblížení k hraničnímu stavu je hodnota hustoty elektrického proudu, jejíž praktický horní limit leží v blízkosti $0,12 \text{ A/cm}^2$. Tato hodnota vychází z průmyslové praxe. Praktický spodní limit použitelné konduktivity je dán možností dosáhnout nominálního výkonu za požadovaný čas anebo ho dosáhnout před dosažením limitně vysoké teploty. [32][33]

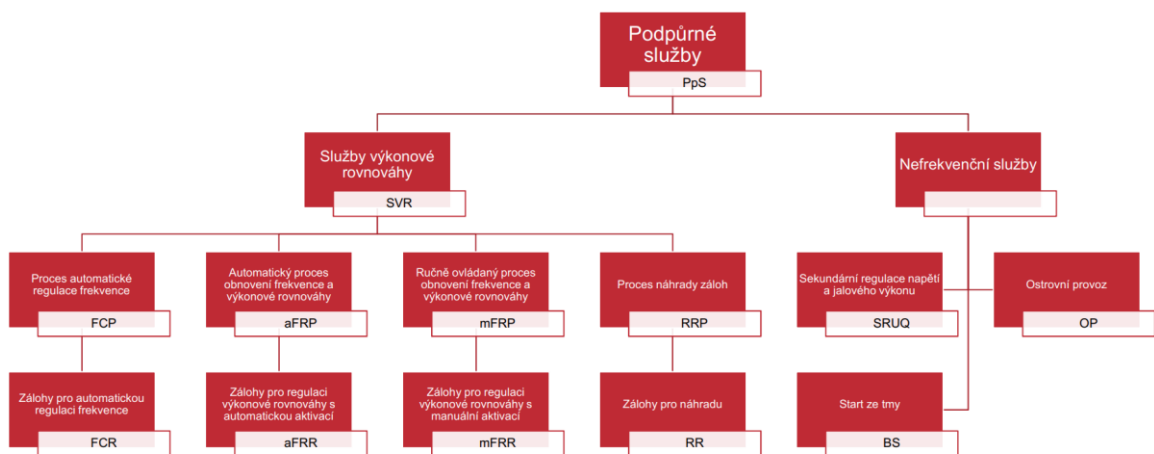
3. Elektrokotle pro podpůrné služby

Dnes známé konstrukční koncepce elektrokotlů nebyly původně navrhovány a optimalizovány primárně pro poskytování SVR, nýbrž pro tradičnější použití pro výrobu tepla a páry v podnicích, jako doplňkové zdroje pro levnější tarify a jako záložní zdroje tepla (např. i v jaderných elektrárnách), přičemž tyto aplikace nekladou takové nároky na provozní dynamiku, jako použití pro SVR. Následující kapitoly si kladou za cíl konfrontovat reálné vlastnosti elektrokotlů s potřebami poskytovatelů podpůrných služeb a identifikovat možné cesty ke zlepšení funkce elektrokotlů určených pro podpůrné služby.

3.1. Podpůrné služby a současný stav využití elektrokotlů v ČR

Úkolem provozovatele přenosové soustavy (PPS), v ČR společnosti ČEPS, a.s., je zajišťovat tzv. systémové služby. K tomu PPS využívá tzv. podpůrné služby (PpS), které nakupuje od účastníků trhu s elektřinou, kteří poté poskytují tyto služby na energetických zařízeních (jednotkách) certifikovaných předepsaným způsobem pro poskytování konkrétních služeb. PPS služby obstarává buď na základě dlouhodobějších výběrových řízení, přímých smluv a nebo na základě denního trhu. [12]

Aktuální dělení podpůrných služeb prezentuje Obr. 3.1:



Obr. 3.1: Struktura dělení podpůrných služeb od dubna 2019 [5]

Detailní popis problematiky fungování podpůrných služeb a podmínek jejich obstarávání a poskytování netvoří náplň této práce. Potřebné informace v přesném znění poskytnete Kodex [12]. Tato práce se PpS věnuje ve vztahu k elektrokotlům a představuje změny a trendy, které se poskytování PpS nově týkají nebo budou v budoucnu týkat a mohou limitovat nebo podporovat další využití elektrokotlů pro poskytování PpS.

Elektrokotle jako samostatná technologie technicky umožňují služeb výkonové rovnováhy (SVR) aFRR- a mFRR_{12,5}-. Některé ze současných poloplněných elektrokotlů teoreticky technicky umožňují také poskytování primární regulace (FCR). Poskytování primární regulace na samostatně certifikovaném elektrokotli ovšem připadá v úvahu pouze za předpokladu kontinuálního provozu elektrokotle ve vhodném základním zatížení s možností kladné nebo záporné změny výkonu. Tento provozní model není v případě ČR relevantní, nicméně bylo by možné ho v současné době uvažovat například v případě

poměrů severovýchodních států Evropy, kde pro nasazení elektrokotlů hovoří dlouhodobě nízké ceny elektřiny, velký podíl elektřiny z obnovitelných zdrojů a v některých případech i logistická obtížnost jiných řešení.

V Evropě pracují vyšší desítky instalací elektrokotlů. Tradici mají elektrokotle ve zmíněné severní Evropě, tedy ve Švédsku, Norsku, Dánsku a Finsku. Nicméně v posledních dekádách došlo k rozšíření i do zbytku Evropy a elektrokotlové instalace má mimo jiné např. Slovensko, Německo, Maďarsko, Nizozemsko, Bělorusko, Slovinsko, Itálie a rovněž Česká republika.[13][16][17][36][38]

V případě České republiky se jedná řádově o deset velkých elektrokotlů. První instalace tohoto druhu elektrokotle v ČR proběhla v roce 2013 a doposud nejnovějšími realizacemi jsou elektrokotle s plánovaným uvedením do provozu v roce 2022.

Elektrokotle lze dle Kodexu ČEPS certifikovat pro PpS buď samostatně (tzv. „stand-alone“) nebo v agregacním bloku (AB) s jinou jednotkou. V kontextu současných českých poměrů se jako smysluplné jeví buď samostatný elektrokotel pro záporné varianty PpS (aFRR-, mFRR_{12,5}-), anebo pro poskytování PpS v agregacním bloku např. s klasickým teplárenským zdrojem, kde elektrokotel slouží k rozšíření kapacity poskytovaných PpS například spolu s turbínou nebo kogenerační jednotkou. Elektrokotel tedy může být v základním stavu odstavený a do provozu je uveden pouze pokud by pokyn pro regulaci měl vést k požadavku na provoz pod minimálním výkonem turbosoustrojí. Samozřejmě jsou možné i jiné kombinace a režimy spolupráce elektrokotle s jinými jednotkami v rámci agregacního bloku. [3][12]

Přehled elektrokotlů instalovaných v ČR prezentuje Tab. 3.1. Je z ní patrné, že valná většina elektrokotlů je využívána k poskytování PpS, z nichž většina poskytuje mFRR_{12,5}- a některé jednotky byly rovněž certifikovány na aFRR-.

Umístění	Výkon [MW]	Napětí [kV]	Druh	Výrobce	Rok instalace	PpS
Teplárna Příbram	12	10,5	HV, CP	Z&I	2013	mFRR _{12,5} -
ŠKO-ENERGO	15	6,3	HV, PP	Parat	2016	mFRR _{12,5} -
Teplárna Kladno	14	6	HV, CP	Z&I	2017	mFRR _{12,5} -
ČEZ Tušimice	7	6	HV, CP	Z&I	2017	ne
Teplárny Brno	20	10,5	HV, PP	Parat	2018	mFRR _{12,5} -
Energieon Chrudim	20	6,3	HV, PP	Parat	2019	aFRR-
Elektrárna Poříčí	30	10,5	parní	Z&I	2020	mFRR _{12,5} -
ECE Kutná Hora	25	22	HV, CP	Z&I	2022	mFRR _{12,5} -
Local Energies Zlín	15	22	HV, PP	Parat	2022	mFRR _{12,5} -
Energieon Chrudim	10	6,3	HV, PP	Parat	2022	aFRR-

Tab. 3.1: Elektrokotle instalované v ČR
(zkratky: HV =horkovodní kotel, CP=celoplněný, PP=poloplněný)
[1] [13][14][15][16][17][18][19][20][21][22][26]

3.2. Změny a trendy v poskytování PpS

Pravidla pro poskytování PpS se stále vyvíjejí a reagují na technické možnosti a změny, které v odvětví energetiky nastávají. Zpravidla jednou ročně je vydáván revidovaný Kodex přenosové soustavy, který od stanovené účinnosti zavádí úpravy těchto pravidel. Zatímco definitivní podoba nových pravidel je známá až z finální podoby nově schváleného Kodexu, tak zamýšlené změny bývají avizovány a rámcově známy již s určitým předstihem, a lze tudíž předpovídat směr budoucího vývoje poskytování PpS.

3.2.1. Změny v poskytování PpS od roku 2022

Aktuální revize Kodexu účinná od 1. dubna 2022 přinesla řadu výrazných změn. Hlavní z nich jsou zmíněny níže.

Standardní produkty

Od 1. 4. 2022 došlo k přechodu na tzv. standardní produkty regulační zálohy a standardní produkty regulační energie. Každé SVR přísluší jeden standardní produkt regulační zálohy a energie, s výjimkou FCR (pouze standardní produkt RZ) a RR (pouze standardní produkt RE). Standardní produkt má definované parametry a požadavky na poskytovatele a stanovuje minimální a maximální nabídnutelné množství. Standardní produkty jsou uvedeny v Kodexu [12]. [3]

Připojení do systému PICASSO a MARI

Cílem systému PICASSO je přeshraniční výměna regulační energie z aFRR. Zapojení přináší přechod na marginální ocenění regulační energie, a tudíž zrušení regulované ceny. Součástí je zkrácení doby do plné aktivace aFRR z 10 minut (do 2021) na 7,5 min a dále v budoucnu na 5 min (nejpozději 2024). Dále již proběhl přechod na žebříčkovou aktivaci.

V případě MARI se jedná o systém pro přeshraniční výměnu regulační energie z mFRR, a tedy možnost aktivace regulační energie mezinárodně. Rovněž dochází k přechodu na marginální ocenění regulační energie. Součástí je zkrácení doby do plné aktivace z 15 na 12,5 minuty. [4][5]

3.2.2. Změny v poskytování PpS od roku 2023

Typová certifikace

Typová certifikace umožní certifikovat konkrétní sériově vyráběný model výrobku jednoho výrobce s pevně danými parametry na poskytování určité velikosti zálohy, vybavený terminálem. To umožní poskytovat SVR „na klíč“. [4]

Modulární agregační bloky

Modulární agregační bloky mají umožnit úpravu skladby zdrojů v AB (přidávání a odebrání jednotek) bez nutnosti recertifikace. Místo recertifikace bude provedena jen zkušební aktivace. Cílem je usnadnění procesu změny skladby AB z hlediska finanční a administrativní zátěže. Všechna nová energetická zařízení budou zařazena do registru (např. certifikátorem)[6]

Metodika Baseline - Dynamický diagramový bod

Nový způsob určování diagramového bodu Za účelem umožnění vstupu na trh novým poskytovatelům, kteří nedokáží držet hodinově konstantní diagramový bod, bude zavedena predikce diagramového bodu v určitém předstihu. Toto opatření cílí na možné poskytovatele s technologiemi v OZE či na straně spotřeby. [2][3][4][6][7]

Další změny od roku 2023

- Stanovení baseline, a principy prekvalifikace zařízení na hladinu NN (v průběhu 2022 je očekáváno specifikování koncepce řízení a vyhodnocování pro agregaci SVR na hladině NN).
- Předpokládá se zapojení ČR do přeshraniční spolupráce FCR (2023) a aFRR (2023+), což částečně propojí trhy se SVR
- Sjednocení tolerancí pro certifikaci a provoz SVR [2][4][7]

3.2.3. Avizované změny v poskytování PpS po roce 2023

- Avizované zkrácení doby náběhu aFRR ze 7,5 na 5 minut bude zavedeno nejpozději do prosince 2024.
- Zavedení agregace flexibility pro SVR na hladině NN
- Předpoklad dalšího zrychlování služeb
- Očekává se se přechod k většímu podílu kapacity nakoupené na denním trhu
- Předpokládá se snížení celkového nakupovaného objemu SVR [2][5][6][7]

Popsaný výhled změn naznačuje, že budoucí změny vnesou do využití elektrokotlů pro SVR nové příležitosti, ale zároveň nové hrozby. Mezi příležitosti patří budoucí možnost modulárních agregáčnických bloků, které umožní snáze sestavit optimální AB a spojit elektrokotel do AB s jiným zařízením. Další potenciálně zajímavou příležitostí přinese rozšíření poskytování PpS z hladiny nízkého napětí (NN), což by mohlo usnadnit doplňkové využití NN elektrokotlů pro SVR. Nicméně konkrétní podoby potenciálního přínosu bude zřejmá až déle v průběhu roku 2022. Konečnou budoucí příležitost pro využití elektrokotlů představuje zavedení typově certifikovaných zařízení pro podpůrné služby, neboť modelovou typizací NN i VN elektrokotlů lze považovat za poměrně snadnou, a tudíž vzniká prostor pro využití elektrokotlů při zavádění poskytovatele podpůrných služeb „na klíč“, např. v AB s typizovanými kogeneračními jednotkami.

Potenciální hrozbu představuje zrychlování služeb, zejména aFRR, kde současný nový limit 7,5 min je očekáván jako splnitelný pro větší část elektrokotlů, nicméně budoucí limit 5 min již si pravděpodobně vyžádá určité úpravy alespoň na některých elektrokotlích. Obtížně predikovatelný zatím zůstává finální dopad zapojení do přeshraniční výměny regulační energie a avizované snižování nakupovaného objemu, což teoreticky povede ke zvýšení tlaku na konkurenceschopnost poskytovatelů.

3.3. Technické možnosti elektrokotlů vzhledem k PpS

Jak již bylo naznačeno, pro použití elektrokotle pro v současné době ve střední Evropě relevantní podpůrné služby vyplývá, že důležitými parametry elektrokotlů pro plnění požadavků ze strany PPS (ČEPS) jsou rychlost startu ze studeného stavu na plný výkon, rychlost teplého startu, rychlost změny výkonu při provozu a rozsah a charakteristika regulace výkonu, resp. minimální výkon.

3.3.1. Kritické body v certifikačním procesu

Požadavky kladené aktuální podobou II. části Kodexu ČEPS na jednotky poskytující aFRR- a mFRR_{12,5-} v současné době dovolují úspěšnou certifikaci elektrokotlů všech typů pro poskytování těchto služeb.

Situace by se však mohla dramaticky změnit v případě, že by některá z dalších revizí Kodexu zavedla certifikační požadavek na prokazování určité hladiny nízkého výkonu, konkrétně v rozmezí od 0 do 8 % instalovaného výkonu (nulu vyjímaje). Stabilizovat výkon na takto nízké úrovni je pro stávající technologii elektrokotlů obecně obtížné, jak vyplývá z regulačního chování popsaného dříve. Ještě obtížněji dosažitelná by však tato úroveň výkonu byla pro celoplněné elektrokotle při snižování výkonu z plného výkonu zpět do zmíněného rozmezí blízko minimálního výkonu – při certifikaci tedy nikoliv na začátku, ale v průběhu nebo na konci prováděné certifikace. Pokud by navíc společně s tímto požadavkem došlo u aFRR k dalšímu zrychlení času do plné aktivace, byla by možnost poskytování služby aFRR- na elektrokotlích značně ohrožena.

Současné nároky na certifikaci zařízení pro vybrané SVR jsou následující.

3.3.1.1. Služba mFRR_{12,5-}

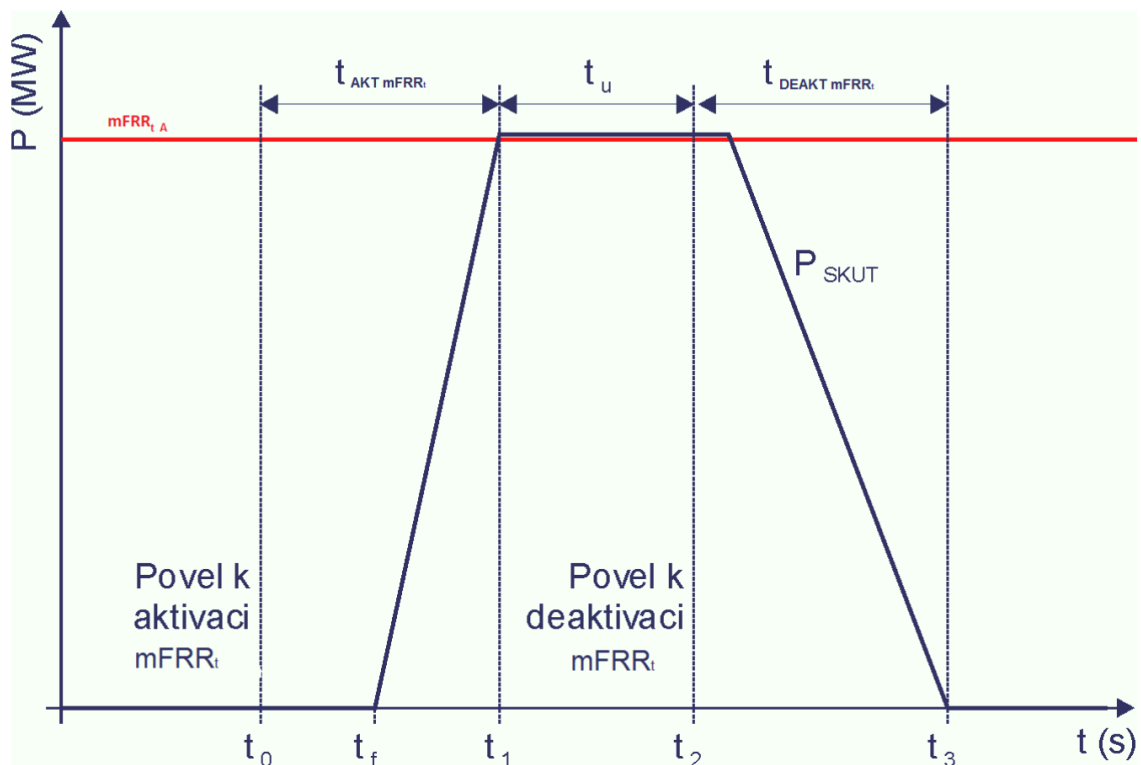
Jedná se o nejčastěji poskytovanou SVR na elektrokotlích, což je dáno vhodnou povahou služby, kdy v základním stavu je jednotka odstavená, a dále také relativně nízkými nároky kladenými na dynamické chování jednotek, které elektrokotle dokázaly od počátku s rezervou splnit.

Instalace certifikované před dubnem 2019 byly původně certifikovány na poskytování podpůrné služby minutových záloh RZMZ₁₅₋, po tomto datu došlo v kodexu ČEPS ke změně a zálohy pro analogickou službu byly přejmenovány na „zálohy pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací“ a dostaly označení mFRR₁₅₋. Od 1. dubna 2022 došlo ke zrychlení náběhu do plné aktivace u této služby z původních 15 na 12,5 minut, s odpovídající úpravou názvu – nově tedy mFRR_{12,5-}. Existuje možnost uznat původní certifikaci poskytovatele, recertifikace není vždy vyžadována a stanovení parametrů aktualizovaného certifikátu vychází z dat původního měření, dle podmínek pro převod certifikátů v Kodexu [12]. Převodem certifikátu ovšem dojde ke snížení certifikované kapacity na jednotce a proto v praxi většina jednotek, pro které bude nový zkrácený aktivační čas technicky dosažitelný s plnou výkonovou kapacitou, bude stejně recertifikována. [8][9][10][11][12]

Aktivace služby mFRR_{12,5-} může proběhnout buď jako plánovaná a nebo jako přímá. Plánovaná aktivace a deaktivace může přijít vždy jen v časech HH:07:30, HH:22:30, HH:37:30 a HH:52:30, kde HH je označení aktuální hodiny. Přímá aktivace může přijít

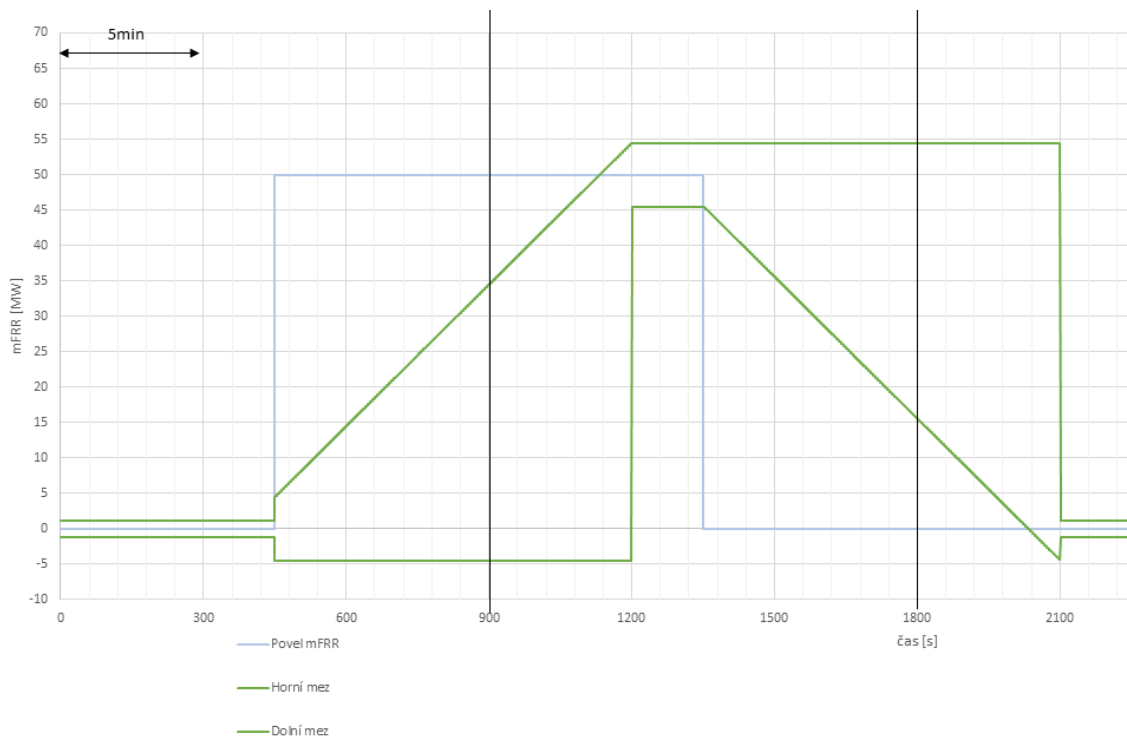
kdykoliv, ovšem deaktivace musí proběhnout opět pouze ve výše zmíněných časech v rámci dané hodiny a platí, že minimální délka aktivace (interval mezi pokynem k aktivaci a pokynem k deaktivaci) je 15 minut [12][31]

Současným Kodexem předepsaný průběh certifikačního testu je na Obr. 3.2. V případě $mFRR_{12,5}$ požadovaný průběh předepisuje dobu 2,5 min po obdržení aktivačního požadavku na přípravu, poté následuje 10 minut rampování na příkon odpovídající certifikované výkonové záloze. Aktivace trvá minimálně 15 minut a poté následuje 12,5 min na postupnou deaktivaci a odpojení od sítě. Kodex předepisuje metodiku vyhodnocení kvality a přesnosti poskytnuté služby, včetně dovolené odchylky od stanoveného výkonu v každém okamžiku. [12]



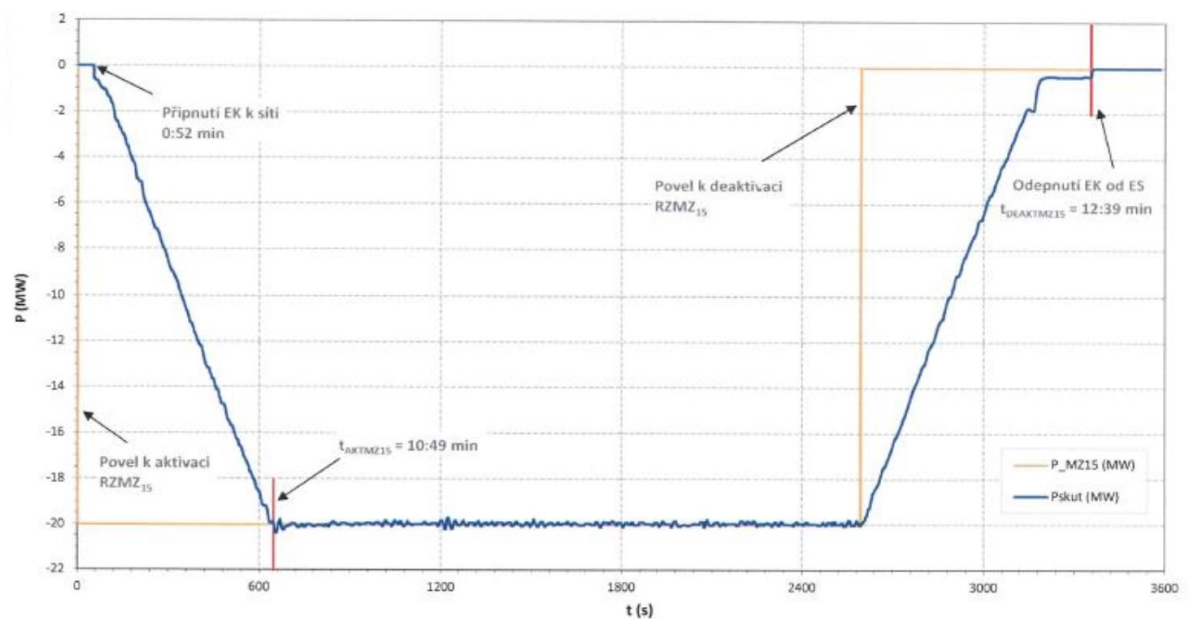
Obr. 3.2: Průběh certifikačního testu $mFRR_{t_A}$ [12]

Úskalí při certifikaci elektrokotlů na tuto službu spočívají hlavně v definované limitní odchylce od zadané hodnoty výkonu, viz Obr. 3.3. To znamená, že nejsou žádoucí nekontrolované výkonové výkyvy mezi nulovým a certifikovaným příkonem. Nyní toto v praxi neznamená žádné omezení, při snaze zrychlit start elektrokotle to ale z možných opatření vyřazuje možnost jednoduše nastavit nenulovou aktivní plochu elektrod již před připojením elektrokotle k síti – tedy u celoplněných elektrokotlů předvysunutí štítů a u poloplněných elektrokotlů předplnění vnitřní nádoby čerpadlem. Po připojení k síti by totiž došlo k výkonovému skoku o proměnné velikosti v závislosti na aktuální nekontrolované teplotě vody v kanálu elektrod, která závisí hlavně na době od poslední aktivace. Ani v případě dalšího budoucího zrychlování služby však nejsou předpokládány žádné komplikace ohledně rychlosti nájezdu, zejména pokud zůstane zachovaný předepsaný lineární náběh příkonu.



Obr. 3.3: Zobrazení průběhu vyhodnocení $mFRR_{12,5}$ (upraveno z [2])

Typické regulační chování poloplněného kotle lze pozorovat na grafu výkonu z certifikace tohoto typu elektrokotle na službu RZMZ₁₅- na Obr. 3.4. Po připojení elektrokotle k síti následuje skoková změna na minimální výkon kolem 3 % nominálního výkonu, následuje zaplavit elektrod a postupný ohřev a tím lineární růst výkonu. Na nominálním výkonu dojde postupně k ustálení. Po povelu k deaktivaci výkon postupně klesá až k minimálnímu výkonu kolem 3 %, než dojde k odpojení elektrokotle od sítě. [26]

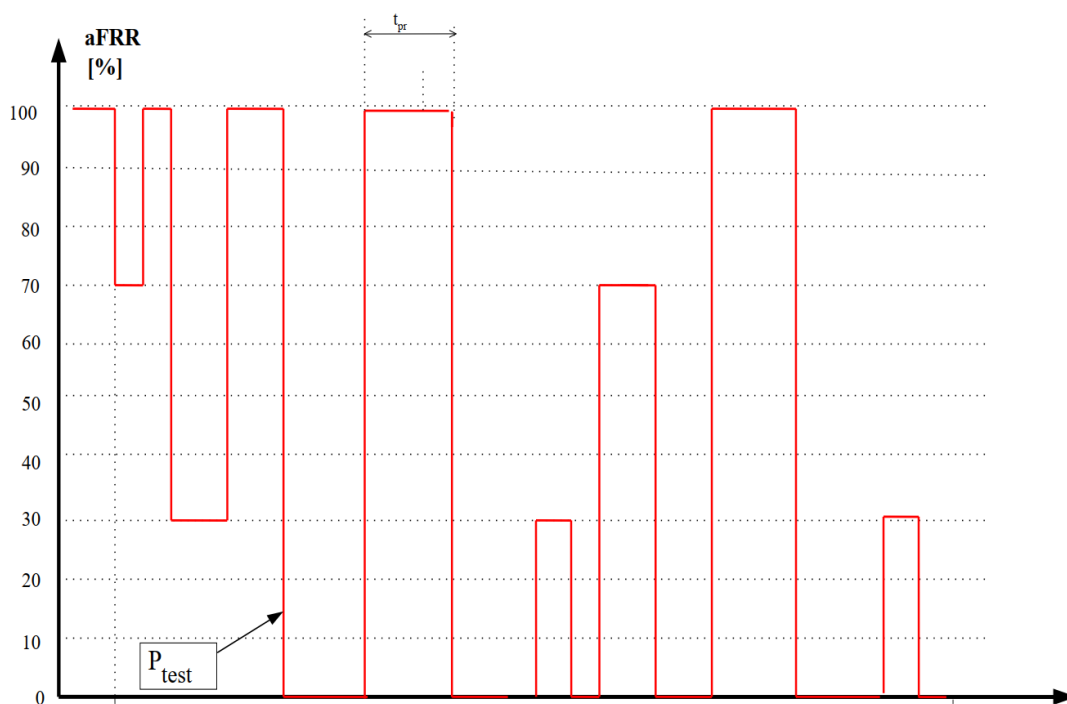


Obr. 3.4: Průběh výkonu poloplněného elektrokotle při certifikaci na RZMZ₁₅- [26]

3.3.1.2. Služba aFRR-

Některé v ČR instalované elektrokotle jsou v současné době pro poskytování služby aFRR-certifikovány. Na základě modelu z kapitoly 5 lze vyvozovat, že celoplněné elektrokotle instalované v ČR samy o sobě technicky dokážou splnit současné podmínky kladené na zálohy aFRR-. Avizované zrychlení času do plné aktivace na 5 minut již však může být pro některé kotle, v závislosti na jejich konkrétních parametrech, obtížně dosažitelné se zachováním současné poskytované zálohy bez implementace určitých opatření. Pokud by v budoucnu následovalo další zkracování intervalu pro tuto službu, prakticky všechny současné elektrokotle by již musely implementovat určitá opatření, pokud by měly tyto jednotky aFRR- dále poskytovat.

Certifikační test pro tuto službu sestává z testovacího signálu (na Obr. 3.5), který sestává ze série skokových změn, které střídají úrovně 100, 70, 30 a 0 % z certifikovaného rozsahu regulační kapacity. Testovaná jednotka musí nejpozději do požadovaného intervalu do plné aktivace (FAT) zrealizovat celou zadanou změnu a poté držet ustálený výkon po stanovenou dobu ustálení t_u . Dobu pro ustálení t_u je stanovena pevně pro každou ze skokových změn a uvedena v Tab. 3.2. Interval mezi jednotlivými žádanými skokovými změnami je označován t_{pr} a je součtem t_p a t_u dle zmíněné tabulky. [12]



Obr. 3.5: Průběh testovacího signálu aFRR [12]

Velikost skoku	Počet skoků	t_p	t_u
30 % aFRR _i	6	$\frac{0,3aFRR_i}{C_{aFRR}} \leq 7,5 \text{ min}$	2 min
70 % aFRR _i	4	$\frac{0,7aFRR_i}{C_{aFRR}} \leq 7,5 \text{ min}$	3 min
100 % aFRR _i	5	$\frac{aFRR_i}{C_{aFRR}} \leq 7,5 \text{ min}$	5 min

Tab. 3.2: Parametry testovacího signálu služby aFRR [12]

Certifikovaná kapacita odpovídá výkonu, který dokáže jednotka změnit za určený čas FAT , tedy 7,5 min, resp. po zavedení oznámeného zrychlení 5 min. Předepsaná dostupná rychlost zatěžování c_{aFRR} jednotky je:

$$c_{aFRR} \geq \frac{aFRR_i}{FAT} [MW/min] \quad (2)$$

kde $aFRR_i$ je velikost poskytované regulační zálohy v [MW] a FAT je předepsaný maximální čas do plné aktivace – nyní 7,5 min, nejpozději od prosince 2024 zkrácený na 5 min. [12]

Například pro elektrokotel o příkonu 25 MW tak požadovaná rychlost zatěžování činí 3,4 MW/min a po urychlení to bude 5 MW/min. V případě celoplněných elektrokotlů vychází ze simulací v modelu z kapitoly 5 dosažitelná hodnota rychlosti zatěžování okolo 6 MW/min pro scénáře, kde není limitující rychlost pohonu regulačních štítů.

Výše popsany postup certifikace nepřináší elektrokotlům problém, neboť požadovaná rychlost změny výkonu je i s pomalejšími pohony štítů dosažitelná a při požadavku skokové změny na 0 % výkonu celoplněného elektrokotle je snížen příkon pomocí zasunutí štítů a poté je zcela odstaven. U poloplněného elektrokotle dojde ke snížení hladiny ve vnitřní nádrži a poté k úplnému vypuštění. Komplikace pro oba typy elektrokotlů by vyvstaly, pokud by testovací signál vyžadoval např. snížení a stabilizaci příkonu na velmi nízké úrovni kolem 0,5-2 % celkové kapacity. Příkladem může být certifikační předpis blízké evropské země – při certifikaci elektrokotlů v Maďarsku je již dnes vyžadována výkonová hladina 1 %, která je pro elektrokotle pouze obtížně splnitelná, a to jen za přesné souhry příhodných podmínek a okolností při certifikaci. Zavedení tohoto požadavku by tak výrazně zkomplikovalo či přímo znemožnilo poskytování této podpůrné služby na stand-alone elektrokotlích. [32]

3.3.1.3. Služba mFRR₅

Služba mFRR₅ je v současnosti symetrickou službou, tzn. jednotky poskytující tuto službu musí být schopny elektrickou energii jak dodávat, tak spotřebovat. Elektrokotle jsou pochopitelně pouze elektrickým spotřebičem, tudíž v současné době by bylo možné nasazení elektrokotle pro tuto službu jen v rámci agregačního bloku s jiným zařízením, např. s kogenerační jednotkou či bateriovým úložištěm.

V případě, že by v budoucnu v souladu s trendem došlo k rozdělení služby mFRR₅ na kladnou a zápornou, jako tomu bylo v případě aFRR, tak by nová záporná varianta mFRR₅ byla pro elektrokotle novou možnou aplikací, ve které by mohly zabírat významné postavení. To ovšem bude platit pouze za předpokladu, že elektrokotle dokážou bezpečně zvládat studené starty s požadovaným trendem do stanoveného zkráceného času.

4. Technické limity elektrokotlů a možná opatření

4.1. Výstup teoretické části

V předcházejících kapitolách práce byly představeny různé konstrukční typy elektrokotlů, princip jejich funkce a regulace a z toho vyplývající vlastnosti těchto zařízení. Dále byla představena Kodex přenosové soustavy, jakožto předpisový rámec definující pravidla poskytování podpůrných služeb. Byly uvedeny změny těchto pravidel, a to jak aktuální, nabývající účinnosti v roce 2022, tak i budoucí, jejichž předběžnou náplň lze predikovat na několik let dopředu např. na základě prezentací zástupců ČEPS, a.s. na konferencích. Výhled na tyto budoucí změny na jednu stranu predikoval budoucí zpřísnování požadavků až na hranu současných technických možností elektrokotlů, ovšem na stranu druhou také avizuje určité změny pravidel, které lze z pohledu využití elektrokotlů vnímat jako perspektivní příležitosti.

Práce rovněž popsala předepsaný proces certifikace zařízení pro poskytování služeb výkonové rovnováhy relevantních v případě elektrokotlů, a to poskytování záloh pro regulaci výkonové rovnováhy s manuální aktivací (mFRR_{12,5}-) a záloh pro regulaci výkonové rovnováhy s automatickou aktivací (aFRR-). Důraz byl přitom kladen na kritické body certifikace, tedy podmínky a požadavky, které se blíží či překračují současné technické možnosti elektrokotlů.

Teoretická část tak ukázala, že pro v ČR dominantní typy elektrokotlů, celoplněné a poloplněné elektrodové kotle, existuje možné využití pro poskytování služeb výkonové rovnováhy, jmenovitě mFRR_{12,5}- a aFRR-, pro které jsou tato zařízení v současné době v ČR využívána, přičemž ale budoucí změny pravidel pro poskytování těchto služeb mohou přinést významné komplikace pro certifikaci elektrokotlů pro tyto služby, kvůli současným technickým možnostem elektrokotlů. Následující kapitoly se proto zabývají specifikováním limitujících vlastností a návrhem možných opatření pro celoplněné a poloplněné elektrokotle, aby bylo možné tato zařízení nadále využívat pro služby výkonové rovnováhy i po zavedení dalších změn v jejich poskytování.

4.2. Technické limity a porovnání jednotlivých druhů elektrokotlů

Dřívější kapitoly (zejména 2 a 3.3.1) již postupně zmiňují technické limitace jednotlivých druhů elektrokotlů. Tato podkapitola sumarizuje identifikované limity ve vztahu k poskytování SVR jako počáteční krok při návrhu možných opatření k posunutí těchto limitů.

- 1) Důležitým parametrem každé jednotky poskytující SVR je rychlost výkonové odezvy na zadanou hodnotu. Elektrokotle po najetí na provozní parametry mohou dosahovat dobrých dynamických vlastností. Rychlost výkonové odezvy u celoplněného elektrokotle závisí na rychlosti pohonu regulačních štítů. Rychlost reakce poloplněného elektrokotle směrem ke zvýšení příkonu závisí na maximálním průtoku oběhového čerpadla s teoretickým limitem při dosažení nadměrně velkého vlnění hladiny ve vnitřní nádrži. Rychlost výkonové odezvy poloplněného elektrokotle směrem ke snížení příkonu závisí na maximálním možném průtoku skrze regulační klapku ve dně vnitřní nádoby a na rychlosti jejího pohonu.

Dle dostupných informací umožňují poloplněné elektrokotle přibližně třikrát rychlejší změnu výkonu oproti celoplněným kotlům s tradičním druhem pohonu regulačních štítů.

- 2) Druhým aspektem, který může být limitující při nasazení elektrokotlů pro podpůrné služby je doba studeného startu. Pohotovostní režim v teplém stavu generuje náklady, tedy provozovatelné preferují elektrokotle ve studeném režimu. Doba nájezdu elektrodového elektrokotle na jmenovitý výkon záleží na jeho počáteční teplotě, která ovlivňuje konduktivitu vody a tím dosažitelný příkon. Elektrokotel pro služby výkonové rovnováhy, zejména mFRR_{12,5}-, při aktivaci najíždí z plně odstaveného stavu a o počáteční teplotě v kotli (a tím rychle dosažitelném příkonu) rozhoduje prodleva od poslední aktivace. Elektrokotel o teplotě vody blízké teplotě okolí si vyžádá podstatně více času pro dosažení jmenovitého příkonu než elektrokotel o teplotě blízké provoznímu stavu. Tato vlastnost je shodná pro všechny typy elektrodových kotlů, jen je u parních elektrokotlů v praxi téměř eliminovaná z důvodu udržování kotlů v režimu permanentní připravenosti na pohotovostní teplotě hlavně kvůli nedosažitelnosti plného výkonu v rozumném časovém intervalu a nutnosti inertizace prostoru nad hladinou vody v kotli parou.
- 3) Rešerše možností a vlastností elektrokotlů ukázala, že shodně všechny typy v ČR instalovaných elektrokotlů nelze stabilně provozovat při velmi nízkých poměrných výkonech v intervalu (0; 2) % jmenovitého výkonu. Rozdíl mezi dvěma horkovodními typy spočívá v možnosti poloplněného kotle dosáhnout nulového příkonu ve standby režimu, zatím celoplněný elektrokotel je nutné k dosažení nulového příkonu odpojit stykačem. Prakticky však oba typy neumožňují stabilizovat zmíněný nízký výkon a mezi čistě nulovým a minimálním stabilním výkonem vykážou skok. Současné podmínky českého PPS sice nekladou na minimální stabilní výkon velké požadavky, nicméně případné budoucí změny a zavedení prokazování takto nízkého výkonu by to přineslo značné komplikace pro poskytování SVR aFRR- na elektrokotlích.

4.3. Návrh opatření k posunutí identifikovaných limitů

Tato podkapitola navazuje na předcházející kapitoly 2 a 4.2 a navrhuje možná řešení k posunutí dříve identifikovaných limitů elektrokotlů vzhledem k poskytování SVR. Proveditelnost opatření je diskutována a vybraná opatření, vyhodnocená jako potenciálně realizovatelná, jsou simulována pomocí modelu popsáném v kapitole 5.

Výkon elektrodového elektrokotle lze teoreticky v principu regulovat skrze několik veličin ovlivňujících elektrický odpor vody v elektrokotli: [40]

- 1) Vodivost vody – Vodivost vody je charakterizována konduktivitou. Konduktivita vody v elektrokotlích je udržována ve výrobcem předepsaném rozmezí, přičemž regulace je samozřejmě možná, nicméně poměrně pomalá. Konduktivita vody závisí kromě chemického obsahu také na teplotě – s rostoucí teplotou konduktivita vody lineárně roste. Jmenovitého příkonu elektrokotle nelze zpravidla dosáhnout za studeného stavu, kdy je konduktivita nízká. Více v kapitole 2.4.

- 2) Aktivní plocha povrchu fázových elektrod – U poloplňených horkovodních a ponorných parních kotlů znamená tento princip změnu výšky hladiny ve vnitřní nádrži a tím změnu omočeného povrchu elektrod. U celoplňených horkovodních elektrokotlů jde o změnu polohy stínících štítů a tím ovlivnění nezastíněné aktivní plochy elektrod.
- 3) Vzdálenost fázové a nulové elektrody – V praxi je tato hodnota vždy konstantní a daná fyzickými rozměry komponent elektrokotle.

Na základě těchto principů bylo možné navrhnout opatření k posunutí identifikovaných limitů.

4.3.1. Opatření pro celoplňené elektrokotle

1) Rychlost regulace v provozním stavu

a. Rychlejší pohon regulačních štítů (s frekvenčním měničem):

Rychlost výkonové odezvy celoplňeného elektrokotle najetého na provozní teplotě závisí čistě na rychlosti pohonu regulačních štítů. Pokud u konkrétního elektrokotle vyvstává potřeba zrychlit tuto odezvu, potom lze instalovat rychlejší pohon, preferovaně osazený frekvenčním měničem, aby byla zvýšena rychlost pohybu štítů a zároveň zachována přesnost nastavení jejich polohy – tedy vícerychlostní pohon.

2) Doba studeného startu

a. Zamezení odběru tepla do sekundárního okruhu

Nejzákladnějším opatřením pro zrychlení studeného startu představuje zamezení odběru tepla z primárního okruhu elektrokotle, dokud teplota vody primárního okruhu nedosahuje úrovně garantující dobrou konduktivitu. Toto je do určité míry na praktických elektrokotlích již realizováno, neboť čerpadlo sekundárního okruhu spouští až když je ve výměníku dostatečný teplotní spád pro ohřev vody z vratné větve horkovodu. Odběr tepla je tedy zhruba do teploty 80 °C v primárním okruhu značně omezený.

Toto opatření lze rozšířit posunutím nastavené teplotní hranice pro spuštění čerpadla sekundárního okruhu na vyšší teplotu a nebo lze v primárním okruhu instalovat bypass tepelného výměníku, tím zamezit výměně tepla a navíc snížit cirkulující objem vody primárního okruhu, která musí být v počátku nahřívána.

Konkrétní přípustná koncepce se však může lišit v každém konkrétním případě dle lokálních podmínek. Zapojení každého elektrokotle do topného okruhu je individuální.

b. Omezení průtoku oběhového čerpadla primárního okruhu

Toto opatření cílí na urychlení růstu výkonu v první fázi nájezdu tím, že se snaží vodu již ohřátou průchodem elektrického proudu v průtočných kanálech podél elektrod v těchto kanálech udržet co nejdéle, a tím zvýšit konduktivitu a výkon, ačkoliv zbytek vody v kotli má nižší teplotu.

V extrémním případě by to znamenalo v první fázi nájezdu ponechat čerpadlo primárního okruhu odstavené, nicméně tím by hrozilo lokální přehřátí a poškození materiálu regulačních štítů, dále by došlo ke zkreslení informací z teploměrů, které jsou umístěné mimo nádobu před a za ELK a rovněž by odstavení čerpadla bylo v rozporu s pokynem výrobce. V případě vývinu páry v horkovodním kotli vlivem lokálního přehřátí hrozí nesymetrie odběru proudu na jednotlivých fázích a tím negativní ovlivnění sítě, kam je elektrokotel připojen.

To je pochopitelně nežádoucí stav a není tedy možné čerpadlo zcela odstavit, nicméně lze snížit jeho průtok na minimum pro zaručení proudění chladicí vody kolem elektrod. Minimální poměrný průtok se může lišit podle konkrétního typu, typu chlazení a velikosti čerpadla mezi 30-70 % nominálního průtoku. Podle dosažitelného minimálního průtoku se liší i míra efektivnosti tohoto opatření. V praxi je toto opatření již realizováno v kombinaci s opatřením a) výše a oběhové čerpadlo zůstává na minimálních otáčkách až do dosažení provozní teploty na výstupu z elektrokotle.

Spodní limit průtoku čerpadla je v principu určen stavem, ve kterém již není udrženo stabilní a rovnoměrné proudění ke všem elektrodám v kotli. Při tomto stavu totiž hrozí vznik popisované fázové asymetrie a nouzového odstavení kotle případně celého uzlu sítě. Hodnota minimálního stabilního průtoku není běžně u elektrokotlů známá a bylo by potřeba její experimentální praktické nalezení pro konkrétní kotel. Tento limit ale leží pod minimálním průtokem v praxi použitých čerpadel. [34]

c. Osazení doplňkového oběhového čerpadla s nižším průtokem

V případě, že aktuálně osazené oběhové čerpadlo primárního okruhu neumožňuje dostatečně nízký průtok a zároveň je potřeba značné zrychlení nájezdu, lze uvažovat o instalaci menšího paralelního oběhového čerpadla čistě za účelem nízkého nájezdového průtoku. Stále je potřeba brát na zřetel nepřekročení limitu rovnoměrného proudění k elektrodám, jak bylo popsáno výše.

d. Přednastavení regulačních štítů do nenulové pozice po odstavení

Zavedením tohoto opatření by bylo možné eliminovat omezení výkonu v počáteční fázi nájezdu způsobené pohybem regulačních štítů z plně zavřeného stavu. Toto by však znamenalo příkonový skok v řádu desítek procent hned po připojení elektrokotle k síti. Velikost příkonového skoku by navíc nebyl vždy konstantní, ale záležel by na aktuální teplotě vody v průtočném kanále elektrod, tedy přeneseně na době od poslední aktivace elektrokotle a jeho chladnutí. Teplota v tomto místě elektrokotle není měřena, a proto by byla problematická okamžitá predikce výkonového skoku. Toto opatření by tak mohlo být využitelné případně jen v případech, kdy daná SVR připouští skokovou změnu a zároveň umožňuje čas na přípravu, během které by bylo možné uvést do chodu oběhové čerpadlo, změřit teplotu na výstupu, případně upravit polohu štítů a predikovat výkonový skok podle empiricky získané závislosti.

Aspekty velmi omezené možnost použití tohoto opatření a komplikovaného procesu získání podkladů pro předpověď výkonového skoku by patrně nebyly vyváženy potenciálním přínosem takto provedeného opatření, a proto odstranění případné limitace v rychlosti pohybu štítů lépe adresuje spíše opatření e) níže.

e. Rychlejší pohon regulačních štítů (s frekvenčním měničem):

Zrychlení pohonu regulačních štítů by urychlilo zvětšení aktivní plochy elektrod v počátku nájezdu a tím zkrátilo celkovou dobu nájezdu. Opatření zároveň řeší limitaci rychlosti změny výkonu v bodě 1) výše.

Alternativně by v některých případech mohlo být realizovatelné určité zrychlení přejezdu štítů pomocí zvětšení průměru navijáku ovládacího lana. Předpokladem pro tuto změnu by byl naddimenzovaný motor (větší poloměr by znamenal větší krouticí moment) a dostatečný prostor uvnitř nádoby. Změna průměru by nemohla být výrazná kvůli poloze kladek ve víku nádoby. Přesto by i malá změna vyžádala přenastavení řízení. Je tak nepravděpodobné, že by toto opatření bylo v praxi implementováno, i když by byl k dispozici vhodný náhradní naviják.

f. Přídavný NN zdroj tepla v nádobě ELK

Dalším opatřením může být urychlení nárůstu příkonu pomocí externího zdroje tepla, a tedy rychlejším růstem teploty, než jaký umožňuje přirozený nájezd. K tomu může sloužit přídavný nízkonapěťový elektrický ohřívač s několika topnými elementy implementovaný do nádoby elektrokotle. Tento by mohl být buď aktivován společně se startem kotle a nebo by mohl být využíván pro temperování nádoby a udržování zvýšené pohotovostní teploty (podobně, jako je tomu u parních elektrokotlů).

Na trhu nejsou pro ohřev vody dostupná vysokonapěťové odporová topná tělesa, a tudíž by bylo nutné využít nízkonapěťová topná tělesa. Přičemž možnost napájení z místně dostupné NN sítě a vytvoření agregáčního bloku představuje významný posun oproti dřívějším pravidlům, která by pro stejný účel vyžadovala instalaci dedikovaného transformátoru.

Výhodou tohoto řešení je integrace v jednom zařízení, nevýhodou je nemožnost retrofit instalace a omezená velikost instalovaného přitápění, která se bude lišit podle rozměru nádoby, ale bude omezena řádově na nižší stovky kilowatt. Vysokonapěťové

g. Přídavný NN zdroj tepla průtočný před vstupem do ELK

Principem analogickým opatřením k předchozímu bodu je průtočný externí zdroj tepla implementovaný před vstup elektrokotle do větve primárního okruhu. Podobné by byly i možné scénáře provozu. Výhodou tohoto provedení oproti řešení implementovanému do nádoby je možnost retrofit aplikace, instalace většího výkonu bez omezení prostorem v nádobě a dále možná vyšší přímý efekt na teplotu v kanále elektrod, vzhledem k poloze přímo na trase rozvodu vody k elektrodám. Nevýhody spočívají ve větších předpokládaných nárocích na instalaci, očekávané vyšší ceně a větší prostorové náročnosti v prostoru kotelny.

h. Přídavný zdroj tepla skrze výměník

Třetí možností přitápění do nádoby elektrokotle a zároveň principiální alternativou k elektrickému přitápění je ohřev vody primárního okruhu pomocí tepelného výměníku a sekundárního okruhu v reverzním chodu. Toto opatření by využilo tepelný výměník elektrokotle jako spotřebič v horkovodu CZT. Docházelo by k odběru vody z topné větve horkovodu a návratu ochlazené vody do vratné větve horkovodu. Obvykle je provoz na sekundární straně výměníku však opačný (odběr vody z vratné větve) a proto by bylo potřeba doplnit potrubní větev na sekundární straně tak, aby bylo umožněn popsáný reverzní chod výměníku. Výhodou může být možnost retrofitu přitápění i v případech, kde by nebyla možnost instalovat elektrické přitápění, např. z důvodu prostorových nebo kapacitních omezení na hladině NN. Nevýhodou je omezený teplotní spád, nutnost přidat potrubní větev na sekundární straně a nemožnost využít přitápění k řízení minimálního výkonu, viz bod 3c) níže.

i. Snížený objem vody v primárním okruhu ELK

Nádoba a primární okruh elektrokotle dnes mají objem řádově v nižších desítkách metrů krychlových, což přináší velkou tepelnou kapacitu zařízení, která má negativní vliv na rychlost startu při studeném startu s teplotou v kotli blízkou teplotě okolí. Snížení objemu vody v elektrokotli by zmenšilo tuto tepelnou setrvačnost a zlepšilo dynamickou odezvu kotle. Zmenšení objemu by mohlo být realizováno i retrofitem implementací objemových výplní do zbytkového objemu elektrokotle (tedy prostoru, ve kterém v kotli neprobíhá žádný proces ani pohyb mechanických částí) a u nových kotlů by bylo možné místo rozváděcí komory instalovat roztrojené rozváděcí potrubí.

Redukce objemu v jiném oddílu elektrokotle než ve zbytkovém objemu, např. pomocí změny velikosti průtočných kanálů či elektrod, již představuje možný vážný zásah do fungování elektrokotle a měla by být ponechána na uvážení výrobce elektrokotle.

j. Dynamická chemizace vody

Teoreticky by bylo možné počáteční příkon kotle při nájezdu zvýšit pomocí chemizace vody za účelem dočasného zvýšení konduktivity vody s odkalením a naředěním vody v pozdější fázi nájezdu implementací systému robustněji dimenzovaného dávkování, odkalování a úpravy vody. Taková metoda regulace by si vyžádala nepřiměřeně velké hospodářství surové vody a představovala by značné ztráty vody i chemikálií. Úpravu vodivosti tak není prakticky možné použít pro regulaci výkonu elektrodových kotlů a toto opatření nelze vzhledem k výše zmíněným aspektům a z toho vyplývajícím vysoké nákladnosti označit za smysluplné.

3) Minimální výkon

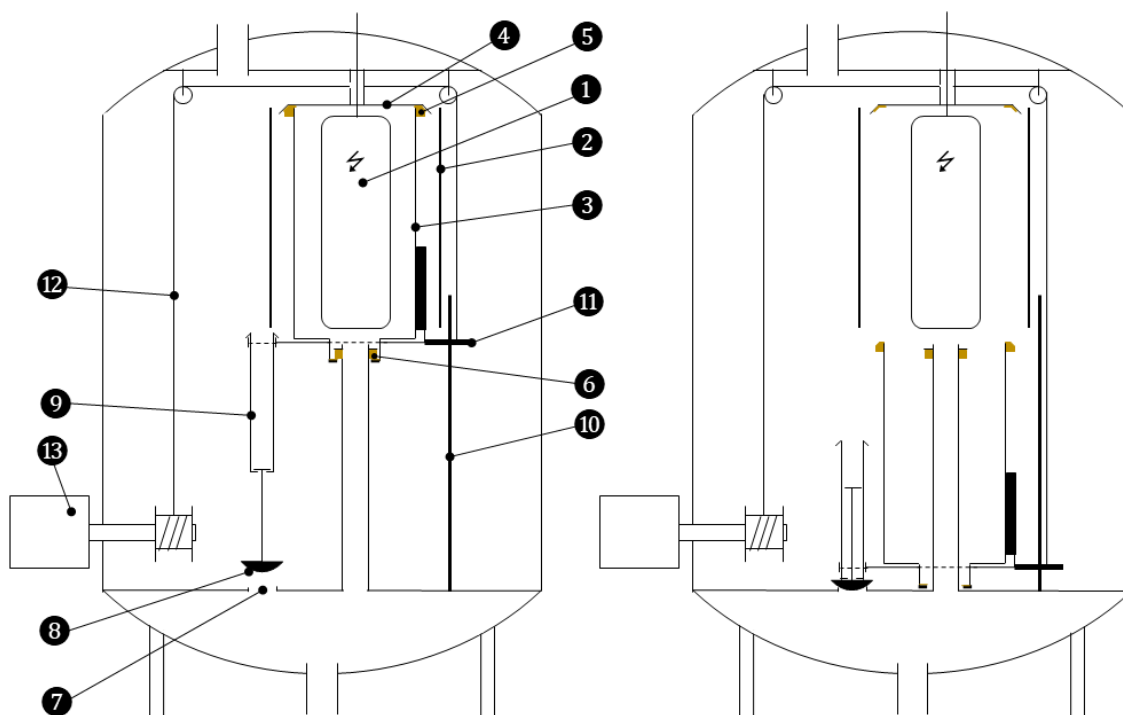
a. Bypass kanálu elektrod a plně dosedající štíty

Minimální výkon celoplněného ELK není ani při plném zakrytí elektrod nulový z důvodu zbytkového parazitního proudu procházejícího mezerou mezi hlavním regulačním a vrchním uzavíracím štítem a případně mezi hlavním regulačním a

spodním uzavíracím štítem (pokud je tento instalován), viz podbarvená místa s vyšší proudovou hustotou na Obr. 2.2. Na obrázku je vidět, že i po úpravě štítů, pořád není elektrokotel spojitě regulovatelný až k nulovému příkonu. To je způsobeno mezerou, která musí zůstat mezi štíty ze dvou důvodů. Zaprvé kvůli zachování průtoku vody v kotli a zadruhé kvůli riziku zaklesnutí či slepení plastových štítů do sebe. Aby bylo možné se více přiblížit nulovému příkonu, bylo navrženo opatření, které inkriminované štěrbinu eliminuje.

Navržené opatření je schematicky znázorněno na Obr. 4.1 a spočívá v úpravě konstrukce vrchního uzavíracího a hlavního regulačního štítu tak, aby tyto mohly plně dosednout jeden na druhý. Aby bylo umožněno dosednutí bez rizika slepení či zaklesnutí, štíty mohou být opatřeny dosedacími sedly z nevodivého, tepelně stabilního materiálu, například z keramiky nebo z teflonu. To dovolí plně uzavřít štěrbinu mezi vrchním a hlavním štítem.

hlavní části jsou označeny čísly: 1-fázová elektroda; 2-nulová elektroda; 3-hlavní regulační štít; 4-vrchní uzavírací štít; 5-dosedací sedlo na rozhraní hlavního a vrchního štítu; 6- dosedací sedlo na rozhraní hlavního a spodního štítu; 7-otvor bypassu elektrodového kanálu; 8-uzávěr bypassu elektrodového kanálu; 9-teleskopický vodící mechanismus otevírání bypassu spojený táhlem s 11; 10-vodící pojezd mechanismu zvedání štítů; 11-nosný věnec regulačních štítů; 12-ocelové lano pro pohyb štítů; 13-pohon štítů (skutečný elektrokotel obsahuje části 1-6 tolikrát, kolik je instalováno fázových elektrod)



Obr. 4.1: Konceptní schéma návrhu: Bypass kanálu elektrod a plně dosedající štíty.

Spodní uzavírací štít může být zcela eliminován a nahrazen hlavním regulačním štítem složitějšího tvaru (toto řešení by bylo provozně výhodné), čímž vznikne nové rozhraní mezi hlavním regulačním štítem a rozváděcí trubkou, které má menší

průměr a tím pádem menší délku mezery než původní řešení. Toto rozhraní je navíc také opatřeno dosedacím rozhraním v podobě na sebe dosedajících nákrůžků, takže i spodní štěrbinu je zcela uzavřena.

Druhou variantou je zachování spodního uzavíracího štítu a implementace dosedacího sedla na větším průměru spodního štítu místo rozváděcí trubky, jinak funkčně analogicky k předchozí variantě, a tedy ve výsledku s uzavřením spodní štěrbin.

Samotné uzavření štěrbin by nepřineslo funkční benefit, neboť by prakticky došlo k úplnému uzavření průtoku vody elektrokotlem a mohlo by dojít k nežádoucím stavům vlivem pokračujícího chodu oběhového čerpadla. Proto je součástí opatření i bypass kanálů podél elektrod, který bude standardně uzavřený a elektrokotel tedy může fungovat jako obvykle. Když se však hlavní regulační štít přiblíží k dosednutí, tak se bypass otevře, neboť je jednoduchým mechanismem spřažen s nosným věncem regulačních štítů, a tedy nevyžadá přidaný akční element.

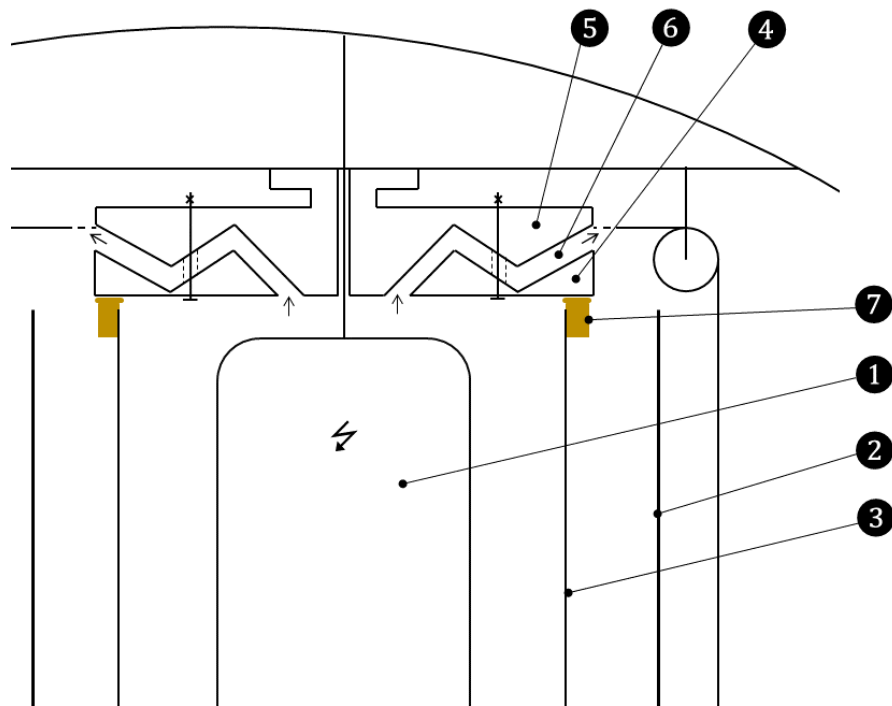
Očekávanou výhodou tohoto opatření je snížení minimálního příkonu blízko k 0 % nominální hodnoty. Navíc by měl být, alespoň v některých elektrokotlích umožněn retrofit tohoto opatření. Za nevýhodu může být považováno zkomplikování vnitřní konstrukce v elektrokotli, včetně celkově o něco vyšších nároků na přesnost výroby regulačních štítů a dosedacích rozhraní.

Skutečná funkčnost tohoto opatření a ověření, že nedochází k přehřívání vnitřního objemu zbývajícím parazitním proudem v poloze zcela uzavřeného průtočného kanálu, včetně případného stanovení maximální doby provozu v této poloze, vyžaduje podrobnější návrh a testování na konkrétním elektrokotli.

Detailnější návrh a stanovení přesného konstrukčního provedení tohoto opatření vyžaduje přímou spolupráci s konkrétním výrobcem elektrokotlů pro konkrétní model elektrokotle a stojí mimo náplň této práce.

b. Labyrintová konstrukce vrchního štítu a plně dosedající štítů

Další, alternativní varianta ke snížení minimálního výkonu pomocí úpravy konstrukce štítů využívá princip dosedání a uzavírání štěrbin, stejně jako varianta 3a) výše. Rozdíl je v tom, že zde není uplatněn bypass kanálu elektrod k umožnění průtoku vody, ale je místo toho implementován složitější vrchní uzavírací štít složený ze dvou kusů, který má v sobě složitější průtočný kanál, kterým po dosednutí regulačních štítů začne protékat voda. Toto řešení umožní realizovat komplexní průtočný kanál bez nutnosti dělat stejně komplexní štěrbinové rozhraní mezi regulačním a vrchním štítem, což by mohlo uspořit prostor a náklady na výrobu. Schéma tohoto konstrukčního řešení úpravy štítů je na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Konceptní schéma návrhu:

Labyrintová konstrukce vrchního štítu a plně dosedající štítu

Části: 1-fázová elektroda; 2-nulová elektroda; 3-hlavní regulační štít; 4- spodní díl vrchního regulačního štítu; 5-horní díl vrchního regulačního štítu; 6-průtočný kanál vrchního štítu; 7-dosedací sedlo rozhraní regulačního a vrchního štítu (skutečný elektrokotel obsahuje všechny části tolik, kolik je instalováno fázových elektrod)

Očekávaná výhoda je snížení minimálního stabilního výkonu pod současně dosažitelnou mez a zároveň menší zesložitení mechanismu uvnitř elektrokotle (oproti variantě 3a). Nevýhodou je složitá konstrukce vrchního štítu, který nejspíš bude muset být řešen jako skládaný vícedílný a jeho výrobní náklady budou vyšší než u současných vrchních štítů.

Rovněž i toto opatření by pro detailnější návrh a specifikaci přesné konstrukce vyžádalo přímou spolupráci s konkrétním výrobcem elektrokotlů, což není náplní této práce.

c. Aplikace NN přitápění certifikovaného do AB

Třetí možné opatření cílí na snížení minimálního výkonu jednotky poskytující SVR počítá s implementací přídavného elektrického ohřívače napájeného z hladiny nízkého napětí a certifikací tohoto přídavného ohřívače do agregáčního bloku společně se stávajícím elektrokotlem.

Příkon odporových elektrokotlů je dostupný v plné výši již za studeného stavu a přídavný výkon již řádově od sta kilowatt složený z regulačních elementů po 20-50 kW by dokázal dostatečně citlivě pokrýt i velmi náročné požadavky na minimální příkon agregáčního bloku. Vzhledem k nízkému přidanému NN výkonu lze toto opatření implementovat u nových elektrokotlů přímo do nádoby a nebo i mimo ni do trasy primárního okruhu, viz opatření 2g).

Budoucí změny Kodexu budou působit ve prospěch tohoto opatření, neboť je v plánu rozšíření poskytování SVR z hladiny NN, možnost modulárních agregačních bloků bez nutnosti recertifikace a rovněž možnost typových certifikací pro jeden model zařízení. Tyto budoucí změny mohou budoucí implementaci tohoto opatření výrazně usnadnit.

Výhodou je dosažení dvou benefitů v jednom opatření, neboť realizace tohoto opatření by znamenala zároveň implementaci opatření 2f) nebo 2g) vedoucích ke zvýšení rychlosti studeného startu. Další výhodou je možnost navýšit poskytovanou zálohu v případě dostatečné kapacity na straně odběru tepla a za předpokladu dostatečně velkého výkonu NN přitápění.

Nevýhodou jsou vyšší investiční náklady na opatření, zvýšená náročnost řízení agregačního bloku a další nevýhody plynoucí z možnosti retrofitu či z prostorových nároků – podrobněji viz opatření 2f) a 2g).

d. Snížení konduktivity vody

Toto opatření je založeno na úvaze, že existuje větší počet snáze realizovatelných opatření pro zvýšení rychlosti studeného startu, než kolik je možných opatření pro snížení minimálního výkonu. Rychlost nájezdu a minimální výkon jsou z hlediska ideální konduktivity protichůdné jevy, jak bylo popsáno dříve. Implementace některého z opatření pro zrychlení studeného startu by umožnila snížit minimální příkon pomocí snížení konduktivity vody (pokud by při snížení bez opatření k urychlení nájezdu již doba nájezdu nevyhovovala). Jedná se o relativně jednoduchou možnost, která ale není schopna odstranit problém úplně, pouze zmírnit. Rovněž zůstane přítomen rozdíl mezi minimálním výkonem za studeného a za teplého stavu.

4.3.2. Opatření pro poloplněné elektrokotle

1) Doba studeného startu

Poloplněné kotle dle údajů výrobce disponují bezpečně dostatečnou rychlostí změny výkonu za provozní teploty, neboť oběhové čerpadlo bývá dostatečně dimenzováno pro poskytování SVR. Rychlost příkonu výkonu poloplněného elektrokotle závisí na možném průtoku oběhového čerpadla a na velikosti a rychlosti regulační klapky ve dně vnitřní nádrže.

2) Doba studeného startu

Možná opatření pro zrychlení studeného startu jsou u poloplněných elektrokotlů z většiny analogická jako pro celoplněné kotle. Přenést lze opatření 2a), 2b), 2c), 2f), 2g), 2h) a 2i) navržená v předchozí podkapitole. Navíc lze doplnit jedno opatření:

a. Příprava regulační klapky do uzavřené pozice po odstavení

Pokud rychlost pohonu regulační klapky ve dně vnitřní nádrže není dostatečná, lze urychlit plnění vnitřní nádoby po startu přednastavením regulační klapky do uzavřené pozice již po odstavení po předcházející aktivaci.

3) Minimální výkon

Ačkoliv by teoreticky poloplněné elektrokotle mohly umožňovat spojitou regulaci i v oblastech velmi nízkého výkonu, tak praktická velikost plochy a tvar elektrod zapříčiní příkonový skok během prvního omočení povrchu elektrod. Možná opatření obsahují možnost NN zdroje certifikovaném v agregačním bloku jako v případě opatření 3c) u celoplněného kotle a rovněž lze doplnit jedno přídatné opatření:

a. Úprava konstrukce pro postupnější omočení elektrod

Toto opatření spočívá v rozdělení fázových elektrod na různě dlouhé válcové úseky u každé fázové elektrody, navíc s úpravou tvaru spodní plochy u každého z úseků do sešikmeného („seříznutého“) tvaru, který díky vzniku ostré sešikmené hrany omezuje efekt náhlého kontaktu velké plochy se stoupající hladinou.

Toto opatření je do určité míry již v praxi aplikováno, a i přes to pořád není otázka velmi nízkého minimálního výkonu uspokojivě vyřešena. Nežádoucím efektem během kritického momentu smočení prvního úseku fázových elektrod nejspíš hraje i vlnění hladiny ve vnitřní nádrži. Nejefektivnějším opatřením se tak v případě poloplněných elektrokotlů jeví varianta s přídatným NN přitápěním, viz opatření 3c v předcházející podkapitole.

5. Modelování vlivu implementovaných opatření u celoplněného elektrokotle

5.1. Zvolený postup řešení

Výše navržená opatření různým způsobem adresují identifikované limity celoplněných a poloplněných elektrokotlů za účelem jejich posunutí, a tedy s cílem umožnit poskytování služeb výkonové rovnováhy na elektrokotlích i po zavedení zpřísnujících podmínek v budoucích letech. Rovněž byla výše diskutována proveditelnost těchto opatření a některé z návrhů byly označeny jako obtížně realizovatelné či málo smysluplné.

Následující části této práce se zabývají hodnocením možného dosažitelného přínosu vybraných realizovatelných opatření určených pro celoplněný typ elektrokotle. Celoplněný elektrokotel byl zvolen proto, protože z rešerše možností a z limitů jednotlivých typů elektrokotlů popsanych výše vyplynulo, že celoplněné elektrokotle mají aktuálně nižší limity a omezenější technické možnosti než poloplněné elektrokotle. Rovněž i zadání práce cílí více na celoplněné kotle vzhledem k možnému porovnání s reálnými daty z tohoto typu elektrokotle, což zlepšuje možnost verifikace.

Volba opatření určených k bližší analýze proběhla podle následující úvahy: Očekávaný dopad navrhovaného opatření pro zrychlení regulace při provozu na provozních parametrech je jednoznačný a očekávatelný a spočívá ve výměně pohonu regulačních štítů. Nová rychlost regulace bude odrazem rychlosti tohoto nového pohonu. Dále, některá navrhovaná opatření cílicí na snížení minimálního výkonu jsou konstrukčního typu, a tedy by pro detailnější návrh a vyhodnocení vyžadovaly úzkou spolupráci s jedním výrobcem elektrokotlů, implementaci opatření do konkrétního modelu elektrokotle a dále testování. Jedná se o činnosti značného rozsahu a doby trvání a překračují náplň této práce. Další z opatření cílicích k dosažení nižšího minimálního výkonu spočívají v implementaci menšího nízkonapětového ohřívače a jeho certifikaci do agregáčního bloku s vysokonapětovým elektrokotlem. Dopad tohoto řešení na výši minimálního výkonu je opět předpokládatelný a závisí čistě na velikosti regulačních stupňů nízkonapětového elektrokotle.

Bližší analýza ovšem pomůže vyhodnotit dopad a přínos vybraných opatření cílicích na zrychlení nájezdu elektrokotle, neboť jejich efekt závisí na širších vztazích v rámci celého systému elektrokotle a nebylo tak možné předem spolehlivě předpovědět dopad jejich implementace. Za účelem provedení této analýzy vlivu jejich implementace byl vytvořen výpočetní model popsany v následujících kapitolách, který umožňuje simulovat vliv některých v kapitole 4.3.1 popsanych opatření, a to konkrétně:

- omezení odběru tepla do sekundárního okruhu pomocí vypnutého čerpadla sekundárního okruhu,
- bypass výměníku sekundárního okruhu,
- zavedení přídavných přitápění do nádoby a
- zavedení přídavného průtočného přitápění na výstup primárního okruhu,
- vliv snížení minimálního průtoku elektrokotlem,
- vliv rychlosti pohonu regulačních štítů při nájezdu
- snížení objemu vody v elektrokotli

Záměrem při tvorbě modelu bylo vytvořit nástroj, který by v konkrétních případech elektrokotlů umožňoval navrhnout rozsah a vyhodnotit přínos zmíněných typů navrhovaných opatření přímo pro konkrétní kotel a jeho konkrétní parametry. Výstupem z modelu je časový průběh sledovaných veličin v uzlových bodech systému, z nichž vyplývá klíčový výsledný čas do plného nájezdu, tedy doba do dosažení jmenovitého příkonu elektrokotle.

Prezentovaný model byl vytvořen ve vazbě na reálná naměřená data a simuluje proces nájezdu celoplněného elektrokotle. Byla zvolena platforma Microsoft Office Excel, jakožto kombinace přehledného univerzálního prostředí a možnosti kombinovat předdefinované funkce, vlastní uživatelský kód (VBA), a knihovnu látkových vlastností (CoolProp).

5.2. Principy fungování modelu

Základním principem fungování modelu, je časové vzorkování stavů kotle. Stavem kotle je rozuměn popis sledovaných veličin v daném časovém okamžiku. Mezi sledované veličiny patří:

- teploty v uzlových bodech modelu
 - vstupní teplota z primárního okruhu do elektrokotle
 - teplota v rozváděcí nádrži
 - teplota na vstupu do kanálů podél elektrod
 - teplota na výstupu z kanálu podél elektrod
 - teplota sběrného objemu nádoby od elektrod
 - teplota zbytkového prostoru
 - výstupní teplota z elektrokotle do primárního okruhu
- poloha regulačních štítů
- průtok oběhového čerpadla
- elektrický příkon elektrokotle
- elektrický příkon NN přitápění

Model vychází ze známého počátečního stavu elektrokotle a každé dva po sobě následující stavy kotle jsou od sebe posunuty v čase o fixně stanovený časový krok (časový element). Celková doba nájezdu elektrokotle je tak sumou takovýchto časových elementů. Každému časovému elementu odpovídá určitý objemový element, tedy objem, který oběhové čerpadlo přečerpalo za daný fixní časový element. Průtok čerpadla se v čase může nezávisle měnit, a proto ani velikost jednoho objemového elementu není vždy fixní.

Postupným plynutím času nájezdu (přibýváním časových elementů) dochází k posouvání objemových elementů zavedených v dřívějších časových krocích dále do systému. Model sleduje postup jednotlivých elementů, aby bylo vždy jasné, v kterém bodě modelovaného elektrokotle je v každém stavu který objemový element a s jakou teplotou. To v určitých místech modelu vyžaduje objemové elementy přepočítat podle aktuálního průtoku oběhového čerpadla.

Bylo zavedeno následující značení a indexace, které jsou klíčové pro orientaci v modelu: Aktuální časový krok je označen i , krok předcházející je $(i-1)$, krok následující je $(i+1)$. Ukázalo se jako praktické zavést ještě index j , pro který platí $j=i-x$, kde x je neznámý počet

časových kroků. Index j má opačný kladný smysl oproti indexu i , tedy když bude například $i=j$, tak potom $i+1 = j-1$. Index j umožní snazší označení souslednosti a relativní polohy dvou sledovaných objemových elementů a jim příslušících veličin.

Souhrnně lze tedy pro daný stav elektrokotle v čase popisovat značením i časovou aktuálnost veličin, zatímco indexem j popisovat souslednost (a tím relativní polohu) veličin aktuálních v blíže nespecifikovaném dřívějším časovém kroku. Lze uvést příklad: V časovém kroku i je aktuální objemový element na výstupu z potrubí s označením V_j^i . V následujícím časovém kroku je element s tímto objemem označen jako V_{j+1}^{i-1} .

Model sleduje systémem postupující objemové elementy a jejich teploty. Objemový element známého média o známé teplotě lze chápat také jako tepelný element, tedy určité množství tepla, které objemový element přijal.

5.3. Vstupy modelu

Model vychází ze sady parametrů charakterizující nominální parametry teploty a tlaku, geometrii a objem nádoby, potrubí a elektrod, vlastnosti vody (funkční závislost konduktivity) a elektrické napětí.

Důležitá je definice počátečního stavu elektrokotle, což znamená počáteční teploty v uzlových bodech a počáteční polohu štítů, průtok čerpadla a případně vlastnosti sekundárního okruhu či příkon NN přitápění.

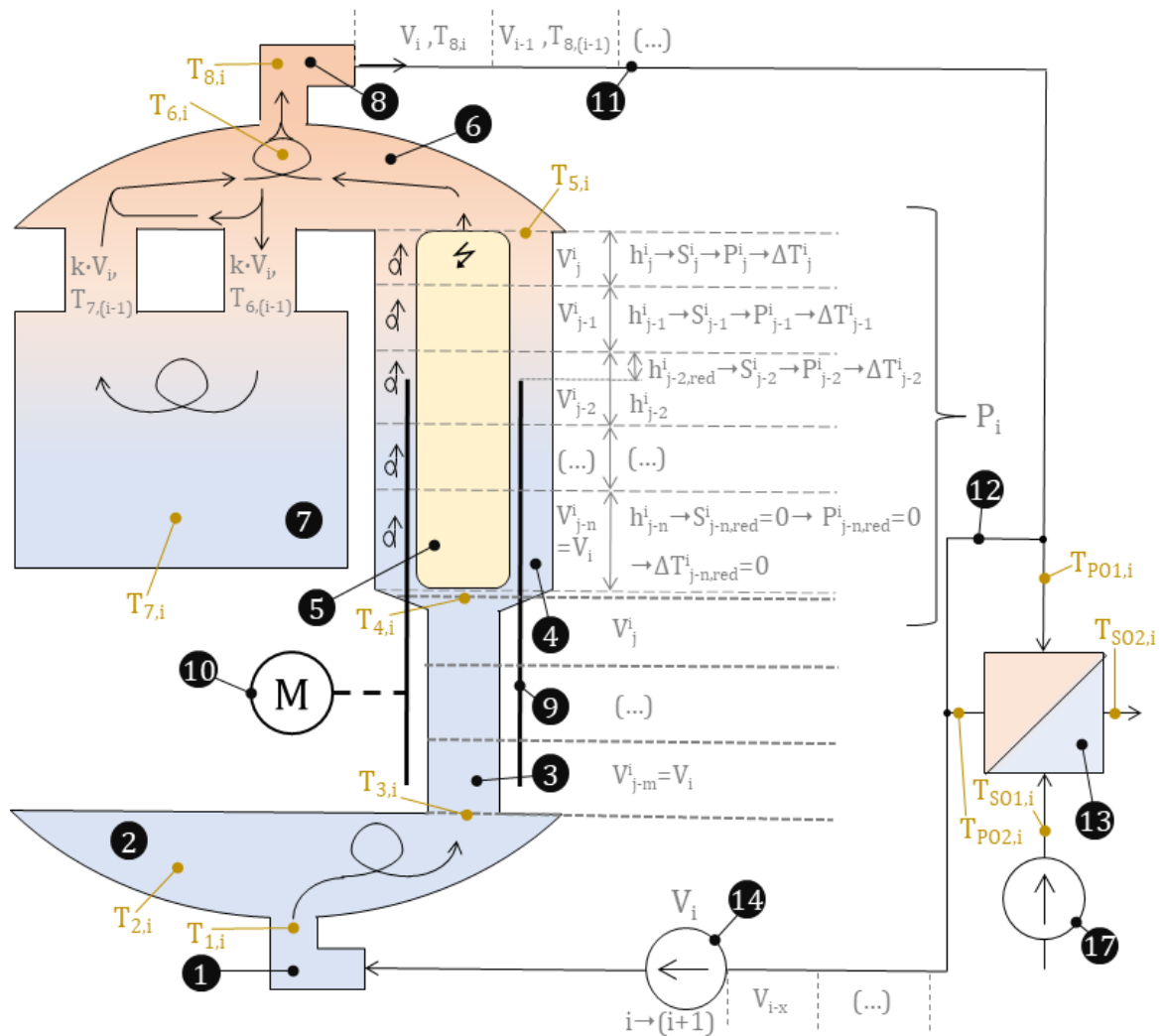
Dále model umožňuje zadat libovolnou nájezdovou charakteristiku polohy štítů, průtoku oběhového čerpadla primárního a sekundárního okruhu a NN přitápění do nádoby a průtočného přitápění.

Sumární výpis vstupních parametrů do modelu včetně vzorových hodnot je dále v kapitole 6 v Tab. 6.1. Soubor s modelem je v Příloze 2 ve formátu .xls.

5.4. Struktura a předpoklady modelu

Výpočetní model uvažuje určité zjednodušující předpoklady, přičemž je ale zachována dostatečná věrnost modelu pro zamýšlené použití, zejména díky možnosti porovnat a sladit model s daty z reálně provozovaných celoplněných elektrokotlů. Struktura prezentovaného modelu rovněž dostala kladné stanovisko od vedoucího této práce, který má s realizacemi a provozem celoplněných kotlů značné praktické zkušenosti.

Reálné komplexní procesy, které probíhají v reálném celoplněném elektrokotli, stejně jako reálné konstrukční provedení (schéma na Obr. 2.1), byly zjednodušeny do jednodušší konstrukce a na lépe popsatelnou kombinaci jednodušších procesů. Souhrnně lze princip modelu znázornit na Obr. 5.1., který znázorňuje klíčové části a komponenty modelu:



Obr. 5.1: Schéma základního výpočetního modelu nájezdu celoplněného elektrokotle 1-vstup do elektrokotle (výstup z primárního okruhu); 2-rozváděcí nádoba; 3-rozváděcí potrubí k elektrodám; 4-průtočný kanál podél elektrod; 5-fázové elektrody; 6-sběrný vrchlík tlakové nádoby; 7-zbytkový objem tlakové nádoby; 8-výstup z elektrokotle (vstup do primárního okruhu); 9-regulační štíty; 10-pohon regulačních štítů; 11-potrubí primárního okruhu; 12-bypass výměníku; 13-teplný výměník; 14-oběhové čerpadlo primárního okruhu; 17-oběhové čerpadlo sekundárního okruhu.

Model uvažuje dva základní typy prostoru, ve kterých se objemový element procházející modelem může nacházet: typ „komora“ a typ „kanál“. Specifika obou jsou popsána níže.

a) Prostor typu „komora“

Prostor typu „komora“ má jeden či více vstupů a jeden či více výstupů. Na počátku každého časového kroku do tohoto prostoru vstoupí objemový element z jednoho či více vstupů a ve stejný okamžik stejný objem z tohoto prostoru vystoupí, neboť voda je prakticky nestlačitelná. Vystupující element má takovou teplotu, jakou měl celý prostor před vstupem aktuálního objemového elementu. Poté, co nový objemový element vstoupí a odpovídající objem vystoupí, zůstane v prostoru nový objemový element o vstupní teplotě a zbytek objemu prostoru bude vyplněn vodou o původní teplotě prostoru. Následně dojde k rovnoměrnému smísení a ustálení na výsledné homogenní teplotě společné pro celý objem prostoru.

Tato výsledná teplota vstupuje do dalšího časového kroku jako teplota celé komory a proces se opakuje.

V modelu jsou tři prostory typu komora, a to spodní rozváděcí nádoba (2), sběrný vrchlík (6) a zbytkový objem (7). V těchto místech modelu je v každém kroku počítána výsledná teplota směsi podle logiky popsané výše. Níže je potom uveden vzorový postup výpočtu teploty směsi ve spodní rozváděcí nádobě.

Spodní rozváděcí nádoba je první částí nádoby elektrokotle, vstupuje do ní objemový element vystupující z primárního okruhu a vystupuje rozmíchaný element o stejném objemu, ale změněné teplotě. S počátkem časového kroku i vstupuje do rozváděcí nádoby (2) objemový element V_i odpovídající objemu vytlačenému oběhovým čerpadlem za tento časový krok. Tento element má teplotu $T_{1,i}$, která odpovídá teplotě, která byla před určitým počtem časových kroků na výstupu z kotle do primárního okruhu (pokud je zamezeno odběr tepla), anebo reflektuje příslušný odběr tepla, který v primárním okruhu objemový element odevzdal přes výměník, případně přijal při přitápění. (Tepelná ztráta potrubí primárního okruhu je zanedbána). Ve stejný okamžik je z nádoby vytlačen objemový element o shodném objemu (V_i) ale o jiné teplotě $T_{2,(i-1)} = T_{3,i}$. Následuje smíšení příchozího elementu se zbytkem vody ve spodní rozváděcí nádrži. Lze použít směšovací rovnici, kde kromě již popsaných veličin figuruje hmotnost vody v rozváděcí nádrži m_2 , hmotnost objemového elementu m_i a měrné tepelné kapacity c_p jsou funkce příslušných teplot:

$$m_i \cdot c_p(T_{1,i}) \cdot (T_{1,i} - T_{2,i}) = (m_2 - m_i) \cdot c_p(T_{2,(i-1)}) \cdot (T_{2,i} - T_{2,(i-1)}) \quad (3)$$

po dosazení součinů objemů a hustot za hmotnosti:

$$m_i = V_i \cdot \rho(T_{1,i}) \quad (4)$$

$$m_2 = V_2 \cdot \rho(T_{2,(i-1)}) \quad (5)$$

bude po vyjádření nová teplota $T_{2,i}$ ve spodní rozváděcí nádrži:

$$T_{2,i} = \frac{(V_i \cdot \rho(T_{1,i})) \cdot c_p(T_{1,i}) \cdot T_{1,i} + (V_2 \cdot \rho(T_{2,(i-1)}) - V_i \cdot \rho(T_{1,i})) \cdot c_p(T_{2,(i-1)}) \cdot T_{2,(i-1)}}{(V_i \cdot \rho(T_{1,i})) \cdot c_p(T_{1,i}) + (V_2 \cdot \rho(T_{2,(i-1)}) - V_i \cdot \rho(T_{1,i})) \cdot c_p(T_{2,(i-1)})} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

kde V_2 je objem rozváděcí nádrže, hustoty ρ jsou funkce příslušných teplot

Ostatní směšování je provedeno analogicky. Výpis vztahů použitých pro výpočty v modelu je v Příloze 1.

b) Prostor typu „kanál“

Prostor typu „kanál“ oproti typu „komora“ naopak předpokládá, že nedochází k žádnému vzájemnému směšování objemových elementů uvnitř kanálu, a že tudíž objemové elementy pouze postupně postupují kanálem a na jeho konci zase vystupují ven. Velikost objemového elementu vstupujícího do kanálu je určena aktuálním průtokem oběhového čerpadla. Stejně tak je i velikost objemového

elementu vystupujícího z kanálu dána aktuálním průtokem oběhového čerpadla. Průtok oběhového čerpadla se může různě měnit, a proto vzniká potřeba přepočítat objemové elementy zavedené do kanálu po jejich průchodu kanálem na nové objemové elementy, které budou odrážet velikost aktuálního průtoku oběhového čerpadla, a zároveň zajistí kontinuitu nastavenou v průtočném kanále z hlediska množství tepla uchovaného v obíhající vodě.

Model tohoto docílí pomocí pomocného mechanismu, který je v každém časovém kroku nájezdu schopen podle celkového přečerpaného objemu od počátku nájezdu dohledat objem a teplotu objemového elementu, který v momentě, kdy tehdejší celkový přečerpaný objem odpovídá rozdílu aktuálního celkového přečerpaného objemu mínus vnitřního objemu dotčeného kanálu. To znamená, že takto je identifikován ten objemový element, který aktuálně postoupil až k výstupu z kanálu. Když je tento výstupní objemový element větší, než jaký odpovídá aktuálnímu průtoku čerpadla, je z tohoto elementu z kanálu odebrána pouze poměrná část, které aktuální průtok reflektuje. Pokud je aktuální objemový element na výstupu z kanálu menší, než odpovídá aktuálnímu průtoku čerpadla, potom je celý tento element odebrán z kanálu a velikost zbývajících objemu k dorovnání aktuálního průtoku je porovnána s objemovým elementem následujícím po odebraném elementu. Pokud tento druhý element je větší, než kolik je potřeba na dorovnání aktuálního průtoku, tak je použita pouze jeho poměrná část. Pokud je menší, odebere se i tento element celý a přistoupí se ke třetímu elementu v řadě atd. Tímto způsobem je přepočítán a složen nový objemový element, jehož teplota vychází jako výsledná teplota ze směšovací rovnice zohledňující objemy a teploty dílčích elementů.

Model obsahuje tři části typu „kanál“. Prvním je potrubí primárního okruhu (11), druhým je rozváděcí potrubí (3) mezi spodní rozváděcí nádrží a kanálem elektrod a třetím je právě kanál podél elektrod (4). Průtočný kanál podél fázových elektrod je speciálním případem, protože se zde k výše uvedenému mechanismu přidává navíc efekt ohřevu každého objemového elementu v kanále elektrody během každého časového kroku, vlivem průchodu odpovídajícího elektrického proudu. Tento přídatný mechanismus model ošetřuje, ačkoliv to zvyšuje nároky na výpočetní výkon použitého počítače, neboť každému elementu v kanále elektrody přísluší v každém okamžiku 6 výpočetních buněk navíc. Výstupní objem a teplota z kanálu elektrody jsou ale jinak určeny shodně s výše popsaným mechanismem.

Model procesu nájezdu elektrokotle lze s důrazem na jeden objemový element popsat následovně:

Při nájezdu je systém elektrokotle plný vody o známé počáteční teplotě v uzlových bodech.

Oběhové čerpadlo začne nabíhat a čerpat vodu z primárního okruhu do tlakové nádoby elektrokotle, konkrétně do spodní rozváděcí komory. Dojde tedy v prvním časovém kroku k zavedení objemového elementu do systému o teplotě na výstupu z primárního okruhu. Tento objemový element má objem odpovídající objemu vody přečerpanému oběhovým čerpadlem v daném časovém kroku. Dojde k promíšení elementárního množství vody přivedeném v aktuálním kroku s vodou v rozváděcí nádobě a zároveň je z rozváděcí

komory vytlačeno stejné množství vody, které odpovídá čerpadlem přivedenému množství – tedy z rozváděcí nádoby vystupuje objemový element, který svým objemem také odpovídá ve stejném časovém kroku objemu vody přečerpanému oběhovým čerpadlem v daném časovém elementu.

Ze spodní komory voda teče v rozváděcím potrubí k elektrodám. Předpokládán je režim toku bez větších turbulencí, které by celé potrubí promíchávaly v axiálním směru, tedy předpokládá se nemíchání sousledných objemových elementů mezi sebou.

Z rozváděcího potrubí voda vstoupí do obtokového kanálu mezi nulovou a každou z fázových elektrod, kde s přibývajícím časem postupuje axiálně podél elektrody. Předpokládá se míšení a turbulence vody v rámci jednotlivých postupujících elementů, ale nikoliv vzájemně mezi elementy. V každém okamžiku je kanál podél celé délky fázových elektrod zaplněn objemovými elementy a každému elementu tak přísluší určitá výška v kanále. To znamená určitou aktivní plochu fázové elektrody, a tudíž určitý výkon, a tedy předané teplo za časový krok. Celkový elektrický příkon elektrokotle je potom sumou výkonů všech aktivních objemových elementů v nádobě. Některé objemové elementy se však v daném časovém kroku nemusejí podílet na generování tepla, jelikož se v kanálu elektrody pohybují regulační štíty, které regulují dostupnou aktivní plochu fázových elektrod. Model zohledňuje polohu štítů a objemové elementy v kanále podél elektrod, které jsou v aktuálním časovém kroku odstíněny pomocí regulačních štítů, nepřispívají k celkovému výkonu elektrokotle.

Objemový element určený k výstupu z kanálu podél elektrod přestupuje do pomyslného sběrného vrchlíku nádoby, kde se rovnoměrně vmíchá do jejího objemu. Tato část elektrokotle není v reálném elektrokotli nijak fyzicky oddělena od zbytku nádoby. Bylo přistoupeno k předpokladu, že tento sběrný vrchlík lze pro účely modelu pomyslně vydělit od zbytku nádoby, neboť většina plochy z jeho myšlenkové hranice navazuje na průtočné kanály podél elektrod, a pouze malé průtočné kanály u stěn nádoby propojují tento vrchlík se zbytkem objemu vody v nádobě. Propojení vrchlíku se zbytkovým objemem nádoby je modelováno pomocí toku určitého poměru k z aktuálního průtoku kotlem z vrchlíku do zbytkového objemu nádoby. Poměr k byl stanoven z porovnání s reálným elektrokotlem a konzultován s vedoucím práce. Tato část poměrem odkloněného elementárního objemu se vmíchá do zbytkového objemu, a naopak z prostoru zbytkového objemu nádoby se odpovídající poměr z elementárního objemu vmíchá zpět do sběrného vrchlíku.

Sběrný vrchlík je tak koncovou částí nádoby elektrokotle, odkud vychází objemový element do primárního okruhu s bypassem.

V každém časovém kroku probíhají všechny právě popsané procesy naráz, ovšem přirozeně v každém místě elektrokotle s individuálním elementem o individuální teplotě. Sledování průběhu procesu chronologicky krok po kroku by v závislosti na zvoleném časovém kroku i a na zadaném průtoku a funkci náběhu oběhového čerpadla zabralo řádově desítky až stovky časových kroků (přibližně 50-200 kroků pro $i=0,5$ s).

Z pohledu zapojení elektrokotle do elektrického obvodu ve vysokonapěťové třífázové síti IT model uvažuje elektrokotel jako čistě rezistivní zátěž, jejíž hodnota impedance je dána konduktivitou (tedy teplotou) vody a geometrií průtočných kanálů podél fázových

elektrod. Počet průtočných kanálů odpovídá počtu fázových elektrod. Každý z průtočných kanálů má tvar mezikruží mezi nulovou elektrodou a fázovou elektrodou, viz Obr. 5.2 a).

Elektrický odpor R homogenního tělesa lze vypočítat ze vztahu:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} [\Omega] \quad (7)$$

kde ρ je rezistivita (převrácená hodnota konduktivity σ), l je délka tělesa a S je plocha průřezu tělesa kolmá na směr elektrického proudu.

V případě objemového elementu v průtočném kanále bude rezistivita ρ zastoupena převrácenou hodnotou konduktivity, již dokážeme v každém časovém kroku stanovit ze známé teploty pomocí vztahu (1), a poté tedy pro rezistivitu objemového elementu platí:

$$\rho_j^i = \frac{1}{K_j^i \cdot \sigma_{25}} [\Omega m] \quad (8)$$

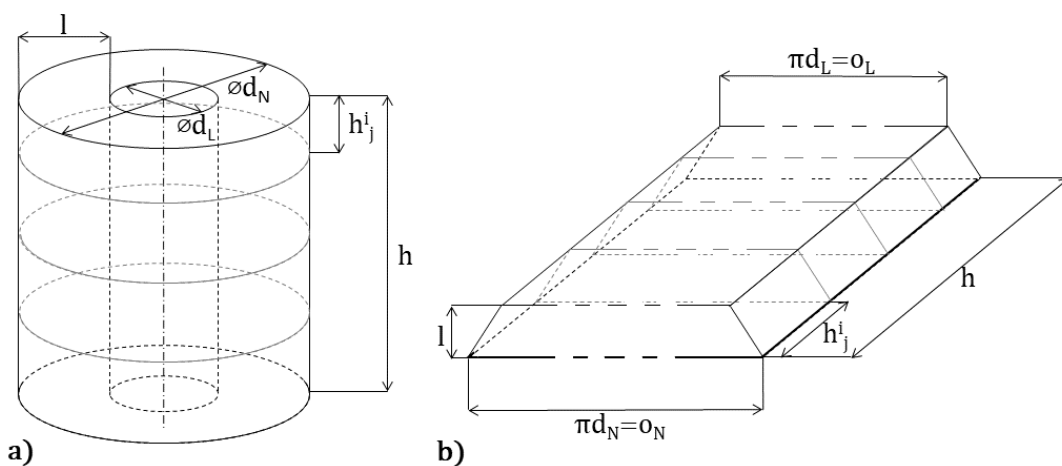
Délkový rozměr l je v případě průtočného kanálu zastoupen rozdílem poloměrů nulové a fázové elektrody.

Plocha kolmá na směr elektrického proudu je dána jako obsah plochy válce, vychází tedy z obvodu a z výšky elementu:

$$S_j^i = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_j^i [m^2] \quad (9)$$

kde r je poloměr vycházející z geometrie kanálu (viz dále) a h_j^i je výška, kterou objemový element zabírá v průtočném kanále, vypočítaná z objemu elementu V_j^i a plochy průřezu průtočných kanálů S_{3kan} jako:

$$h_j^i = \frac{V_j^i}{S_{3kan}} [m] \quad (10)$$



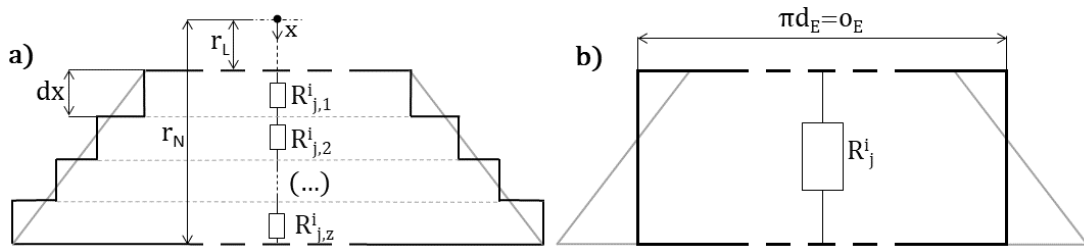
Obr. 5.2: Tvar průtočného kanálu (a) a jeho rozvinutí do roviny (b)

Uvažujeme větší počet objemových elementů v průtočném kanále. Každý z objemových elementů zabírá určitou část z celkového objemu a z celkové výšky kanálu. Každý element je považován za homogenní z hlediska teploty, což implikuje rovněž homogenitu

konduktivity. Změna vlastností vody ve směru axiálním ke kanálu elektrody je postižena dostatečně velkým počtem objemových elementů v průřezném kanále v každém časovém okamžiku.

Elektrický odpor konkrétního elementu tedy dle vztahu (7) vyplývá z jeho objemu a tedy v důsledku z šířky l kanálu a z plochy kolmé na směr průchodu proudu. Plocha průřezu ale není konstantní. Jak lze vidět z rozvinutého mezikruží na Obr. 5.2 b), změnu plochy v radiálním směru vzhledem k průřeznému kanálu nelze zanedbat. Při pohledu na řez učiněný při pohledu axiálně na rozvinutý průřezný kanál lze vliv změny kolmé plochy průřezu na elektrický odpor jednoho elementu vyjádřit jako nekonečně velký počet sériově řazených rezistorů, viz Obr. 5.3 a), z nichž každý z rezistorů má jiný elektrický odpor, který reflektuje jinou plochu průřezu. Tyto lze dle zákona o náhradě série rezistorů jedním rezistorem se shodným účinkem sečíst do jednoho náhradního rezistoru, tedy platí:

$$R_j^i = R_{j,1}^i + R_{j,2}^i + \dots + R_{j,z}^i \quad (11)$$



Obr. 5.3: Axiální řez rozvinutým mezikružím (a); nahrazení středním obvodem (b)

Tuto ideu lze vyjádřit v integrální formě jako

$$R_j^i = \int_{r_L}^{r_N} \frac{1}{K_j \cdot \sigma_{25}} \cdot \frac{dx}{2 \cdot \pi \cdot h_j^i \cdot x} \quad (12)$$

Z integrace vyplyne vztah pro náhradní odpor v radiálním směru:

$$R_j^i = \frac{1}{K_j \cdot \sigma_{25}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot h_j^i} \cdot \ln \frac{r_N}{r_L} [\Omega] \quad (13)$$

Praktičtější pro výpočty v modelu bylo dosáhnout ekvivalentního výsledku náhradou proměnné délky obvodu ekvivalentním obvodem kanálu o_E (Obr. 5.3 b) a tomu příslušícím ekvivalentním průměrem kanálu D_E , ze kterého lze snáze počítat aktivní plochu průřezu všech elementů v kanále. Pro získání předpisu pro ekvivalentní průměr D_E lze získaný vztah (13) položit do rovnosti s mírně rozepsaným obecným vztahem (7):

$$R_j^i = \frac{1}{K_j^i \cdot \sigma_{25}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot h_j^i} \cdot \ln \frac{r_N}{r_L} = \frac{1}{K_j^i \cdot \sigma_{25}} \cdot \frac{l}{S_{j,E}^i} [\Omega]; \quad (14)$$

dosadit za $S_{j,E}^i$:

$$S_{j,E}^i = \pi \cdot D_E \cdot h_j^i [m^2]; \quad (15)$$

a po úpravě a vykrácení získat hledaný vztah pro ekvivalentní průměr

$$D_E = \frac{2 \cdot l}{\ln \frac{r_N}{r_L}} [m] \quad (16)$$

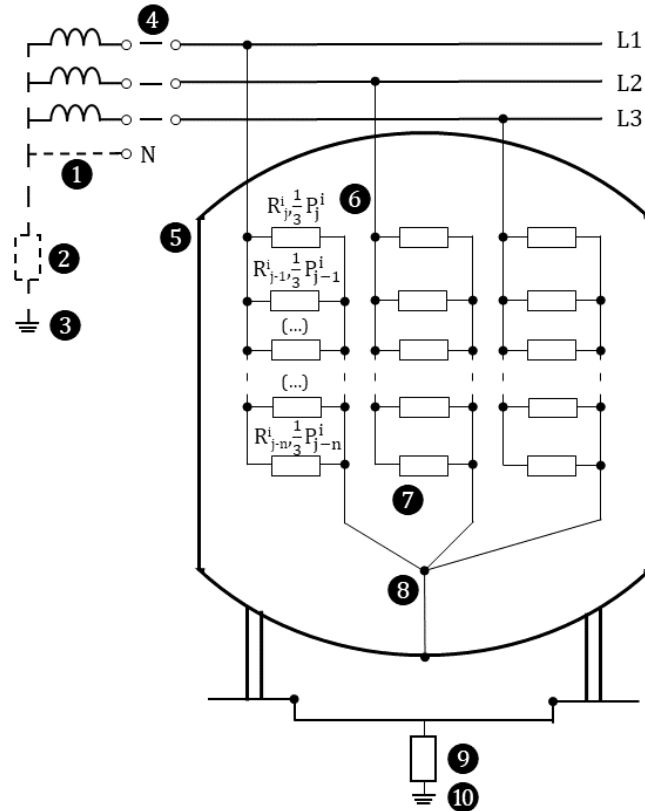
Každý objemový element v průtočném kanále elektrody je tedy ve výsledku charakterizován jednou hodnotou odporu R_j^i , danou jeho aktuální teplotou T_j^i , a nepřímo jeho objemem V_j^i , který definuje výšku h_j^i , kterou objemový element zabírá v kanále. Pro výpočet velikosti tohoto elektrického odporu elementu lze použít ekvivalentního průměru $D_{j,E}^i$ a využít vztah

$$R_j^i = \frac{1}{K_j^i \cdot \sigma_{25}} \cdot \frac{l}{\pi \cdot D_E \cdot h_j^i} [\Omega] \quad (17)$$

kde R_j^i je elektrický odpor elementu v $[\Omega]$; σ_{25} je konduktivita přepočtená na 25 °C v $[S/m]$; $K [1]$ kompenzuje hodnotu konduktivity vzhledem k teplotě elementu, dle závislosti (1) v kapitole 2.4; l je šířka kanálu v $[m]$, h_j^i je výška objemového elementu v průtočném kanálu $[m]$ a $D_{j,E}^i$ je ekvivalentní průměr kanálu v $[m]$.

Výsledné elektrické chování elektrokotle tedy výpočetní model popisuje tak, jak je znázorněno na Obr. 5.4, tedy jako paralelně zapojenou soustavu rezistorů na každé fázi, kde každý z rezistorů představuje jeden z aktuálních objemových elementů v kanálu elektrody.

Na Obr. 5.4 jsou znázorněny: 1-zdroj v síti IT; 2-impedance zdroje; 3-uzemnění zdroje; 4-distribuční síť (je-li přítomna); 5-tlaková nádoba elektrokotle; 6-fázové elektrody; 7-voda v průtočném kanále; 8-nulová elektroda spojená s nádobou; 9-impedance elektrokotle; 10-uzemnění elektrokotle



Obr. 5.4: Ekvivalentní elektrické zapojení elektrokotle

Celkový elektrický příkon elektrokotle v každém časovém kroku je dán jako suma dílčích příkonů plynoucích z jednotlivých objemových elementů v průtočném kanále:

$$P_i = \sum_{k=0}^n P_{j-k}^i \quad [W] \quad (18)$$

Výpočet výkonu v obvodech se střídavým proudem, ve kterých se nachází pouze rezistivní zátěž, lze počítat s efektivními hodnotami elektrických veličin analogicky k výkonu v obvodu se stejnosměrným proudem. Dílčí příkony jednotlivých elementů tedy plynou z aktuálního elektrického odporu každého z elementů a z fázového napětí na elektrodách (neboť VN elektrokotle jsou zapojeny do hvězdy). Pro příkon elementu tedy platí:

$$P_j^i = \frac{\left(\frac{U_s}{\sqrt{3}}\right)^2}{R_j^i} \quad [W] \quad (19)$$

Teplo generované z každého elementu je poté součin příkonu elementu P_j^i a velikosti časového kroku i [s].

$$Q_j^i = P_j^i \cdot i \quad [J] \quad (20)$$

Generované teplo zůstává v objemovém elementu a zvyšuje jeho teplotu, a tedy ovlivní výkon z daného objemového elementu v následujícím časovém kroku. Novou teplotu elementu lze vypočítat z rovnice sdílení tepla:

$$T_j^i = \frac{Q_j^i + \left(V_j^i \cdot \rho_{(T_{j-1}^{i-1})} \right) \cdot c_{p(T_{j-1}^{i-1})} \cdot T_{j-1}^{i-1}}{\left(V_j^i \cdot \rho_{(T_{j-1}^{i-1})} \right) \cdot c_{p(T_{j-1}^{i-1})} \cdot T_{j-1}^{i-1}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (21)$$

kde Q_j^i je teplo vygenerované v elementu j v časovém kroku i , V_j^i je objem elementu v kanále podél elektrody, T_{j-1}^{i-1} je teplota téhož elementu v předchozím časovém kroku (před ohřátím), $\rho_{(T_{j-1}^{i-1})}$ je hustota vody v elementu odpovídající teplotě T_{j-1}^{i-1} a $c_{p(T_{j-1}^{i-1})}$ je měrná tepelná kapacita elementu při teplotě T_{j-1}^{i-1} .

5.5. Modelované scénáře

Model umožňuje řešit nájezd celoplněného elektrokotle v několika různých níže popsaných scénářích. Všechny simulace byly provedeny s modelovou sadou vstupních dat a některé závěry a zejména konkrétní hodnoty tak nelze brát jako univerzální. Některé z vyplývajících trendů a závěrů však lze zobecnit. Konkrétnější stanovení hraničních hodnot či optimální míry navržených opatření lze však definitivně určit až pro konkrétní zadané parametry konkrétního případu elektrokotle, zejména ve vazbě na provozní možnosti a požadavky a celkovou situaci v dané soustavě CZT a také ve vazbě na geometrii tlakové nádoby i potrubí okruhu. Nicméně kapitola 6 ukazuje popisované scénáře na modelovém elektrokotli o modelových parametrech.

5.5.1. Nájezd s odběrem tepla

Základním režimem modelu byl nejtypičtější případ nájezdu celoplněného elektrokotle, tedy bez zavedení navrhovaných opatření. Schematicky je tento případ znázorněn na Obr. 5.1. (bez využití bypassu) a během nájezdu je z primární strany protékán výměník tepla. Tento scénář nájezdu lze charakterizovat rozdělením na 2 fáze. V první fázi je odstavené čerpadlo sekundárního okruhu a tím je omezena možnost odběru tepla z primárního okruhu. Při dosažení nastavené teploty (např. 80 °C) na výstupu z elektrokotle se spustí čerpadlo sekundárního okruhu postupně na jmenovité otáčky a začne odebírat teplo z primárního okruhu. (Za předpokladu, že kotel již dříve nedosáhne nominálního příkonu, a tedy fáze nájezdu není již u konce.)

Byla zpracována a vyhodnocena data z aktivací reálného elektrokotle pracujícího s podle tohoto scénáře a tím bylo možné ověřit v principu správné fungování modelu v základním stavu a tento model pomocí známých dat co nejvíce přiblížit reálnému elektrokotli.

5.5.2. Nájezd bez odběru tepla

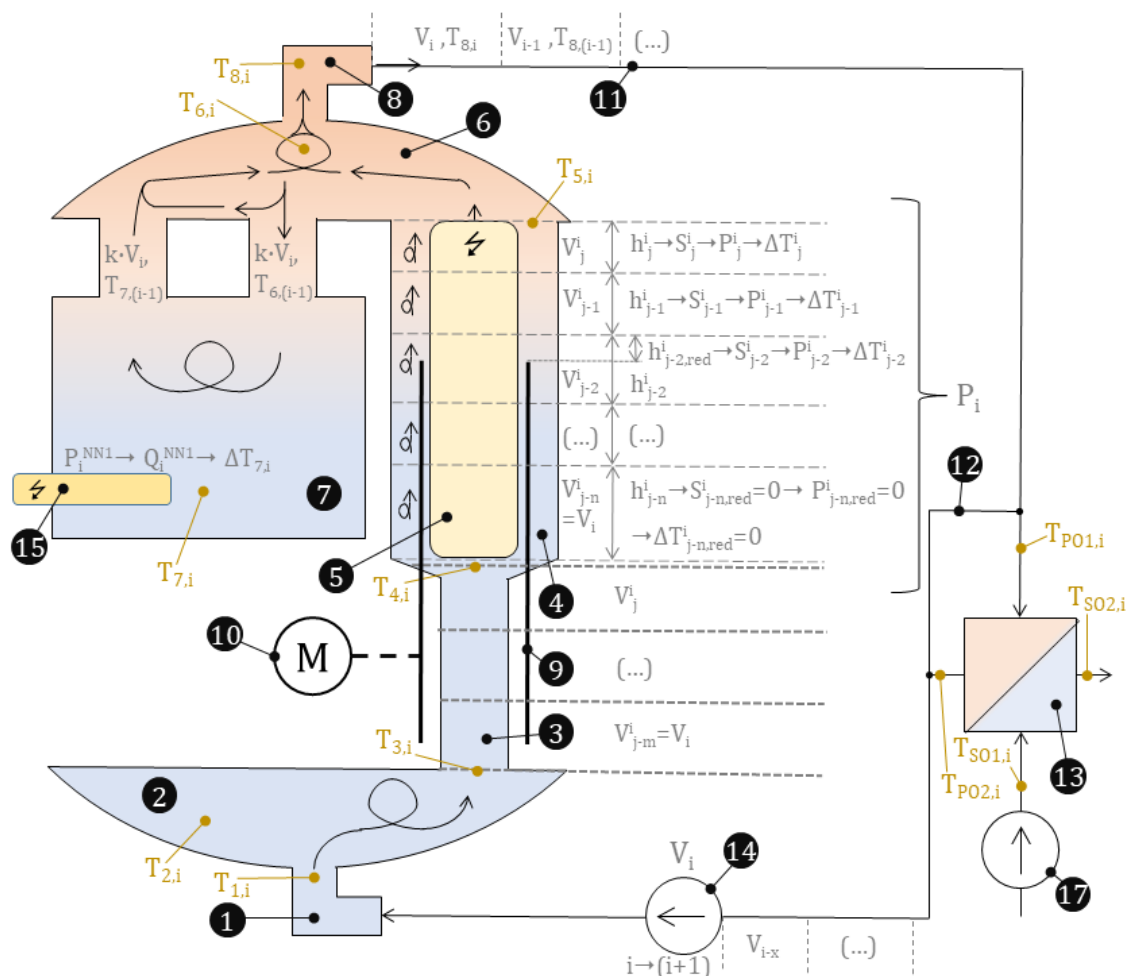
Dalším režimem modelu je nájezd elektrokotle s implementovaným bypassem výměníku na primární straně, tedy zcela bez odběru tepla do sekundárního okruhu. Schematicky znázorněno na Obr. 5.1. s využitím bypassu. Bypass umožní urychlit studený start elektrokotle díky udržení veškerého vygenerovaného tepla v elektrokotli a rychlejšímu růstu teploty v primárním okruhu a doplňkově navíc dočasně redukuje aktivně cirkulující množství vody, odpovídající objemu tepleného výměníku a kratšího úseku potrubí.

Doplňkovým režimem je nájezd bez bypassu výměníku, ale s vypnutým čerpadlem sekundárního okruhu po celou dobu trvání nájezdu kotle na jmenovitý příkon.

5.5.1. Zavedení NN přitápění do nádoby

V tomto scénáři byl implementován zdroj tepla o výkonu do 300 kW, který ohřívá zbytkový objem vody v elektrokotli a tím teoreticky přispívá k rychlejšímu nahřátí (viz Obr. 5.5, komponenta 15). Předané teplo je v modelu rovnoměrně rozptýleno do zbytkového objemu elektrokotle (komponenta 9).

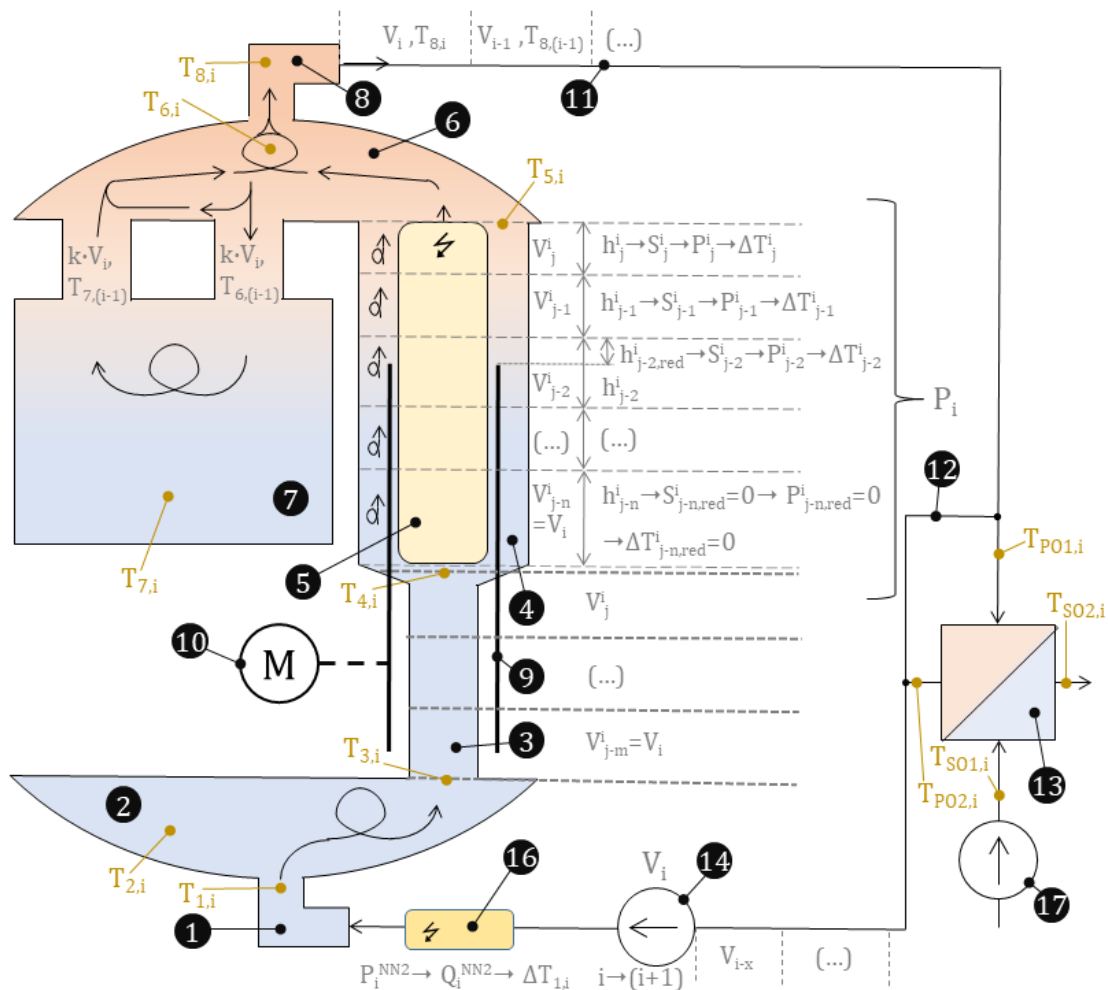
Předpokládaný přínos se v případě modelového elektrokotle však nepotvrdil a simulovaný potenciální přínos ukázal jako minimální.



Obr. 5.5: Schéma modelu celoplněného ELK s NN přitápěním v nádobě

5.5.2. Zavedení průtočného NN přitápění

Druhou variantou implementace nízkonapěťového přehřívání je průtočné přehřívání na trase primárního okruhu před vstupem do elektrokotle. Model toto přitápění zohledňuje korigováním teploty vstupu do elektrokotle podle směšovací rovnice. Schéma na Obr. 5.6 doplňuje výchozí schéma o komponentu 16-NN průtočné přitápění.



Obr. 5.6: Schéma modelu celoplněného ELK s průtočným NN přitápěním u výstupu z primárního okruhu

5.5.3. Vliv rychlosti pohonu regulačních štítů

Dalším cílem použití modelu bylo identifikovat, za jakých podmínek je limitujícím článkem v rychlosti nájezdu elektrokotle rychlost pohonu regulačních štítů. Většina provozovaných elektrokotlů není vybavena pohonem štítů s frekvenčním měničem a stávající pohony mohou již při současných požadavcích na aktivační časy znamenat rozhodující omezení.

Při požadavku na rychlou regulaci za provozu je pak rychlost pohonu štítů vždy limitujícím článkem v rychlosti regulace.

5.5.1. Ostatní trendy vyplývající z navrženého modelu

Model byl dále využit ke zhodnocení vlivu změny vybraných vstupních parametrů na dobu studeného startu. Mezi sledované parametry byly zařazeny minimální průtok oběhového čerpadla, konduktivita a velikost zbytkového objemu nádob.

6. Aplikace modelu na případ modelového elektrokotle

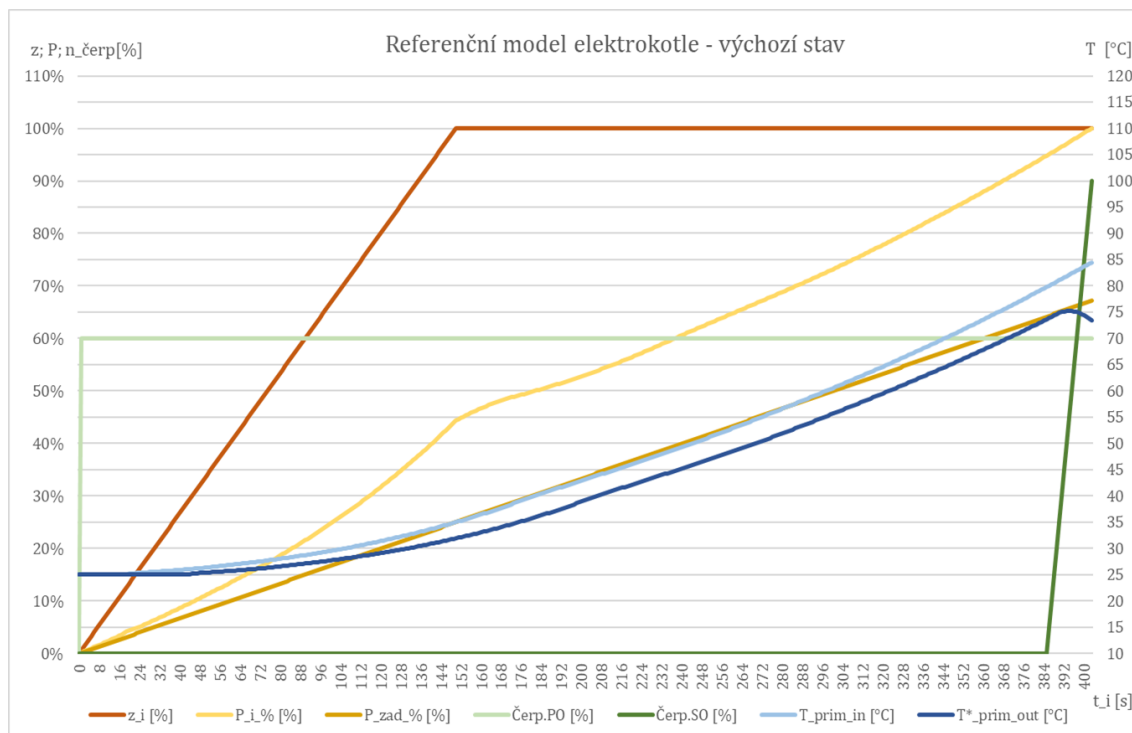
6.1. Simulace modelového elektrokotle

Za účelem představení vytvořeného modelu na konkrétní vstupní sadě dat a pro vytvoření představy o vlivu navržených opatření na elektrokotel byl po dohodě s vedoucím práce sestaven modelový elektrokotel o parametrech uvedených v Tab. 6.1. Parametry modelového elektrokotle vychází z reálných celoplněných elektrokotlů.

Modelový elektrokotel: vstupy			
Parametry elektrické a tepelné			
Celoplněný horkovodní ELK, zapojený do hvězdy (Y), 2 VN vypínače			
síťové napětí	U _s	10500	V
Nominální příkon	Q	20	MW
Tepelná ztráta (dle výrobce)	Q _{loss}	0,10%	-
Rozměry a geometrie			
Objem tlak. Nádoby	V _{ELK}	20,00	m ³
Objem potrubí bypass (v poměru k prim. potrubí)	V _{bypass}	80%	- (pro konst. DN lze cca z poměru délek)
Koeficient recirkulace v nádobě	k _{rec}	80%	- (sdílení se zbytkovým objemem nádoby)
Objem rozváděcí komory	V ₂	0,69	m ³
Objem vrchlíkové komory	V ₆	5,838	m ³
Objem zbytku nádoby	V ₇	10,789	m ³
Dimenze potrubí primáru	DN	250	(z tabulek zaevidováno: DN 125/200/250/300)
Délka potrubí primárního okruhu	L _{PO}	30	m
Objem tepelného výměníku	V _{HE}	0,2	m ³
Průměr fázové elektrody	d _L	0,31	m
Délka elektrody	l _L	1	m
Vnitřní průměr nulové elektrody	d _N	0,9	m
Počet fázových elektrod	n _L	3	-
Délka průtočného kanálu 1 elektrody	l _{kanEL}	1	m
Průměr průtočného kanálu 1 elektrody	d _{kan}	0,9	m
Délka průtočného kanálu mimo elektrodu	l _{kan-}	0,500	m
Dimenze potrubí k elektrodám	DN	125	(z tabulek zaevidováno: DN 125/200/250/300)
Délka potrubí k 1 elektrodě	L _{ELpipe}	1,2	m
Termodynamické vlastnosti			
Funkce součinitele konduktivity na T:	$K = (18/575) * T + (5/23)$		
Provozní teplota (T výstup do primáru)	T _n	120	°C
Studený stav			
Teplota	T ₀	25	°C
Konduktivita (při 25 °C)	σ ₂₅	94	μS/cm
Regulační vlastnosti			
Doba přejezdu celé dráhy štítů	t _{stity}	150	s
Čerpadlo oběhové			
nominální průtok	V _n	450	m ³ /h
čas do plného rozběhu	FAT _{č.PO}	1	s
minimální otáčky	n _{min_PO}	60%	-
Sekundární okruh			
Teplota IN	T _{SO1}	65	°C
teplotní rozdíl ve výměníku	ΔT	20	K
Teplota sepnutí čerpadla sekundárního oběhu	T _{SOstart}	80	°C (teplota na výstupu z elektrokotle T ₈)
Čerpadlo oběhové			
nominální průtok	V _{n_SO}	450	m ³ /h
čas do plného rozběhu	FAT _{č.SO}	20	s
minimální otáčky	n _{min_SO}	60%	-
Opatření:			
NN přitápění do nádoby			
Výkon NN	P _{NNn}	0	MW
regulační element ("skok")	reg _{NNn}	0,02	MW
čas do aktivace	FAT _{NNn}	1	s
NN přitápění průtočné			
Výkon NN	P _{NNp}	0	MW
regulační element ("skok")	reg _{NNp}	0,02	MW
čas do aktivace	FAT _{NNp}	1	s
Model nájezdu			
časový krok	i	1	s pro dostatečný počet elementů v kanál elektrod

Tab. 6.1: Vstupy do výpočetního modelu: modelový elektrokotel

Grafický výstup z modelu pro aktivaci ze studeného stavu je na Obr. 6.1, který popisuje časový průběh polohy regulačních štítů (z_i), průběh příkonu elektrokotle (P_i) a pro referenci je uveden zadaný příkon (P_{zad}), který odpovídá terminálu poskytování PpS s rampováním pro službu mFRR_{12,5-}. Dále lze vidět poměrný průtok oběhového čerpadla primárního a sekundárního okruhu (Čerp_PO a Čerp_SO), a také teplota na výstupu z primárního okruhu (T_{prim_out}) a na vstupu do primárního okruhu (T_{prim_in}).



Obr. 6.1: Nájezd modelového elektrokotle ve výchozím stavu

Plného jmenovitého příkonu je dosaženo po 404 sekundách, což je 6,7 min, tedy za současných podmínek dostatečně rychle pro poskytování služeb mFRR_{12,5-} i aFRR-.

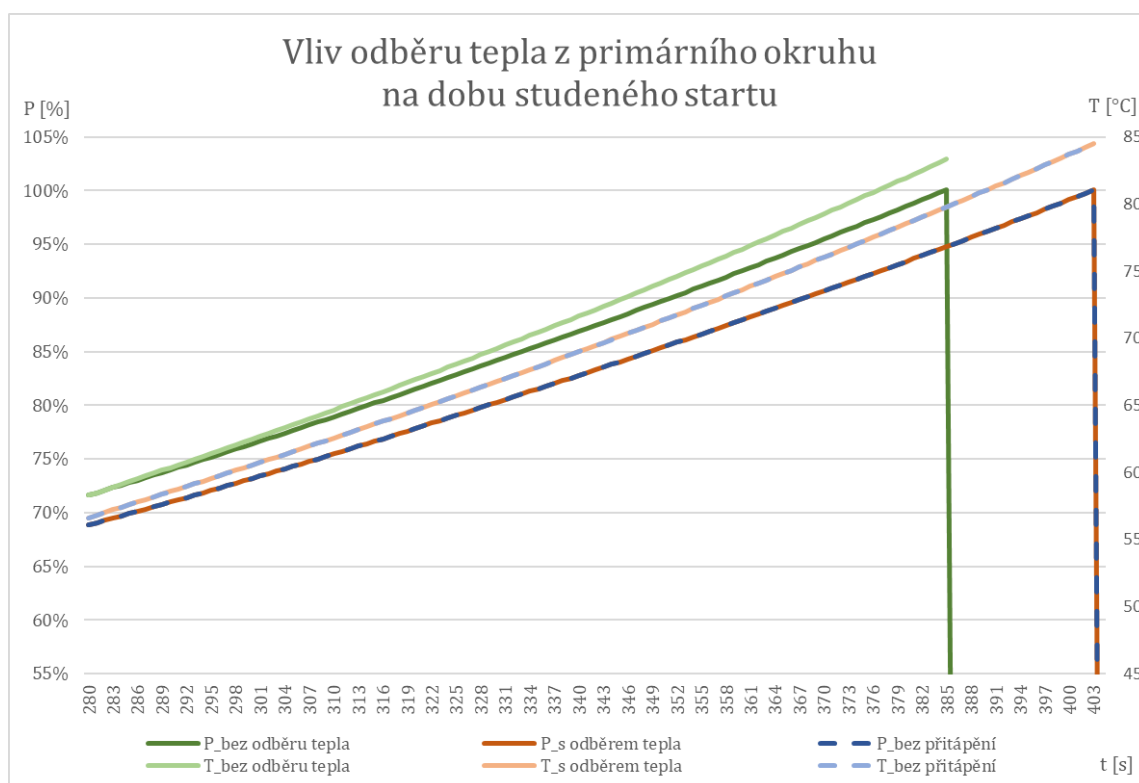
Časová závislost příkonu má konvexní tvar s jedním bodem zlomu, který nastává po plném otevření regulačních štítů. V koncové fázi nájezdu je vidět najíždějící oběhové čerpadlo sekundárního okruhu a pokles teploty na výstupu z primárního okruhu, což je reakce na teplotu na vstupu do primárního okruhu přesahující nastavených 80 °C. Zahájení odběru tepla by se v případě pokračování nájezdu dále projevilo na pozastavení nárůstu příkonu a rovněž na výstupní teplotě do primárního okruhu, nicméně pro zadané parametry příkon dosáhne 100 % dříve, než se tyto reakce stihnou projevit.

6.2. Vliv implementace opatření na dobu studeného startu

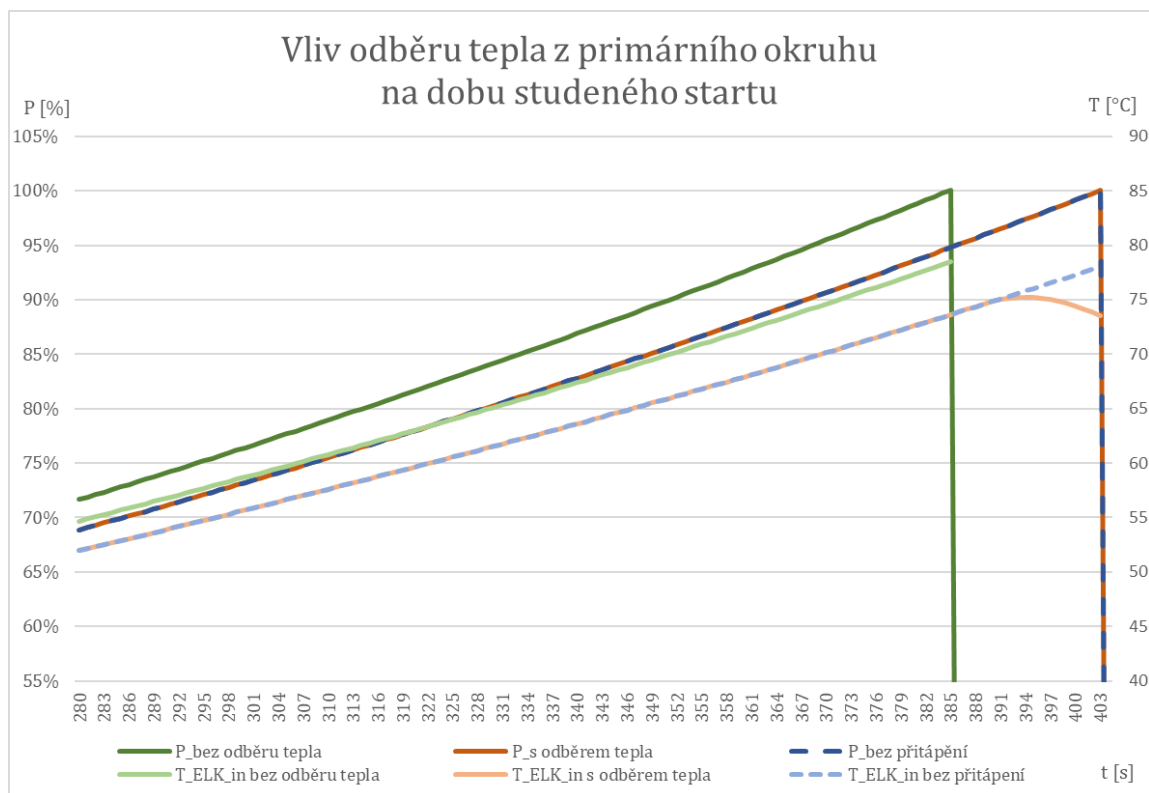
Na představeném modelovém elektrokotli byl zkoumán vliv opatření omezení odběru tepla (bypass), implementace NN přitápění do nádoby a implementace průtočného přitápění na dobu studeného startu. Dále byly sledovány dopady změn klíčových vstupních parametrů na dobu studeného startu: změna rychlosti pohonu štítů, vliv minimálního průtoku oběhového čerpadla, změna konduktivity a vliv zbytkového objemu nádoby.

6.2.1. Nájezd bez odběru tepla a s bypassem výměníku

Tato varianta porovnává nájezd modelového elektrokotle ve standardní variantě se zahájením odběru tepla do sekundárního oběhu po dosažení 80 °C na výstupu z elektrokotle, dále variantu se sekundárním čerpadlem odstaveným po celou dobu nájezdu a potom variantu s implementovaným bypassem výměníku, kdy během nájezdu není odevzdávané žádné teplo do sekundárního okruhu a zároveň je o určitou část snížen objem aktivně cirkulující vody. Obr. 6.2 ukazuje přibližný pohled na koncovou fázi nájezdu, ze které jde vidět rozdíl 20 sekund v délce nájezdu mezi standardní variantou s odběrem tepla a s variantou s bypassem. Na druhou stranu, v konkrétním případě modelového elektrokotle došlo k překročení teplotního prahu pro spuštění oběhového čerpadla až těsně před koncem nájezdu, a proto se na křivce příkonu ani na křivce teploty na výstupu z elektrokotle nestihla projevovat činnost výměníku tepla. Tuto myšlenku potvrzuje i Obr. 6.3, na kterém je vidět, že po spuštění výměníku začala klesat teplota na vstupu do elektrokotle, pouze se snížená teplota neprojevila před dosažením maximálního výkonu.



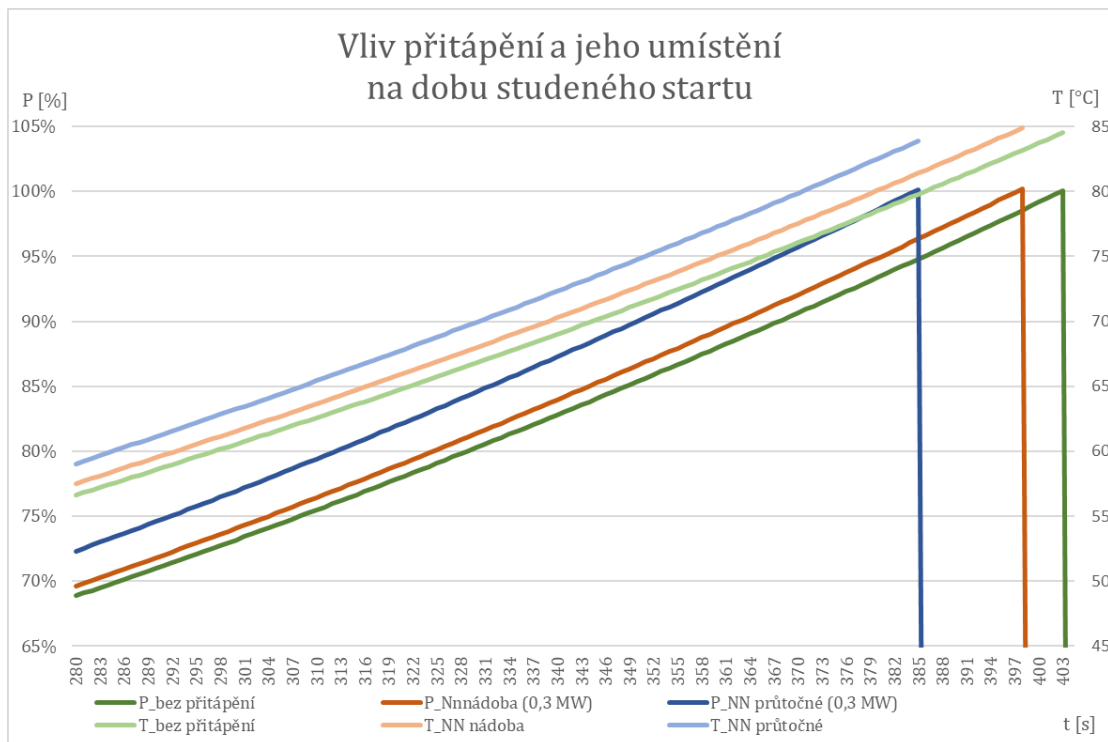
Obr. 6.2: Vliv odběru tepla z primárního okruhu na dobu studeného startu (1)
(teplota výstupu z ELK)



Obr. 6.3: Vliv odběru tepla z primárního okruhu na dobu studeného startu (2)
(teplota vstupu do ELK)

6.2.2. Možnosti implementace NN přitápění

Jak již zmiňují dřívější kapitoly, implementace NN přitápění potenciálně přispívá ke zvýšení rychlosti studeného startu a zároveň při spojení do agregčního bloku řeší i otázku minimálního výkonu. Na Obr. 6.4 jsou na grafu zaměřeném na konečnou fázi nájezdu porovnány tři scénáře: referenční případ modelového elektrokotle v základním stavu a poté tentýž kotel s NN přitápěním o příkonu 0,3 MW implementovaným do nádoby elektrokotle (konkrétně do části, která je v rámci modelu označena jako „zbytkový objem“). Třetí scénář představuje NN přitápění se shodným příkonem 0,3 MW, ovšem koncipované jako průtočné, osazené na větev primárního okruhu před vstup do nádoby elektrokotle.

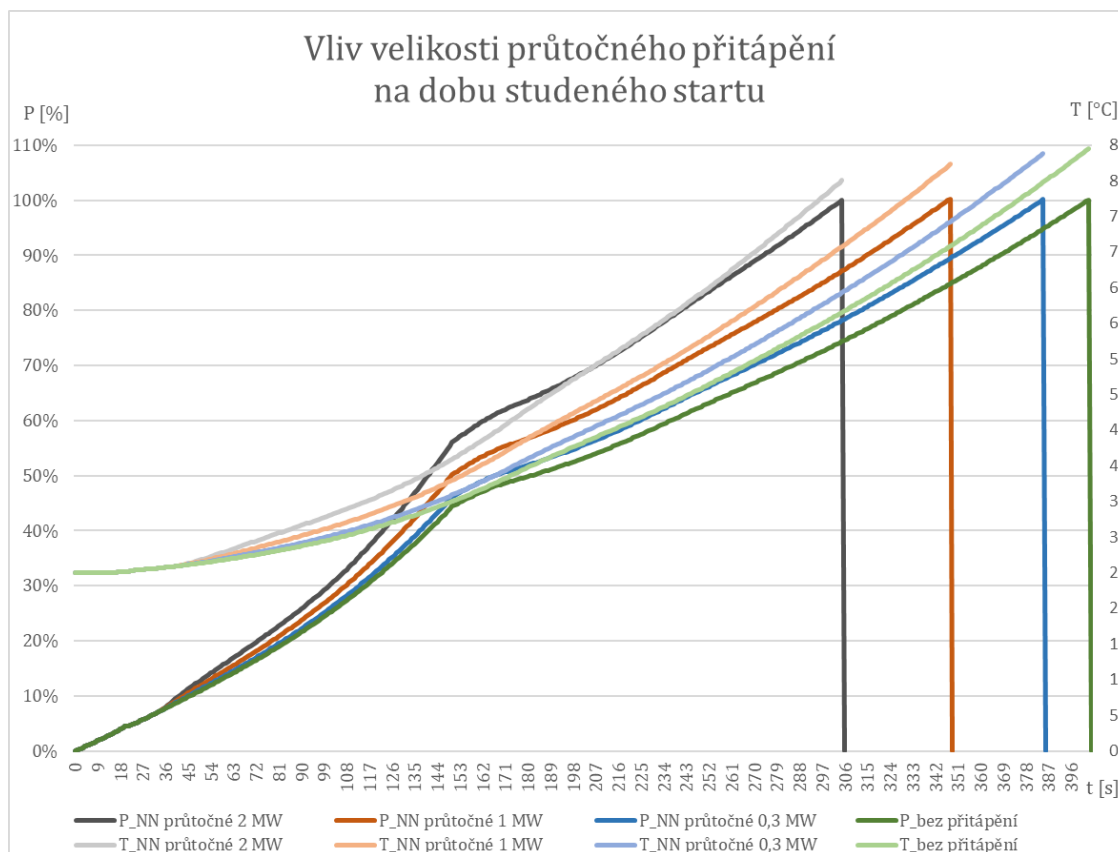


Obr. 6.4: Vliv přitápění (0,3 MW) a jeho umístění na dobu studeného startu

Prezentované výsledky nepotvrzují očekávání ohledně zdatelného přispění k rychlejšímu nájezdu, neboť přitápění do nádoby zrychlilo nájezd jen o minimální 4 sekundy. Přitápění v nádobě představuje dobrý způsob, jak udržet elektrokotle (zejména parní) nahřáté v pohotovostním stavu, nicméně pro dynamickou aplikaci tato simulace neukázala přitápění v nádobě za účelem zrychlení nájezdu jako smysluplné. To je dáno umístěním přitápění v nádobě elektrokotle do zbytkového objemu (Obr. 5.5), což zavede velké zpoždění mezi časem ohřátí vody ve zbytkovém objemu a projevem tohoto ohřátí v kanále elektrod, protože mezi tím musí voda ze zbytkového objemu projít namícháním do vrchlíku nádoby a poté celým primárním okruhem, rozváděcí nádrží a rozváděcím potrubím před tím, než se efektivně projeví v kanále elektrod. Vliv přitápění v nádobě má tak vazbu na velikost zbytkového objemu nádoby a v menším zbytkovém objemu by se pravděpodobně stejný výkon projevil více (dříve), nicméně v případě menší nádoby by na druhou stranu mohly nastat prostorové komplikace s umístěním topných těles daného výkonu.

Průtočné přitápění má již od velikosti 0,3 MW větší efekt, než přitápění do nádoby – nájezd modelového elektrokotle byl urychlen o 17 s. Rozdíl oproti přitápění v nádobě je dán právě umístěním přitápění (Obr. 5.6), neboť voda ohřátá v průtočném ohříváči prochází již relativně přímo k elektrodám skrz rozváděcí nádrž a rozváděcí potrubí (nepodstupuje míchání ve zbytkovém objemu, ve vrchlíku nádoby, ani zpoždění průchodem celého primárního okruhu)

Další potenciál průtočného NN přitápění ukazuje Obr. 6.5, který porovnává čtyři varianty: bez přitápění a s průtočným přitápěním 0,3 MW, 1 MW a 2 MW.



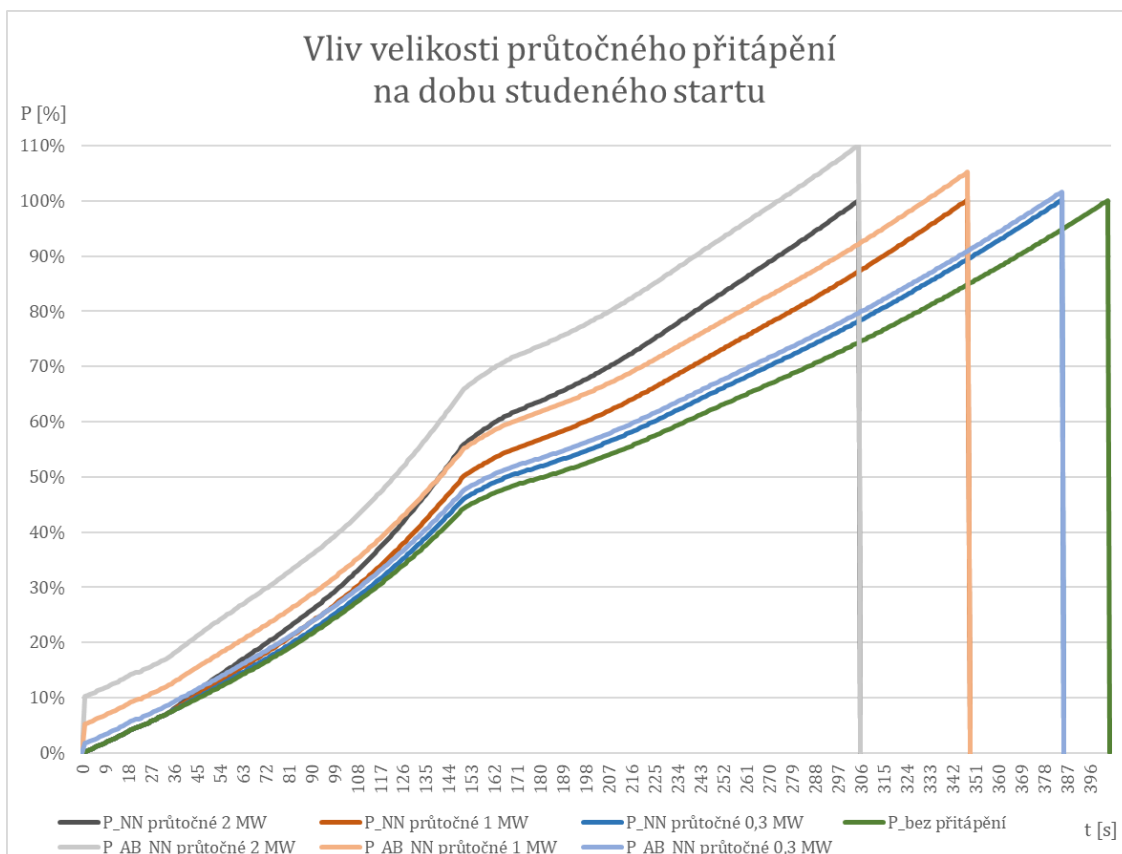
Obr. 6.5: Vliv velikosti průtočného přitápění na dobu studeného startu (1)
(příkon ELK a výstupní teplota z elektrokotle)

Z grafu je patrný výrazný vliv přidavného průtočného přitápění na dobu trvání studeného startu. Implementace 1MW průtočného přitápění do modelového elektrokotle zrychlí nájezd o 54 s oproti variantě bez přitápění a výkonnější 2MW přitápění nájezd urychlí o 97 s, což v obou případech znamená velmi podstatné urychlení.

Kromě výrazného zkrácení doby nájezdu díky předehřevu vody před elektrodovým VN kotlem umožňuje NN kotel ještě následující benefity: NN elektrokotel lze certifikovat do agregáčního bloku společně s VN elektrodovým kotlem. Tato varianta je již možná a v dalších letech počítá PPS se zavedením dalších podmínek, která poskytování z hladiny NN usnadní, stejně tak jako se snazší správou agregáčních bloků a možnosti sbáze implementovat typově certifikovaná zařízení. Proto se Obr. 6.6 zaměřuje právě na možnost spojení VN a NN kotle do agregáčního bloku. Na obrázku jsou znovu stejné scénáře přitápění, nicméně tentokrát je znázorněn i poměrný výkon potenciálního agregáčního bloku. Jak je vidět z grafu simulace, propojení elektrodového a nízkonapětového elektrokotle přinese nejen urychlení nájezdu samotného elektrodového kotle díky přidanému teplu, nicméně ještě může přidat volnou kapacitu, kterou je možné poskytnout navíc oproti stávajícímu stavu. Zároveň tedy dojde ke zrychlení a zvýšení kapacity.

Třetím benefitem tohoto spojení je možnost regulace agregáčního bloku na velmi nízkých výkonech, protože NN kotel může být sestaven z kaskády výkonově vhodně odstupňovaných topných těles, která dovolí dostatečně jemnou regulaci příkonu AB.

Souhrnně lze tedy na základě simulací NN průtočného přitápění v modelu potvrdit očekávané benefity tohoto opatření.

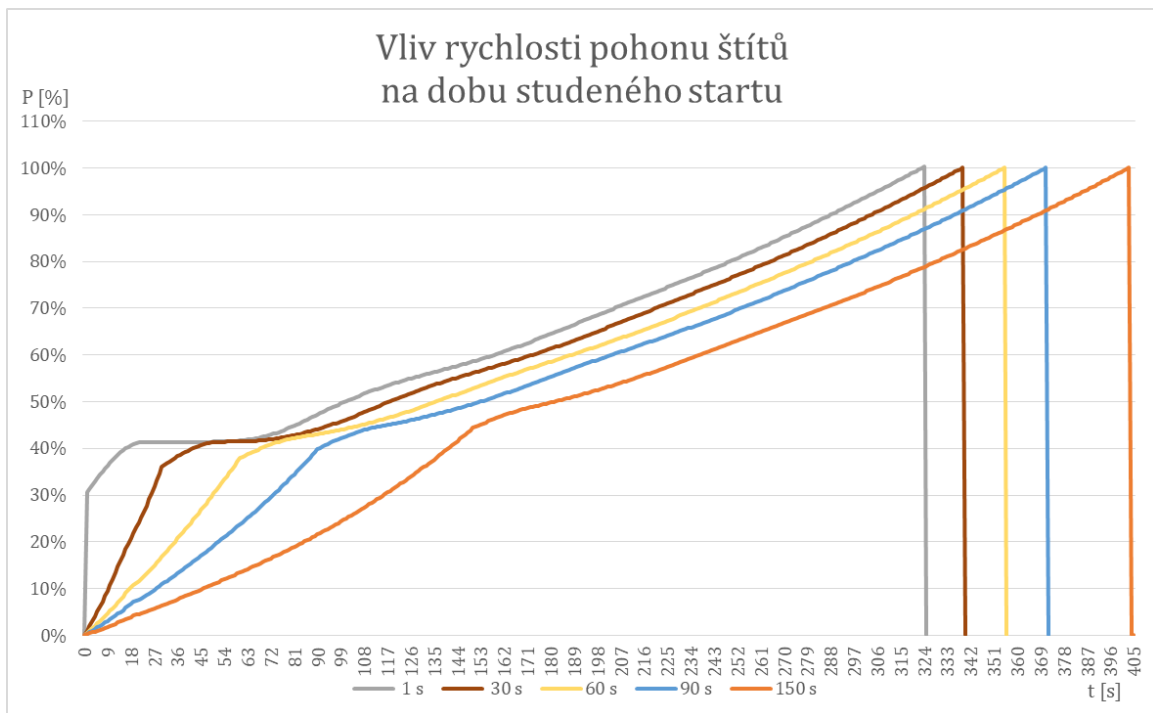


Obr. 6.6: Vliv velikosti průtočného přitápění na dobu studeného startu (2)
(příkon ELK a příkon AB)

6.2.3. Vliv rychlosti pohonu regulačních štítů

Mezi navrhovaná opatření patří zvýšení rychlosti pohonu regulačních štítů. Výsledek simulace pro 5 různých dob přejezdu štítů na Obr. 6.7 ukazuje, že doba přejezdu štítů má u celoplněného kotle nezanedbatelný vliv a s rovnoměrným zkracováním doby přejezdu štítů se rovnoměrně zkracuje i doba studeného startu – v případě modelového elektrokotle přineslo každé zrychlení štítů o 30 sekund v průměru o 16 sekund rychlejší dobu studeného startu elektrokotle. Modelový elektrokotel vykazoval poměrně pozvolný charakter nárůstu výkonu až do zkrácení doby přejezdu štítů k 90 s. Poté se projevil značně nelineární charakter v počátku nájezdu, kdy lze vidět, jak nízká teplota vody přicházející z celého okruhu a nádoby elektrokotle k elektrodám omezuje maximální příkon v daném okamžiku.

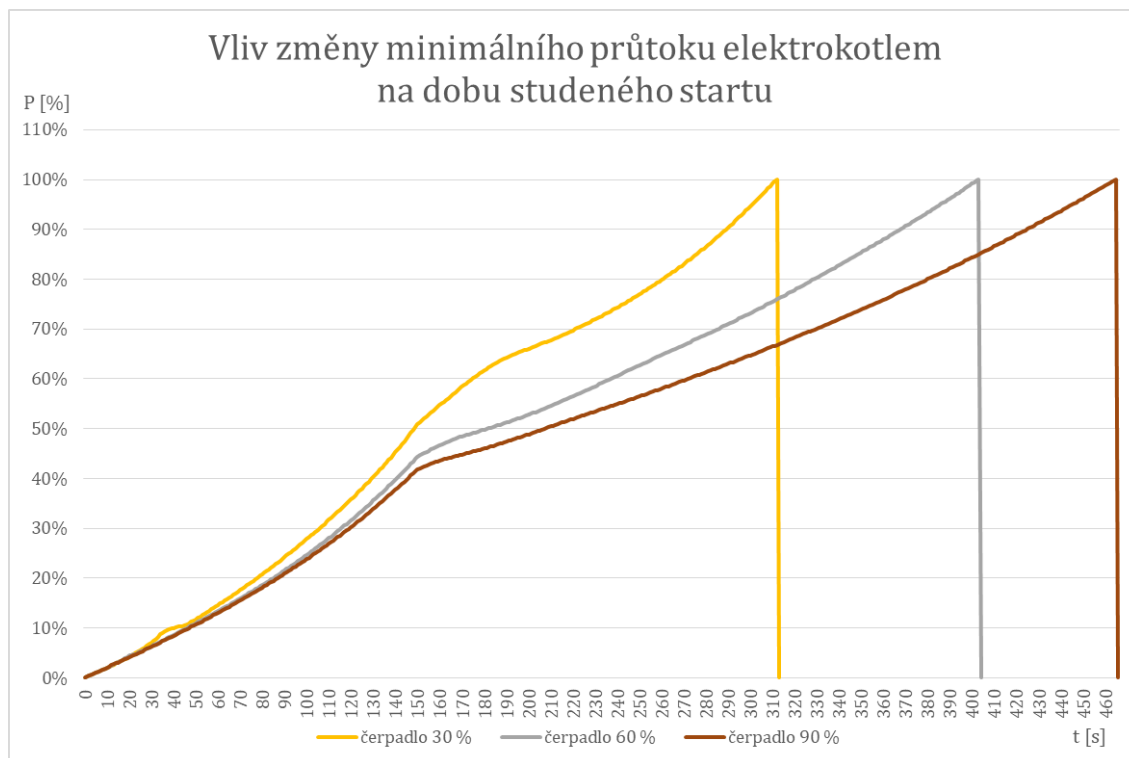
Varianta s dobou přejezdu štítů 1 sekunda je pouze modelovou variantou, která ovšem dovolí znázornit proces probíhající v kanálu elektrod: Na počátku je průtočný kanál plný studené vody o konstantní teplotě podél celé délky kanál. Po připojení elektrokotle k síti se rychle vytvoří teplotní gradient v kanálu, což dává větší výkon, než původní kanál plný pouze konstantně studené vody. Poté se nárůst příkonu na určitý čas zastaví, neboť v průtočném kanále zůstává stále stejný gradient – na vstupu do kanálu proudí stále voda o původní teplotě a tudíž na výstupu z kanálu elektrod je voda o teplotě odpovídající dosažitelnému příkonu. Příkon začne znovu růst až když se do kanálu elektrod začne vracet již jednou ohřátá voda, což změní teplotní gradient v kanálu elektrody a tím pádem začne znovu růst příkon.



Obr. 6.7: Vliv rychlosti pohonu štítů na dobu studeného startu

6.2.4. Vliv snížení minimálního průtoku oběhového čerpadla

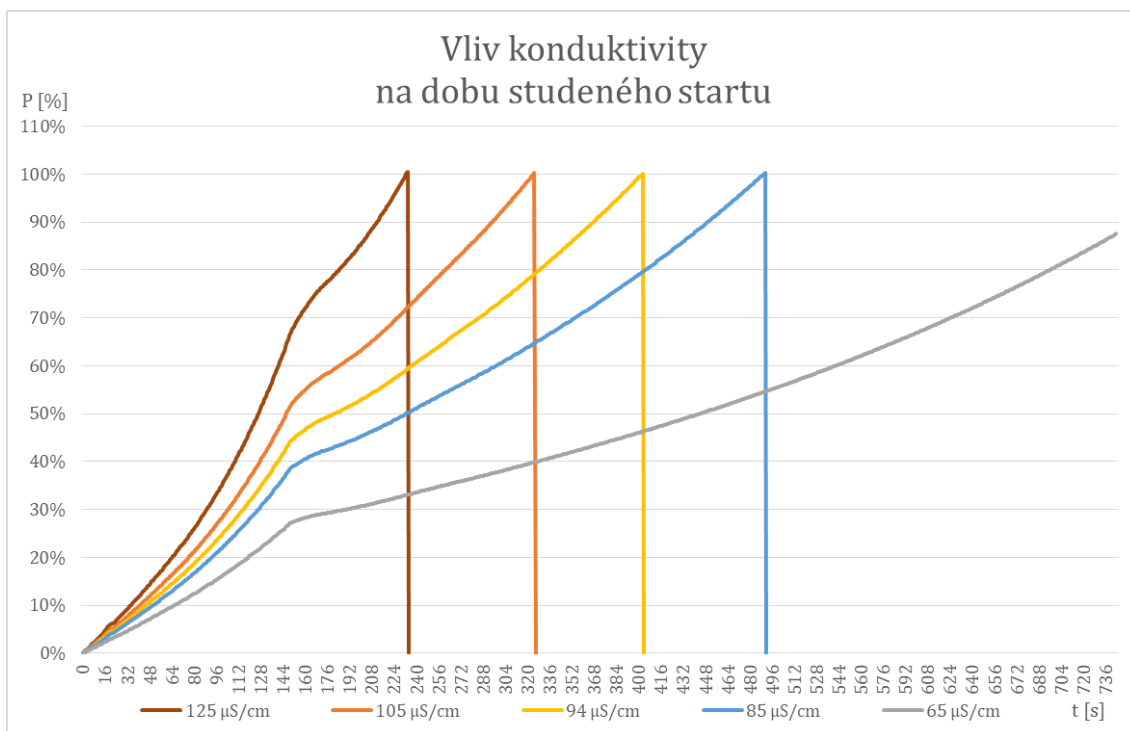
Simulace ukázala, že minimální dosažitelná rychlost průtoku vody elektrokotlem velmi výrazně ovlivňuje dobu studeného startu. V případě modelového elektrokotle, jehož výsledky jsou na Obr. 6.8, přineslo snížení minimálních otáček o 10 % zrychlení nájezdu v průměru o 26 sekund. Navíc s klesajícím průtokem čerpadla narůstal efekt zrychlení nájezdu mírně progresivně.



Obr. 6.8: Vliv změny minimálního průtoku elektrokotlem na dobu studeného startu

6.2.5. Vliv změny konduktivity na dobu nájezdu

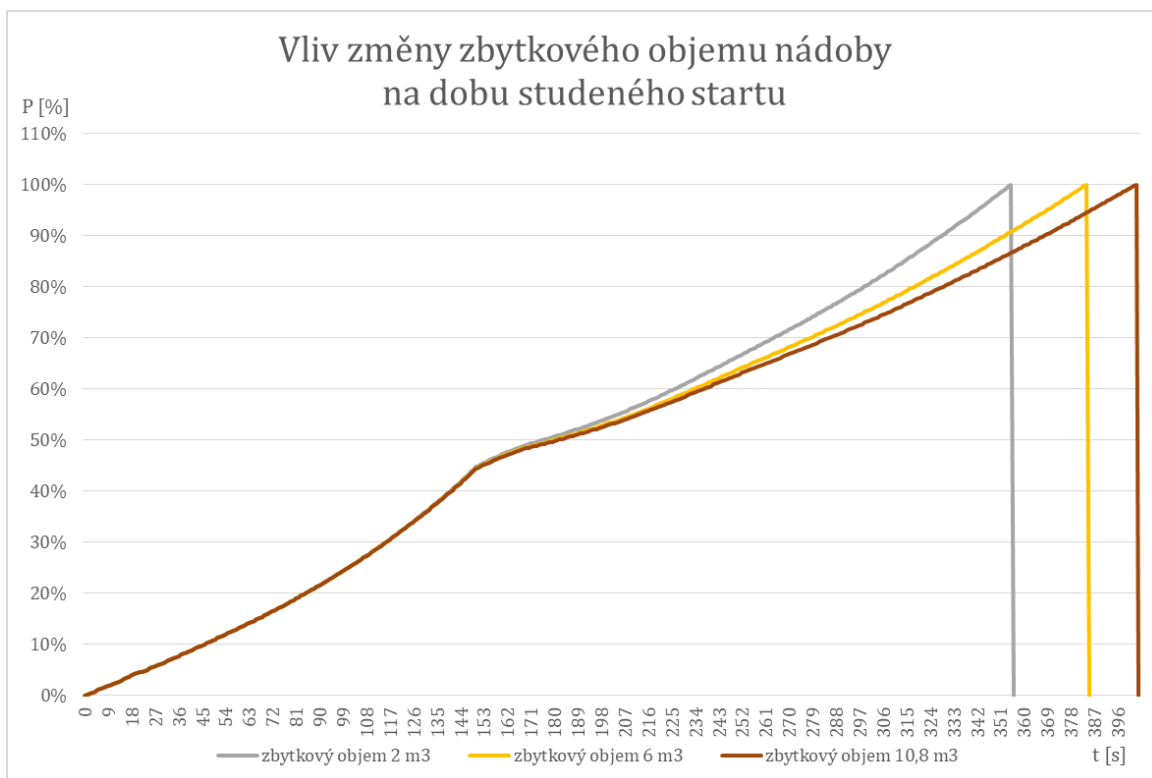
Doba nájezdu progresivně rostla s klesající konduktivitou. Největší význam pro zrychlení nájezdu má dle výsledků (Obr. 6.9) zvýšení konduktivity k hodnotě kolem 90 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (přepočtené na 25°C), poté efekt klesá. Jako protichůdný nežádoucí efekt zrychlování doby nájezdu zvýšením konduktivity lze předpokládat růst minimálního výkonu při zasunutých štítech. Proto je bez zavedení dalších opatření volba konduktivity kompromisem rychlosti nájezdu a minimálního výkonu. Minimální výkon elektrokotle není možné v modelu realisticky simulovat - přesahuje to možnosti modelu.



Obr. 6.9: Vliv konduktivity na dobu studeného startu

6.2.6. Vliv velikosti zbytkového objemu nádoby na dobu nájezdu

Podle očekávání zbytkový objem nádoby ovlivňuje rychlost nájezdu, kvůli své velké tepelné kapacitě tím pádem „tepelné setrvačnosti“ zařízení. V případě modelového elektrokotle se rozdíl začíná projevovat až kolem 60 % jmenovitého příkonu. Výsledky simulace na Obr. 6.10 pro modelový elektrokotel vykazují v průměru 5,5 s zrychlení s každým 1 m^3 sníženého objemu. Nicméně zkrácení doby nájezdu při snižování zbytkového objemu není lineární.



Obr. 6.10: Vliv změny zbytkového objemu nádoby na dobu studeného startu

6.2.1. Porovnání elektrokotle před a po implementaci sady opatření

Finálním porovnáním je srovnání 3 variant možných sad opatření, kterými by bylo možné zrychlit dobu nájezdu modelového elektrokotle. Na Obr. 6.11 jsou tyto varianty porovnány v jednom grafu.

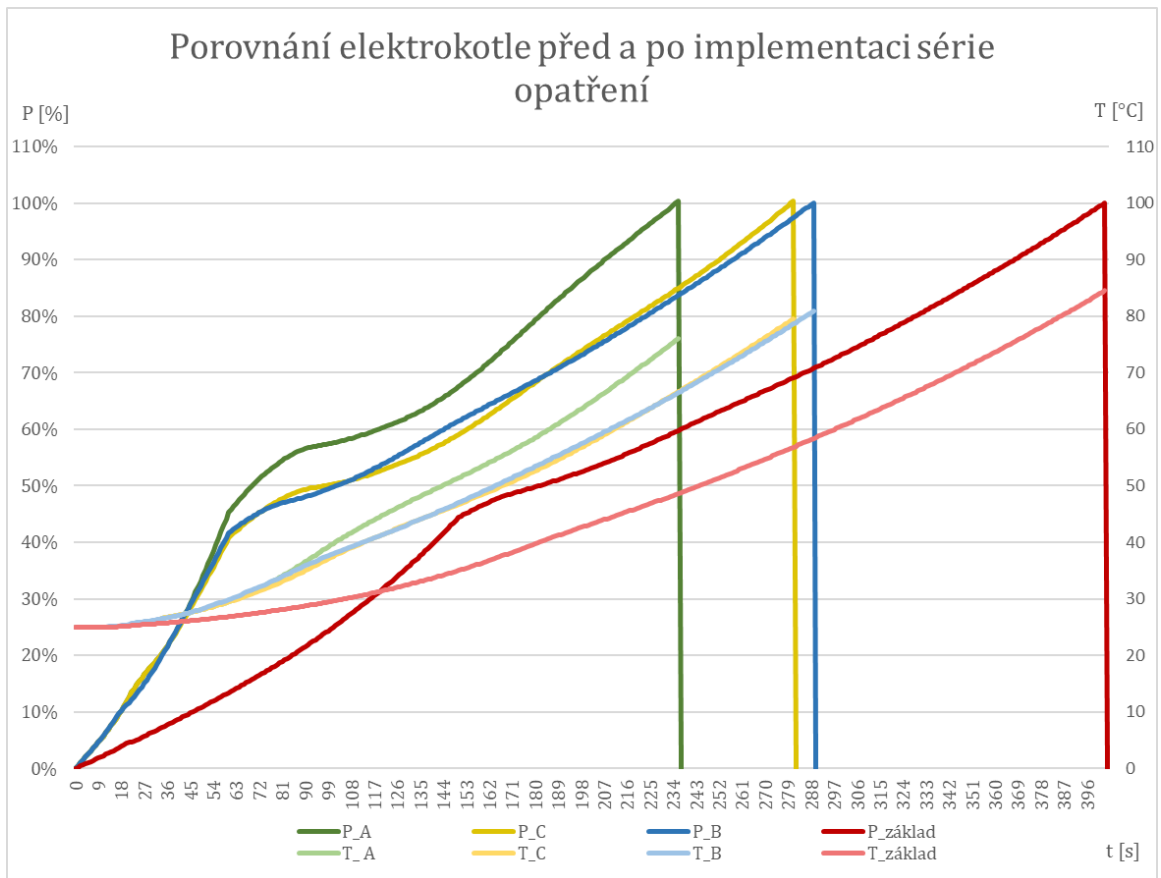
Varianta A implementuje do základního modelu bypass výměníku, rychlejší pohon štítů (přejezd za 60 s), snižuje minimální průtok elektrokotlem ze 60 % na 40 % a implementuje průtočné přehřívání o příkonu 1 MW. Zachována zůstává konduktivita a všechny další parametry elektrokotle.

Varianta B implementuje totéž, co varianta A, s rozdílem ponechání minimálního průtoku kotlem na původních 60 %.

Varianta C je taktéž téměř shodná s variantou A, s tím rozdílem, že není implementováno žádné průtočné přehřívání.

Z grafu vyplývá, že varianta A zkrátí dobu studeného startu o 167 sekund z 6,7 minut na 4 minuty, a tedy bezpečně pod 5 minut, které mohou výhledově relevantní SVR vyžadovat.

Varianty B a C jsou svým výsledným efektem velmi blízko a zkracují dobu nájezdu o 121 a 113 sekund, což znamená zkrácení doby studeného startu na 4,7 resp. 4,9 min, což je stále dostatečná rychlost pod 5 min. U scénářů s potenciálně vyřešenou otázkou regulace minimálního výkonu pomocí přitápění by navíc bylo možné zvýšit konduktivitu vody a tím start ještě více zrychlit anebo ušetřit náklady na jiná opatření.



Obr. 6.11: Porovnání elektrokotle před a po implementaci třech sad opatření

Tato kapitola tak s využitím navrženého výpočetního modelu ukázala, že i z hlediska regulačních vlastností poměrně konzervativně pojatý modelový elektrokotel, lze pomocí kombinace opatření navržených v této práci upravit na zařízení, které bude schopné poskytovat SVR ještě řadu let.

Soubor s modelem je přiložen jako Příloha 2 ve formátu .xls.

7. Závěr

Tato práce nejprve představila souhrnný úvodní pohled na problematiku jednotlivých typů elektrodoových elektrokotlů, jejich princip funkce a regulace a společně s tím uvedla praktická hlediska a vlastnosti jednotlivých typů elektrokotlů, včetně pohledu na současné využití elektrokotlů v ČR. Ve vztahu k elektrokotlům byl poté představen Kodex přenosové soustavy (část II.) jakožto předpis určující pravidla pro využití elektrokotlů pro poskytování podpůrných služeb. Pozornost byla věnována aktuálnímu stavu požadavků Kodexu na poskytování služeb výkonové rovnováhy relevantních pro elektrokotle, a zároveň byly uvedeny předpokládané budoucí změny a trendy, které nabydou účinnosti v následujících letech a ovlivní tím poskytování podpůrných služeb. Byly identifikovány možné příležitosti a hrozby plynoucí z těchto změn vzhledem k možnosti využívat elektrokotle k poskytování služeb výkonové rovnováhy.

Konfrontací popsaných technických vlastností elektrokotlů se současnými a budoucími požadavky ze strany provozovatele přenosové soustavy byly identifikovány kritické body certifikačního procesu, jejichž splnění by v současné nebo budoucí době mohlo vzhledem k současným technickým možnostem elektrokotlů vyvstat jako komplikované. Byly identifikovány příčiny popsaných kritických bodů certifikace, a to označením technických vlastností elektrokotlů. Tyto byly označeny za limity technologie jednotlivých typů elektrokotlů ve vztahu k poskytování podpůrných služeb. Bylo zjištěno, že elektrokotle s největší pravděpodobností v budoucnu nebudou mít technický problém s plněním podmínek pro poskytování služby $mFRR_{12,5}$. Totéž nelze předpokládat pro poskytování služby $aFRR$, kdy za současných i budoucích podmínek konkrétní reálné elektrokotle často vyžádají implementaci určitých opatření, aby byly technicky schopné požadavky splnit. Identifikovány jako potenciálně limitující byly rychlost studeného startu, rychlost provozní regulace a výška stabilního minimálního výkonu.

S primárním důrazem na celoplněný typ horkovodního elektrokotle byla představena řada možných opatření, s jejichž pomocí je možné posunutí všech popsaných limitů, přičemž diskuze náročnosti implementace a potenciálního přínosu opatření dovolila vyhodnotit jejich proveditelnost.

Za účelem zhodnocení přínosu implementace navržených opatření cílících na zrychlení nájezdu celoplněného elektrokotle byl vytvořen výpočetní model vycházející z dat reálných elektrokotlů. Princip, struktura a předpoklady fungování modelu byly v práci představeny a poté byly na sadě modelových vstupních dat simulovány dopady navržených opatření na rychlost nájezdu elektrokotle. Rovněž byl pozorován vliv změny některých klíčových parametrů na dobu nájezdu elektrokotle.

Jako přínosná byla vyhodnocena zejména opatření spočívající ve zrychlení pohonu štítů, snížení minimálního průtoku elektrokotlem a v implementaci přídavného průtočného nízkonapětového přitápění před vstup do nádoby elektrokotle, certifikovaného do agregačního bloku s elektrokotlem. Nakonec bylo na příkladu modelového elektrokotle představeno několik možných kombinací opatření, které by vedly k výraznému posunutí limitů tohoto modelového elektrokotle tak, že by mohl poskytovat služby výkonové rovnováhy ještě řadu let, a to včetně v budoucnu zrychlené služby $aFRR$.

Předložený model na široce rozšířené platformě MS Excel může po zadání přesných dat ke konkrétnímu modelu elektrokotle v praxi sloužit jako nástroj pro simulaci chování celoplněného elektrokotle a předpovědět možný dopad konkrétních plánovaných opatření na chování konkrétního elektrokotle.

8. Zdroje

- [1] OCHVATOVÁ, Jana. Největší elektrokotel v Česku zahájil provoz. Kromě dodávek tepla bude stabilizovat elektrizační soustavu. *O energetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, [2020], 22.říjen 2020 [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/teplarenstvi/nejvetsi-elektrokotel-cesku-zahajil-provoz-krome-dodavek-tepla-bude-stabilizovat-elektrizacni-soustavu>
- [2] ŠOLC, Pavel. Flexibilita SVR. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online prezentace]. Praha: ČEPS, c2005 - 2021, 11.května 2021 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/narodni-akcni-plan-pro-chytre-site/2021/5/CEPS_Think_Thank_NAP-Flexibilita.pptx
- [3] KAŠÁK, Martin. Změny v poskytování služeb výkonové rovnováhy. *Dny teplotářství a energetiky* [online prezentace]. ČEPS, c2022, 15.9.2021 [cit. 2021-12-12]. Dostupné z: https://www.dny-teplarenstvi-a-energetiky.cz/userfiles/dokumenty/pdf/f386_15-9-kasak.pdf?t=1645180225
- [4] KAŠÁK, Martin. Změny v poskytování služeb výkonové rovnováhy. *Dny teplotářství a energetiky* [online prezentace]. ČEPS, c2022, 27.4.2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://www.dny-teplarenstvi-a-energetiky.cz/userfiles/dokumenty/pdf/f426_martin-kasak.pdf?t=1653060040
- [5] PUCHEL, Michal. Změny na trhu podpůrných služeb. *KeepWarm: Renewing district heating* [online prezentace]. ČEPS, [2019], 24.05.2019 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: https://keepwarmeurope.eu/fileadmin/user_upload/Learning_Centre/Czech_Republic/T2.2-22_Changes_in_market_for_ancillary_services.pdf
- [6] ČEPS,A.S. Setkání s poskytovateli a zájemci o poskytování SVR: sekce Energetický obchod. ČEPS: Poskytovatelé PpS [online prezentace]. Praha: ČEPS, 2022, 16. března 2022 [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/poskytovatele-pps>
- [7] ČEPS,A.S. Setkání s poskytovateli a zájemci o poskytování SVR: sekce Energetický obchod. ČEPS: Poskytovatelé PpS [online prezentace]. Praha: ČEPS, 2021, 9.září 2021 [cit. 2022-05-04]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/poskytovatele-pps>
- [8] ČEPS,A.S. Kodex přenosové soustavy, Část II.: Podpůrné služby (PpS), Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy. *Energetický regulační úřad* [online]. Jihlava: ČEPS, [2018], 2018 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/sites/default/files/obsah/prilohy/kodex-psrevize-castii.pdf>
- [9] ČEPS,A.S. Kodex přenosové soustavy, Část II.: Podpůrné služby (PpS), Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy. *Aku-bat cz: Asociace pro akumulaci energie* [online]. Praha: ČEPS, [2019], duben 2019 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: http://www.akubat-asociace.cz/wp-content/uploads/2019/04/Kodex-%C4%8CEPS_%C4%8C%C3%A1st-II._Podp%C5%AFrn%C3%A9-slu%C5%BEby.pdf

- [10] ČEPS,A.S. Kodex přenosové soustavy, Část II.: Podpůrné služby (PpS), Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy. *Energetický regulační úřad* [online]. Jihlava: ČEPS, [2020], leden 2020 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: https://www.eru.cz/sites/default/files/import_files/Kodex_II.pdf
- [11] ČEPS,A.S. Kodex přenosové soustavy, Část II.: Podpůrné služby (PpS), Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy. *ČEPS: Kodex PS* [online]. Praha: ČEPS, [2021], červen 2021 [cit. 2021-12-20]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [12] ČEPS,A.S. Kodex přenosové soustavy - Část II.: Podpůrné služby (PpS). *ČEPS: Kodex PS* [online]. Praha: ČEPS, [2022], duben 2022 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/cs/kodex-ps>
- [13] *Auxilien: Velké elektrické kotle* [online]. Praha: Auxilien, (2022) [cit. 2022-02-20]. Dostupné z: <https://www.auxilien.cz/velke-elektricke-kotle/>
- [14] KUBINOVA, Marcela. Špičková technologie ve ŠKO-ENERGO pomáhá udržovat rovnováhu v přenosové síti. *Škoenergo: Ostatní, Tisková zpráva spuštění elektrokotle* [online]. Mladá Boleslav: ŠKO-ENERGO, c1995–2011, 14.11.2016 [cit. 2022-01-11]. Dostupné z: <https://www.sko-energo.cz/content/video/elektrokotel.pdf>
- [15] AF POWER AGENCY. TENZA instalovala elektrodový kotel v provozu Červený mlýn. *Allforpower* [online]. Praha: AF POWER agency, 2019, 30. květen 2019, **13**.(1) [cit. 2022-03-03]. ISSN 1802-8535. Dostupné z: <https://allforpower.cz/rozvody-energii/tenza-instalovala-elektrodovy-kotel-v-provozu-cerveny-mlyn-126>
- [16] *PARAT: News* [online]. Flekkefjord (Norsko): PARAT Halvorsen AS, [2022] [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.parat.no/en/news/>
- [17] PARAT Electrode Boiler. *PARAT* [online]. Flekkefjord (Norsko): PARAT Halvorsen AS, [2022], 2022 [cit. 2022-04-10]. Dostupné z: <https://www.parat.no/en/references/industry/parat-electrode-boiler/>
- [18] CREDITAS. V rukou UCED je jedna z největších tepláren na biomasu. *Creditas* [online]. Praha: creditasgroup, c2022, 20.01.2022 [cit. 2022-02-23]. Dostupné z: <https://www.creditasgroup.cz/zpravy/v-rukou-uced-je-jedna-z-nejvetsich-teplaren-na-biomasu>
- [19] MÁLEK, Michael. Virtuální elektrárny zajišťují flexibilitu vhodně řízeným mixem lokálních zdrojů. *Technický týdeník* [online]. Praha: Technický týdeník, [2020], 16. leden 2022, LXX(1) [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <https://www.uced.cz/deni-v-uced/virtualni-elektrarny-zajistuji-flexibilitu-vhodne-rozenym-mixem-lokalnich-zdroju>
- [20] BFS INDUSTRY. Steam electric boiler, czechia. *BFS Industry, s.r.o.* [online]. Praha: BFS Industry, [2022], 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.bfsindustry.cz/eng/projects/parni-elektrokotel-cesko>

- [21] LAPÁČKOVÁ BERÁNKOVÁ, Šárka. Elektrárna Poříčí má nový elektrokotel. *Skupina ČEZ* [online]. Hradec Králové: Skupina ČEZ, c2022, 1.10.2020 [cit. 2022-04-20]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/elektrarna-porici-ma-novy-elektrokotel-109366>
- [22] VAZHINSKAYA, Victoria. Elpanneteknik, The worlds leading supplier of high voltage electrical boilers: Elpanneteknik high voltage electrode hot water boiler. *Elpanneteknik* [online prezentace]. Elpanneteknik Sweden AB, 2020, 30.09.2020 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: https://elpanneteknik.com/wp-content/uploads/2020/03/Elpanneteknik-AB_hot-water.pdf
- [23] VAZHINSKAYA, Victoria. Elpanneteknik, The worlds leading supplier of high voltage electrical boilers: Elpanneteknik high voltage electrode steam boiler. *Elpanneteknik* [online prezentace]. Elpanneteknik Sweden AB, 2020, 30.09.20 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: https://elpanneteknik.com/wp-content/uploads/2020/03/Elpanneteknik-AB_steam.pdf
- [24] PARAT. High voltage electrode boiler: Power to heat for steam or hot water. *PARAT* [online]. Flekkefjord (Norsko): PARAT Halvorsen AS, [2021], 11.02.21 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.parat.no/media/454699/Parat-IEH-English-2021.pdf>
- [25] ZANDER & INGESTRÖM. Introducing the world's best hot water and steam boilers: In harmony with your economy and the environment. *Zander & Ingeström* [online prezentace]. Täby (Švédsko): Zander & Ingeström, 2014, 28.05.14 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: https://www.zeta.se/siteassets/zander--ingestrom/elpannor/dokument-elpannor/hot-water-and-steam-boilers_en.pdf
- [26] OCHRANA, Ladislav. Integrované energetické centrum Červený mlýn (PPC+AKU+EK). *KeepWarm: Renewing district heating* [online prezentace]. Teplárny Brno, [2019], 24.05.19 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: https://keepwarmeurope.eu/fileadmin/user_upload/Learning_Centre/Czech_Republic/T2.2-21_Integrated_energy_center_%c4%8cerven%c3%bd_ml%c3%bdn__PPC__AKU__EC_.pdf
- [27] PRECISIONBOILERS. HVJ Electrode Boiler - Operation. *Precisionboilers* [online]. Morristown (Tennessee): Precision Boilers, c2022, 13.01.17 [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: https://precisionboilers.com/wp-content/uploads/2017/01/HVJ_PrincipleofOperation.pdf
- [28] ACME ENGINEERING PRODUCTS. Immersed electrode steam boilers 4.16 TO 20KV. *Acme engineering products* [online prezentace]. Montreal (Quebec): ACME Engineering Prod., c2021, December 2020 [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: https://www.acmeprod.com/_files/ugd/43dd13_3a2e308a91e1445dabf2ab55e225db22.pdf
- [29] ACME ENGINEERING PRODUCTS. High voltage jet type electrode steam boilers. *Acme engineering products* [online prezentace]. Montreal (Quebec): ACME Engineering Prod., c2021, november 2021 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: https://www.acmeprod.com/_files/ugd/43dd13_3c6947455b6d4900a539e7a2a80966d6.pdf

- [30] FUNDA, Zdeněk, manažer projektů realizací elektrokotlů, BFS Energo, a.s. [konzultace]. Praha, 4.2.2022
- [31] LUDVÍK, Tomáš, energetický inženýr, projektant, manažer projektů realizací elektrokotlů, BFS Industry, s.r.o. [konzultace]. Praha, 7.3.2022
- [32] BARTOŠ, Matouš, energetický inženýr, projektant, manažer projektů realizací elektrokotlů, BFS Industry, s.r.o. [konzultace]. Praha, 28.3.2022
- [33] BUMERL, Vojtěch, energetický inženýr, projektant, manažer projektů realizací elektrokotlů, BFS Industry, s.r.o. [konzultace]. Praha, 15.4.2022
- [34] MOLNÁR, Tomáš, manažer projektů realizací elektrokotlů, BFS Energo, a.s. [konzultace]. Praha, 12.5.2022
- [35] LUDVÍK, Tomáš. BFS INDUSTRY, S.R.O. *Elektrodové kotle*. Říjen 2020. Praha, 2020. Podniková literatura.
- [36] ZANDER & INGESTRÖM. Z&I "ZETA" High Voltage Electrode Steam Boiler: Auxiliary Steam Boiler for Power Plants. Täby (Švédsko), 2012. Podniková literatura.
- [37] ZANDER & INGESTRÖM. Electric hot water boiler type ZVPI 2012: Power 12 MW / 10 kV. Täby (Švédsko), 2013. Podniková literatura.
- [38] ELPANNETEKNIK SWEDEN AB. Electrode Boiler Technology Analysis prepared for New China Laundry and Swedish Trading Company. Göteborg (Švédsko), 2009. Podniková literatura.
- [39] FONDRIEST ENVIRONMENTAL, INC. Conductivity, Salinity & Total Dissolved Solids. Fondriest environmental learning center [online]. Fairborn (Ohio): Fondriest Environmental, c2022, 2022 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/conductivity-salinity-tds/#:~:text=Conductivity%20is%20temperature%20dependent,many%20salts%20and%20minerals%2030>
- [40] ZANDER & INGESTRÖM. Zeta Boilers Presentation. Täby (Švédsko), 2011. Podniková literatura.
- [41] MORAVEC, Jan. Rozvodné sítě TN, IT a TT - popis, výhody a nevýhody. *O energetice.cz* [online]. Třebíč: OM Solutions, [2015], 9.březen 2015 [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/rozvodne-site-tn-it-tt>

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Schématický boční řez celoplněným horkovodním elektrodo­vým kotlem. (Upraveno z [22])	12
Obr. 2.2: Změna minimálního výkonu v reakci na změnu konstrukce regulačních štítů (upraveno z [13])	14
Obr. 2.3: Schéma systému poloplněného horkovodního elektrodo­vého kotle [24]	15
Obr. 2.4: Schéma alternativní konstrukce poloplněného elektroko­tle [35].....	16
Obr. 2.5: Schématický řez ponorným parním elektrodo­vým kotlem. (Upraveno z [23]).....	18
Obr. 2.6: Ponorný parní elektroko­tel s regulačními štíty.....	19
Obr. 2.7: a) Tryskající parní elektroko­tle: a) Precision Boilers, b) ACME (upraveno z [27][29]).....	20
Obr. 2.8: Závislost konduktivity vody na teplotě [35]	23
Obr. 3.1: Struktura dělení podpůrných služeb od dubna 2019 [5]	24
Obr. 3.2: Průběh certifikačního testu $mFRR_{t_A}$ [12]	29
Obr. 3.3: Zobrazení průběhu vyhodnocení $mFRR_{12,5}$ (upraveno z [2]).....	30
Obr. 3.4: Průběh výkonu poloplněného elektroko­tle při certifikaci na RZMZ ₁₅₋ [26].....	30
Obr. 3.5: Průběh testovacího signálu $aFRR$ [12].....	31
Obr. 4.1: Koncepční schéma návrhu: Bypass kanálu elektrod a plně dosedající štíty.	39
Obr. 4.2: Koncepční schéma návrhu: Labyrintová konstrukce vrchního štítu a plně dosedající štíty	41
Obr. 5.1: Schéma základního výpočetního modelu nájezdu celoplněného elektroko­tle	47
Obr. 5.2: Tvar průtočného kanálu (a) a jeho rozvinutí do roviny (b)	51
Obr. 5.3: Axiální řez rozvinutým mezikružím (a); nahrazení středním obvodem (b)	52
Obr. 5.4: Ekvivalentní elektrické zapojení elektroko­tle	54
Obr. 5.5: Schéma modelu celoplněného ELK s NN přitápěním v nádobě.....	56
Obr. 5.6: Schéma modelu celoplněného ELK s průtočným NN přitápěním u výstupu z primárního okruhu	57
Obr. 6.1: Nájezd modelového elektroko­tle ve výchozím stavu.....	59
Obr. 6.2: Vliv odběru tepla z primárního okruhu na dobu studeného startu (1) (teplota výstupu z ELK).....	60
Obr. 6.3: Vliv odběru tepla z primárního okruhu na dobu studeného startu (2) (teplota vstupu do ELK)	61
Obr. 6.4: Vliv přitápění (0,3 MW) a jeho umístění na dobu studeného startu	62
Obr. 6.5: Vliv velikosti průtočného přitápění na dobu studeného startu (1) (příkon ELK a výstupní teplota z elektroko­tle)	63
Obr. 6.6: Vliv velikosti průtočného přitápění na dobu studeného startu (2) (příkon ELK a příkon AB)	64
Obr. 6.7: Vliv rychlosti pohonu štítů na dobu studeného startu	65
Obr. 6.8: Vliv změny minimálního průtoku elektroko­tlem na dobu studeného startu.....	66
Obr. 6.9: Vliv konduktivity na dobu studeného startu	67
Obr. 6.10: Vliv změny zbytkového objemu nádoby na dobu studeného startu	68
Obr. 6.11: Porovnání elektroko­tle před a po implementaci třech sad opatření.....	69

Seznam tabulek

Tab. 3.1: Elektrokotle instalované v ČR.....	25
Tab. 3.2: Parametry testovacího signálu služby aFRR [12].....	31
Tab. 6.1: Vstupy do výpočetního modelu: modelový elektrokotel.....	58

Seznam příloh

Příloha 1: Výpočtové vztahy použité ve výpočtovém modelu

Příloha 2: Výpočtový model nájezdu celoplněného elektrokotle

Příloha 1: Výpočtové vztahy použité ve výpočetním modelu

Tato příloha slouží pro podrobnější doplnění kapitoly 5 hlavního textu diplomové práce a uvádí hlavní výpočtové vztahy, které využívá výpočtový model nájezdu celoplněného elektrokotle přiložený jako Příloha 2.

Výpočtové vztahy obsahují veličiny uvedené v Tab. P1 níže a jsou blíže specifikovány pomocí indexů podle níže uvedené logiky (Tab. P2) a podle čísel uzlových bodů na Obr. P1.

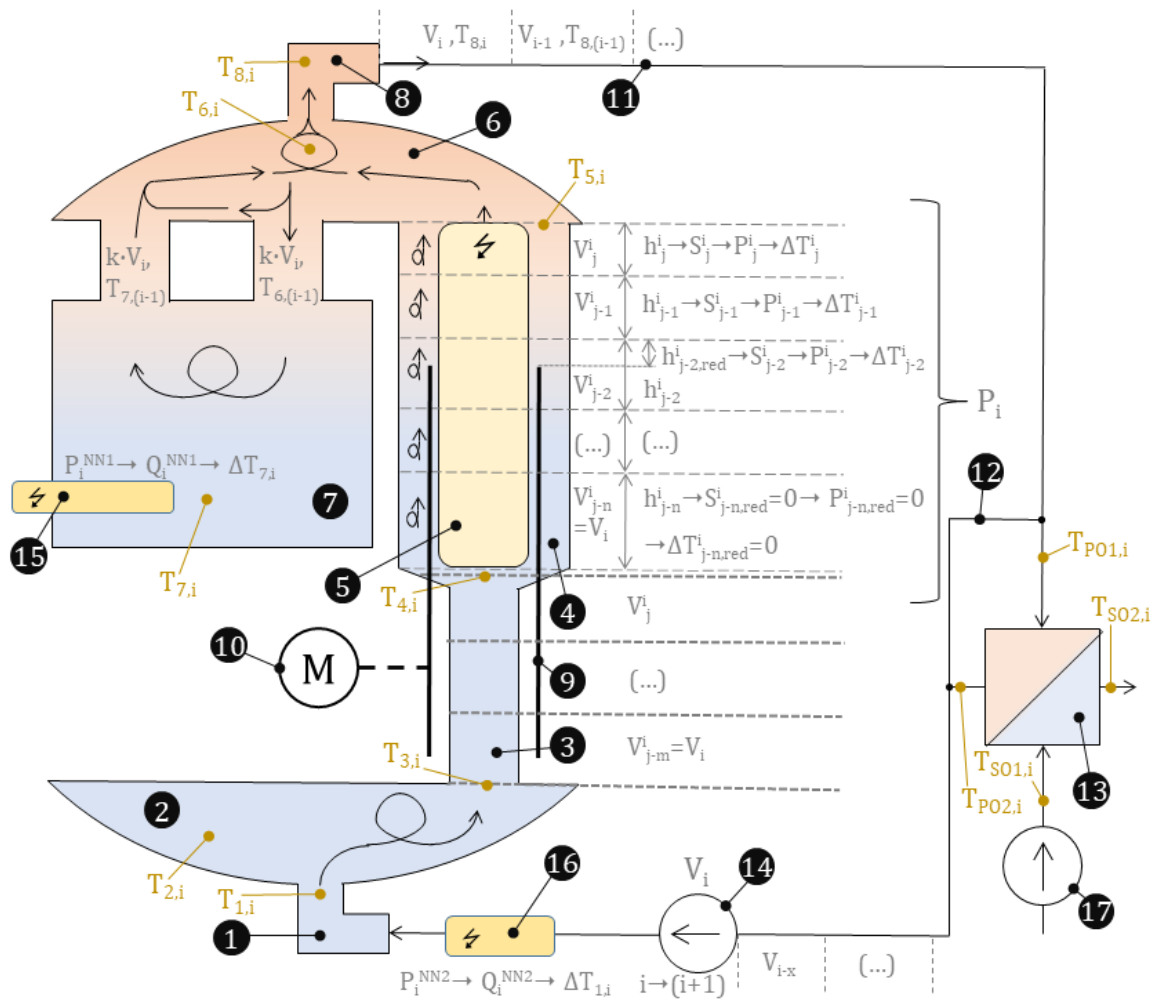
Veličina	Značení	Jednotka
časový krok	i	s
teplota	T	$^{\circ}C$
hmotnost	m	kg
objem	V	m^3
průtok (nominální)	\dot{V}_n	m^3/s
hustota	ρ	kg/m^3
měrná tepelná kapacita	c_p	$J/kg.K$
teplo	Q	J
elektrický příkon	P	W
poměrný průtok čerpadla (0-100 %)	c	1
elektrické napětí (efektivní hodnota)	U	V
elektrický odpor	R	Ω
konduktivita (přepočtená k 25 °C)	σ_{25}	S/m
koeficient tepelné závislosti konduktivity	K	1
průměr, poloměr	D, r	m
výška	h	m
šířka kanálu	l	m
poměrný objem (pro přepočet objemu elementů)	q	1
koeficient recirkulace do zbytkového objemu	k	1

Tab. P1: Přehled použitých veličin a jejich značení

Je dodržena v kapitole 5.2 popsaná indexová konvence, tedy že index i značí časový identifikátor a index j značí relativní polohu. Index „*“ (hvězdička) značí v konkrétním vztahu přepočítaný stav veličiny z dosavadního stavu, který se stává novým aktuálním stavem, a tedy dále je značen obvyklým způsobem již bez hvězdičky.

Značení	Význam indexu
i	časový identifikátor
j	relativní poloha v systému
x	neznámý počet časových kroků
*	následující, přepočítaný stav veličiny
L	fázová elektroda
N	nulová elektroda
NN	přídavné přitápění
průtočné	přídavné přitápění průtočné
nádoba	přídavné přitápění do nádoby
PO	primární okruh
SO	sekundární okruh

Tab. P2: Přehled použitých indexů a jejich význam



Obr. P1: Celkové schéma modelu s vyznačenými uzlovými body

1. Teploty v uzlových bodech

Výpočet teplot vychází převážně ze směšovacích rovnic v daných uzlových bodech modelu. Specifickým případem tvoří případy směšování většího počtu objemových elementů do jednoho o výsledné teplotě (viz popis komponenty typu „kanál“ v kapitole 5.4.)

1.1. Teplota na vstupu do elektrokotle $T_{1,i}$

Teplota objemového elementu vody vystupující z primárního okruhu do elektrokotle vychází z teploty objemového elementu, který do primárního okruhu vstupoval před tím, než došlo k přečerpání celého objemu primárního okruhu oběhovým čerpadlem. Obecně tedy:

$$T_{1,i} = T_{8,i-x} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Při určení tohoto stavu model využije sumu celkově přečerpávaného objemu od počátku nájezdu a pomocí známého objemu potrubí vyhledá v historii sumárně přečerpávaných objemů objem odpovídající časovému kroku, ve kterém byl nyní výstupní objemový

element na vstupu do potrubí primárního okruhu. Odtud lze již získat jeho objem a teplotu.

Poté následuje případné přepočítání objemu objemového elementu a k tomu příslušící přepočet teploty. Pokud aktuální průtok čerpadla odpovídá stejnému průtoku, se kterým byl objemový element uveden do potrubí, tak převezme přímo výstupní objemový element a jeho teplotu. Pokud je aktuální průtok nižší, tak převezme pouze část výstupního objemového elementu a jeho teplotu. Pokud je aktuální průtok vyšší (např. čerpadlo najíždí), tak převezme celý aktuální objemový element a jeho teplotu a poté ještě tolik po něm následujících elementů z výstupu potrubí, dokud nebude aktuální průtok vyrovnán zlomkovou částí určitého objemového elementu. Výsledný objem tedy vždy odpovídá aktuálnímu průtoku. Výsledná teplota je výsledkem smíšení zkombinovaných objemových elementů. Největší počet elementů, které je model připraven namíchat na výstupu z potrubí je 5, což představuje poměrně velký rozdíl velikosti objemů. Model navíc kontroluje nevyčerpání této kapacity.

Pro přepočet většího počtu objemových elementů na jeden výstupní objemový element jsou použity tyto vztahy:

$$q_{j1}^i = \frac{V_i}{V_j} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j2}^i = \frac{V_i - V_{j1}}{V_{j2}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j3}^i = \frac{(V_i - V_{j1}) - V_{j2}}{V_{j3}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j4}^i = \frac{(V_i - V_{j1} - V_{j2}) - V_{j3}}{V_{j4}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j5}^i = \frac{(V_i - V_{j1} - V_{j2} - V_{j3}) - V_{j4}}{V_{j5}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$V_i^* = V_{j1}^i \cdot q_{j1}^i + V_{j2}^i \cdot q_{j2}^i + V_{j3}^i \cdot q_{j3}^i + V_{j4}^i \cdot q_{j4}^i + V_{j5}^i \cdot q_{j5}^i$$

$$T_{1,i}^* = \frac{V_{j1}^{i-1} \cdot q_{j1}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j1}^{i-1} + \frac{V_{j2}^{i-1} \cdot q_{j2}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j2}^{i-1} + \frac{V_{j3}^{i-1} \cdot q_{j3}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j3}^{i-1} + \frac{V_{j4}^{i-1} \cdot q_{j4}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j4}^{i-1} + \frac{V_{j5}^{i-1} \cdot q_{j5}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j5}^{i-1}$$

Při zavedení odvodu tepla do sekundárního okruhu a nebo při implementaci průtočného přídavného nízkonapětového přitápění je vstupní teplota do elektrokotle $T_{1,i}$ tímto ovlivněna a korigována na teplotu $T_{1,i}^*$ podle následující bilance:

$$Q_{NN}^{\text{průtočné}} - Q_{SO,i} = V_i \cdot \rho_{(T_{1,i})} \cdot c_{p(T_{1,i})} \cdot (T_{1,i}^* - T_{1,i})$$

$$T_{1,i}^{**} = \frac{V_i \cdot \rho_{(T_{1,i})} \cdot c_{p(T_{1,i})} \cdot T_{1,i} + Q_{NN}^{\text{průtočné}} - Q_{SO,i}}{V_i \cdot \rho_{(T_{1,i})} \cdot c_{p(T_{1,i})}} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

1.2. Teplota ve spodní rozváděcí nádrži $T_{2,i}$

$$m_i \cdot c_p(T_{1,i}) \cdot (T_{1,i} - T_{2,i}) = (m_2 - m_i) \cdot c_p(T_{2,(i-1)}) \cdot (T_{2,i} - T_{2,(i-1)})$$

$$m_i = V_i \cdot \rho(T_{1,i})$$

$$m_2 = V_2 \cdot \rho(T_{2,(i-1)})$$

$$m_2 - m_i = V_2 \cdot \rho(T_{2,(i-1)}) - V_i \cdot \rho(T_{1,i})$$

$$T_{2,i} = \frac{(V_i \cdot \rho(T_{1,i})) \cdot c_p(T_{1,i}) \cdot T_{1,i} + (V_2 \cdot \rho(T_{2,(i-1)}) - V_i \cdot \rho(T_{1,i})) \cdot c_p(T_{2,(i-1)}) \cdot T_{2,(i-1)}}{(V_i \cdot \rho(T_{1,i})) \cdot c_p(T_{1,i}) + (V_2 \cdot \rho(T_{2,(i-1)}) - V_i \cdot \rho(T_{1,i})) \cdot c_p(T_{2,(i-1)})} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

1.3. Teplota na vstupu do rozváděcího potrubí $T_{3,i}$

$$T_{3,i} = T_{2,(i-1)} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

1.4. Teplota na vstupu do kanálu elektrod $T_{4,i}$

Teplota objemového elementu vody vystupující z rozváděcího potrubí k elektrodám do kanálu elektrod vychází z teploty objemového elementu, který do rozváděcího potrubí vstupoval před tím, než došlo k přečerpání celého objemu rozváděcího potrubí oběhovým čerpadlem. Obecně tedy:

$$T_{1,i} = T_{3,i-x} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Při určení tohoto stavu model využije sumu celkově přečerpáného objemu od počátku nájezdu a pomocí známého objemu potrubí vyhledá v historii sumárně přečerpáných objemů objem odpovídající časovému kroku, ve kterém byl nyní výstupní objemový element na vstupu do rozváděcího potrubí. Odtud lze již získat jeho objem a teplotu.

Poté následuje případné přepočítání objemu objemového elementu a k tomu přísluší přepočet teploty. Pokud aktuální průtok čerpadla odpovídá stejnému průtoku, se kterým byl objemový element uveden do potrubí, tak převezme přímo výstupní objemový element a jeho teplotu. Pokud je aktuální průtok nižší, tak převezme pouze část výstupního objemového elementu a jeho teplotu. Pokud je aktuální průtok vyšší (např. čerpadlo najíždí), tak převezme celý aktuální objemový element a jeho teplotu a poté ještě tolik po něm následujících elementů z výstupu potrubí, dokud nebude aktuální průtok vyrovnán zlomkovou částí určitého objemového elementu. Výsledný objem tedy vždy odpovídá aktuálnímu průtoku. Výsledná teplota je výsledkem smíšení zkombinovaných objemových elementů. Největší počet elementů, které je model připraven namíchat na výstupu z potrubí je 5, což představuje poměrně velký rozdíl velikosti objemů. Model navíc kontroluje nevyčerpání této kapacity.

Pro přepočítání většího počtu objemových elementů na jeden výstupní objemový element jsou použity tyto vztahy:

$$q_{j1}^i = \frac{V_i}{V_j} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j2}^i = \frac{V_i - V_{j1}}{V_{j2}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j3}^i = \frac{(V_i - V_{j1}) - V_{j2}}{V_{j3}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j4}^i = \frac{(V_i - V_{j1} - V_{j2}) - V_{j3}}{V_{j4}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j5}^i = \frac{(V_i - V_{j1} - V_{j2} - V_{j3}) - V_{j4}}{V_{j5}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$V_i^* = V_{j1}^i \cdot q_{j1}^i + V_{j2}^i \cdot q_{j2}^i + V_{j3}^i \cdot q_{j3}^i + V_{j4}^i \cdot q_{j4}^i + V_{j5}^i \cdot q_{j5}^i$$

$$T_{4,i}^* = \frac{V_{j1}^{i-1} \cdot q_{j1}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j1}^{i-1} + \frac{V_{j2}^{i-1} \cdot q_{j2}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j2}^{i-1} + \frac{V_{j3}^{i-1} \cdot q_{j3}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j3}^{i-1} + \frac{V_{j4}^{i-1} \cdot q_{j4}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j4}^{i-1} + \frac{V_{j5}^{i-1} \cdot q_{j5}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j5}^{i-1}$$

1.5. Teplota na výstupu z kanálu elektrod $T_{5,i}$

Určení teploty objemového elementu vystupující z kanálu elektrod je nejsložitějším případem. Model sleduje všechny objemové elementy v kanále elektrody a v každém časovém kroku určuje výkon a změnu teploty příslušící každému elementu. Při určování výstupní teploty vyhledá poslední objemový element, který je právě u výstupu z kanálu elektrod a porovná ho s aktuálním průtokem čerpadla. Pokud průtok čerpadla odpovídá stejnému průtoku, se kterým byl objemový element uveden do kanálu elektrod, tak převezme přímo výstupní objemový element a jeho teplotu. Pokud je aktuální průtok nižší, tak převezme pouze část výstupního objemového elementu a jeho teplotu. Pokud je aktuální průtok vyšší (např. čerpadlo najíždí), tak převezme celý aktuální objemový element a jeho teplotu a poté ještě tolik po něm následujících elementů z kanálu elektrody, dokud nebude aktuální průtok vyrovnán zlomkovou částí určitého objemového elementu. Výsledný objem tedy vždy odpovídá aktuálnímu průtoku. Výsledná teplota je výsledkem smíšení zkombinovaných objemových elementů. Největší počet elementů, které je model připraven namíchat na výstupu z kanálu je 5, což představuje poměrně velký rozdíl velikosti objemu. Model navíc kontroluje nevyčerpání této kapacity.

Pro přepočítání většího počtu objemových elementů na jeden výstupní objemový element jsou použity tyto vztahy:

$$q_{j1}^i = \frac{V_i}{V_j} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j2}^i = \frac{V_i - V_{j1}}{V_{j2}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j3}^i = \frac{(V_i - V_{j1}) - V_{j2}}{V_{j3}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{ tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j4}^i = \frac{(V_i - V_{j1} - V_{j2}) - V_{j3}}{V_{j4}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{ tak omezen na hodnotu } 1$$

$$q_{j5}^i = \frac{(V_i - V_{j1} - V_{j2} - V_{j3}) - V_{j4}}{V_{j5}} ; \langle 0; 1 \rangle, \text{pokud vychází } q > 1, \text{ tak omezen na hodnotu } 1$$

$$V_i^* = V_{j1}^i \cdot q_{j1}^i + V_{j2}^i \cdot q_{j2}^i + V_{j3}^i \cdot q_{j3}^i + V_{j4}^i \cdot q_{j4}^i + V_{j5}^i \cdot q_{j5}^i$$

$$T_i^* = \frac{V_{j1}^{i-1} \cdot q_{j1}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j1}^{i-1} + \frac{V_{j2}^{i-1} \cdot q_{j2}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j2}^{i-1} + \frac{V_{j3}^{i-1} \cdot q_{j3}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j3}^{i-1} + \frac{V_{j4}^{i-1} \cdot q_{j4}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j4}^{i-1} + \frac{V_{j5}^{i-1} \cdot q_{j5}^{i-1}}{V_{i-1}} \cdot T_{j5}^{i-1}$$

1.6. Teplota ve sběrném vrchlíku $T_{6,i}$

$$0 = (V_6 \cdot \rho_{(T_{6,(i-1)})} - V_i \cdot \rho_{(T_{5,i})} - k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{7,(i-1)})}) \cdot c_{p(T_{6,(i-1)})} \cdot (T_{6,i} - T_{6,(i-1)}) +$$

$$+ V_i \cdot \rho_{(T_{5,i})} \cdot c_{p(T_{5,i})} \cdot (T_{6,i} - T_{5,i}) + k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{7,(i-1)})} \cdot c_{p(T_{7,(i-1)})} \cdot (T_{6,i} - T_{7,(i-1)})$$

$$T_6 = \frac{(V_6 \cdot \rho_{(T_{6,(i-1)})} - V_i \cdot \rho_{(T_{5,i})} - k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{7,(i-1)})}) \cdot c_{p(T_{6,(i-1)})} \cdot T_{6,(i-1)} +}{(V_6 \cdot \rho_{(T_{6,(i-1)})} - V_i \cdot \rho_{(T_{5,i})} - k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{7,(i-1)})}) \cdot c_{p(T_{6,(i-1)})} +} \dots$$

$$+ \frac{(V_i \cdot \rho_{(T_{5,i})}) \cdot c_{p(T_{5,i})} \cdot T_{5,i} + k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{7,(i-1)})} \cdot c_{p(T_{7,(i-1)})} \cdot T_{7,(i-1)}}{(V_i \cdot \rho_{(T_{5,i})}) \cdot c_{p(T_{5,i})} + k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{7,(i-1)})} \cdot c_{p(T_{7,(i-1)})}} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

(jedná se pouze kvůli rozložení strany graficky rozdělený zlomek)

1.7. Teplota zbytkového objemu $T_{7,i}$

$$0 = (V_7 \cdot \rho_{(T_{7,(i-1)})} - k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{6,(i-1)})}) \cdot c_{p(T_{7,(i-1)})} \cdot (T_{7,i} - T_{7,(i-1)}) + k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{6,(i-1)})} \cdot c_{p(T_{6,(i-1)})} \cdot$$

$$\cdot (T_{7,i} - T_{6,(i-1)}) - Q_{NN}^{\text{nádobá}}$$

$$T_{7,i} = \frac{(V_7 \cdot \rho_{(T_{7,(i-1)})} - k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{6,(i-1)})}) \cdot c_{p(T_{7,(i-1)})} \cdot T_{7,(i-1)} + k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{6,(i-1)})} \cdot c_{p(T_{6,(i-1)})} \cdot T_{6,(i-1)} + Q_{NN}^{\text{nádobá}}}{(V_7 \cdot \rho_{(T_{7,(i-1)})} - k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{6,(i-1)})}) \cdot c_{p(T_{7,(i-1)})} + k \cdot V_i \cdot \rho_{(T_{6,(i-1)})} \cdot c_{p(T_{6,(i-1)})}} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

1.8. Výstupní teplota z elektrokotle do primárního okruhu $T_{8,i}$

$$T_{8,i} = T_{6,(i-1)} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

2. Výpočet elektrického odporu, výkonu a tepla

Elektrický odpor, příkon, teplo a změna teploty příslušící každému elementu v průtočném kanále elektrod se počítá zvlášť podle následujících vztahů.

$$D_E = \frac{2 \cdot l}{\ln \frac{r_N}{r_L}} [m]$$

$$R_j^i = \frac{1}{K_j^i \cdot \sigma_{25}} \cdot \frac{l}{\pi \cdot D_E \cdot h_j^i} [\Omega]$$

$$P_j^i = \frac{\left(\frac{U_s}{\sqrt{3}}\right)^2}{R_j^i} [W]$$

$$P_i = \sum_{k=0}^n P_{j-k}^i [W]$$

$$Q_j^i = P_j^i \cdot i [W]$$

$$Q_j^i = m_j^i \cdot c_{p(T_{j-1})} \cdot (T_j^i - T_{j-1}^i) [J]$$

$$m_j^i = V_j^i \cdot \rho_{j(T_{j-1}^i)}$$

$$T_j^i = \frac{Q_j^i + \left(V_j^i \cdot \rho_{(T_{j-1}^i)}\right) \cdot c_{p(T_{j-1}^i)} \cdot T_{j-1}^{i-1}}{\left(V_j^i \cdot \rho_{(T_{j-1}^i)}\right) \cdot c_{p(T_{j-1}^i)}} [^\circ C]$$

3. Ostatní vztahy

Tepelný výkon a teplo předané přes teplotní výměník do sekundárního okruhu

$$P_{SO,i} = V_{SO,2} \cdot \rho_{SO,2} \cdot c_{pSO,2} \cdot (T_{SO,2} - T_{SO,1})$$

$$T_{SO,2} = T_{PO,i} - \Delta T$$

$$Q_{SO,i} = P_{SO,i} \cdot i$$

Teplo předané průtočným přitápěním do vody v primárním okruhu

$$Q_{NNi}^{průtočné} = P_i \cdot i$$

Teplo předané přitápěním do nádoby zbytkovému objemu

$$Q_{NNi}^{nádobá} = P_{NNi} \cdot i$$

Přečerpaný objem čerpadlem primárního okruhu:

$$V_i = \dot{V}_n \cdot c_i \cdot i \text{ [m}^3\text{]}$$

Přečerpaný objem čerpadlem sekundárního okruhu:

$$V_{SO,i} = \dot{V}_{SO,n} \cdot c_{SO,i} \cdot i \text{ [m}^3\text{]}$$

Výkon uvažovaného agregčního bloku

$$P_{AB} = P + P_{NN}^{nádobá} + P_{NN}^{průtočné} \text{ [W]}$$