

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav techniky prostředí

CHARAKTERISTIKA PŘÍMO OHŘÍVANÉHO ZÁSOBNÍKU TEPLÉ VODY

Diplomová práce

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Langerová** Jméno: **Erika** Osobní číslo: **456755**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Technika životního prostředí**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Charakteristika přímo ohřivaného zásobníku teplé vody

Název diplomové práce anglicky:

Characteristics of Directly Heated Domestic Hot Water Tank

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši potenciálu přímo ohřivaných zásobníků pro kombinované využití při přípravě teplé vody a vytápění. K ověření provozních charakteristik přímo ohřivaných zásobníků teplem využijte matematickou simulaci. Zaměřte se na kombinaci odběrových profilů teplé vody charakteristických pro různé bytové objekty. Sestavte okrajové podmínky využití přímo ohřivaných zásobníků teplé vody v kombinovaném provozu přípravy teplé vody a vytápění.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ČSN EN 12831-3: Energetická náročnost budov - Výpočet tepelného výkonu - Část 3: Tepelný výkon pro soustavy teplé vody a charakteristika potřeb, Modul M8-2, M8-3. 1. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018,
[2] ČSN 06 0320 Tepelné soustavy v budovách. Příprava teplé vody - Navrhování a projektování. ČNI 2006,
[3] VAVŘIČKA, R. a kolektiv: Příprava teplé vody, Sešit projektanta č. 3. STP – OS 02 – Vytápění. Praha 2017, 182 s. ISBN 978-80-02-02713-3.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Roman Vavříčka, Ph.D., ústav techniky prostředí FS

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Roman Vavříčka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna 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 studentky

Anotační list

Jméno autorky:	Erika Langerová
Název:	Charakteristika přímo ohřivaného zásobníku teplé vody
Anglický název:	Characteristics of a Directly Heated Domestic Hot Water Tank
Akademický rok:	2020/2021
Studijní obor:	Technika prostředí
Ústav:	Ústav techniky prostředí
Vedoucí práce:	Ing. Roman Vavříčka, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stran: 122 počet obrázků: 29 počet grafů: 62 počet tabulek: 33 počet tištěných příloh: 4
Klíčová slova:	kombinovaná příprava teplé vody a vytápění, ohřivač, zásobník teplé vody, provozní charakteristiky, odběrové charakteristiky, nabíjecí charakteristiky, odběrové profily, numerická simulace, TRNSYS
Keywords:	combined DHW and space heating, heater, DHW storage tank, operational characteristics, draw-off characteristics, charging characteristics, draw-off profiles, numerical simulation, TRNSYS

Souhrn

Předmětem práce je analýza provozních a odběrových charakteristik vybraných přímo ohřivaných zásobníků zapojených v kombinovaném systému přípravy teplé vody a vytápění. Analýza je provedena s využitím simulačního nástroje TRNSYS. Pro zvolené okrajové podmínky jsou provedeny parametrické studie, jednorázové zátěžové testy trvalými průtoky teplé vody a celoroční testy odběrovými profily teplé vody. Na základě získaných výsledků jsou definovány okrajové podmínky využití přímo ohřivaných zásobníků v kombinovaných systémech ve vybraných objektech.

Summary

This diploma thesis aims at the analysis of operational and draw-off characteristics of selected directly heated DHW storage tanks used in combination heating systems. The analysis is performed using TRNSYS simulation tool. For the selected boundary conditions, parametric studies, single load tests with continuous DHW flow rates and year-round load tests with different DHW draw-off profiles are performed. Based on the results obtained, the boundary conditions for the use of directly heated storage tanks in combination heating systems in selected objects are defined.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Charakteristika přímo ohřivaného zásobníku teplé vody vypracovala samostatně pod vedením Ing. Romana Vavříčky, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

Dne v Dolních Břežanech

Podpis

Poděkování

Chtěla bych poděkovat Ing. Romanu Vavříčkovi, Ph.D. za vedení práce a cenné připomínky v průběhu psaní práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Vojtěchu Zavřelovi, Ph.D. za velice přínosné konzultace k simulacím v TRNSYSu a za pomoc s úpravou konceptu práce.

Obsah

Seznam značení	1
Seznam zkratk	3
1 Úvod	4
2 Konstrukční řešení ohřivačů a možnosti jejich zapojení	7
2.1 Konstrukční řešení plynových přímo ohřivaných zásobníků teplé vody	7
2.2 Typické zapojení ohřivačů pro kombinovaný systém	11
3 Postupy a nástroje pro návrh a vyhodnocení provozu ohřivače	13
3.1 Postupy pro návrh ohřivače do kombinovaného systému	13
3.2 Vliv pozice spínacího termostatu a objemu ohřivače na provoz	19
3.3 Postupy regulace provozu ohřivače a připojených systémů	21
3.4 Hodnocení charakteristik ohřivače	25
3.5 Přístupy k modelování ohřivačů a volba simulačního nástroje pro hodnocení provozu	29
4 Cíle a metodika vyhodnocení provozu ohřivače na základě simulací	33
4.1 Účel numerického modelu	33
4.2 Výzkumné otázky	33
4.3 Stanovení cílů	33
4.4 Simulované scénáře	34
4.5 Stanovení indikátorů	34
4.6 Postup simulací	35
5 Vývoj simulačního modelu	36
5.1 Vývoj základního modelu	36
5.2 Uvažovaná zjednodušení	43
5.3 Popis značení a odečtu veličin z numerického modelu	43
6 Popis scénářů	44
6.1 Scénář A: Ohřivač IR 12-160 v rodinném domě	44
6.2 Scénář B: Ohřivač IR 20-200 v bytovém domě	48
6.3 Scénář C: Ohřivač IR 32-380 v mycím centru	51
7 Ověření kvality modelů ohřivačů	54
8 Vyhodnocení provozu	59
8.1 Výsledky pro scénář A: ohřivač IR 12-160 v rodinném domě	59
8.2 Výsledky pro scénář B: ohřivač IR 20-200 v bytovém domě	73
8.3 Výsledky pro scénář C: ohřivač IR 32-380 v mycím centru	83
9 Diskuse	93
10 Závěr	95
Bibliografie	97
Přílohy	102

Seznam značení

A	teplosměnná plocha výměníku	[m ²]
A_{celkem}	celková plocha konstrukce	[m ²]
C	tepelná kapacita modulu budovy	[J/K]
E_{CELK}	celková spotřeba energie v budově	[Wh]
E_D	skutečně dodaná energie v teplé vodě	[Wh]
E_P	požadovaná energie v teplé vodě	[Wh]
E_{TV}	energie odebraná v teplé vodě	[Wh]
F	korekční faktor dle ASHRAE	[-]
H_T	součinitel prostupu tepla budovy	[W/K]
K	zesílení PI regulátoru	[-]
L	parametr odečtený z přechodové charakteristiky	[-]
$LMTD$	střední logaritmičtý teplotní spád	[-]
N_i	počet kontrolních objemů	[-]
NTU	počet přenosových jednotek	[-]
\dot{Q}_A	aktuální tepelná ztráta	[W]
\dot{Q}_N	jmenovitá tepelná ztráta	[W]
Q_{OH}	výkon ohřivače	[W]
$Q_{OH,max}$	jmenovitý výkon ohřivače	[W]
$Q_{OH,min}$	minimální stabilně dosažitelný výkon ohřivače	[W]
Q_{TV}	potřebný výkon pro přípravu teplé vody	[W]
Q_{VYT}	potřebný výkon pro vytápění	[W]
\dot{Q}_z	tepelné ztráty z ohřivače	[W]
R	podíl výkonu pro přípravu teplé vody a vytápění	[-]
R_V	poměr vnitřního a vnějšího poloměru vířiče	[-]
S	statická ztráta ohřivače	[W]
S_V	vírové číslo	[-]
TDR	modulační poměr	[-]
Ti	integrační konstanta PI regulátoru	[-]
U	součinitel prostupu tepla	[W/m ² K]
V	odebraný objem	[m ³]
V_{OH}	objem zásobníkového ohřivače	[m ³]
$V_{2,p}$	celková potřeba teplé vody za den	[m ³]

a	parametry odečtený z přechodové charakteristiky	[-]
c_p	měrná tepelná kapacita materiálu konstrukce	[J/kgK]
c_w	měrná tepelná kapacita vody	[J/kgK]
\dot{m}_C	hmotnostní průtok ve středu víříče	[kg/s]
\dot{m}_S	hmotnostní průtok přes lopatky víříče	[kg/s]
\dot{m}_V	poměr hmotnostních průtoků přes víříč	[-]
\dot{m}_w	hmotnostní průtok otopnou soustavou	[kg/s]
n	teplotní exponent	[-]
q_{TV}	průtok teplé vody	[l/min]
q_{SV}	průtok studené vody	[l/min]
q_{SM}	průtok smíšené vody	[l/min]
r_B	vnější poloměr víříče	[m]
r_C	vnitřní poloměr víříče	[m]
t_e	venkovní výpočtová teplota	[°C]
t'_e	aktuální venkovní teplota	[°C]
t_i	aktuální vnitřní teplota	[°C]
$t_{i,N}$	vnitřní výpočtová teplota	[°C]
t_{wm}	střední teplota otopné vody	[°C]
$t_{wm,N}$	střední teplota otopné vody za jmenovitých podmínek	[°C]
t_{SET}	teplota na spínacím termostatu	[°C]
t_{sm}	teplota smíšené vody	[°C]
t_{SV}	teplota studené vody	[°C]
t_{TV}	teplota teplé vody	[°C]
t_{w1}	teplota přívodní otopné vody – sekundární strana výměníku	[°C]
$t_{w1,N}$	návrhová teplota přívodní otopné vody – sekundární strana výměníku	[°C]
$t_{w1,prim}$	teplota přívodní vody z ohřivače – primární strana výměníku	[°C]
t_{w2}	teplota vratné otopné vody – sekundární strana výměníku	[°C]
$t_{w2,N}$	návrhová teplota přívodní otopné vody – sekundární strana výměníku	[°C]
$t_{w2,prim}$	teplota vratné vody do ohřivače – primární strana výměníku	[°C]
Z	poměrná ztráta tepla při ohřevu a distribuci	[-]

α	úhel natočení lopatky víříče	[°]
δ	tloušťka konstrukce	[m]
δt	aktuální teplotní spád otopné soustavy	[K]
δt_N	jmenovitý teplotní spád otopné soustavy	[K]
ε	termická účinnost	[-]
ϕ_{HL}	celková tepelná ztráta objektu	[W]
$\phi_{T,i}$	tepelná ztráta prostupem	[W]
$\phi_{V,i}$	tepelná ztráta větráním	[W]
φ	zatížení otopné soustavy	[-]
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W/mK]
ρ	hustota materiálu konstrukce	[kg/ m ³]
ρ_W	hustota vody v ohřivači	[kg/ m ³]
τ	čas	[s]
τ_{MAX}	maximální možná doba trvání odběrové špičky	[s]
$\sum \phi_{T,i}$	celková tepelná ztráta prostupem	[W]
$\sum \phi_{V,i}$	celková tepelná ztráta větráním	[W]
ΔQ_{MAX}	největší rozdíl energie mezi křivkami dodávky a odběru	[Wh]
ΔQ_S	dodaný výkon na úseku s maximálním sklonem	[Wh]
ΔT	rozdíl mezi teplotou teplé a studené vody	[°C]

Seznam zkratk

AM	automyčka (mycí centrum, modulární mycí boxy)
BD	bytový dům
RD	rodinný dům
SM	smíšená voda
SV	studená voda
TV	teplá voda

1 Úvod

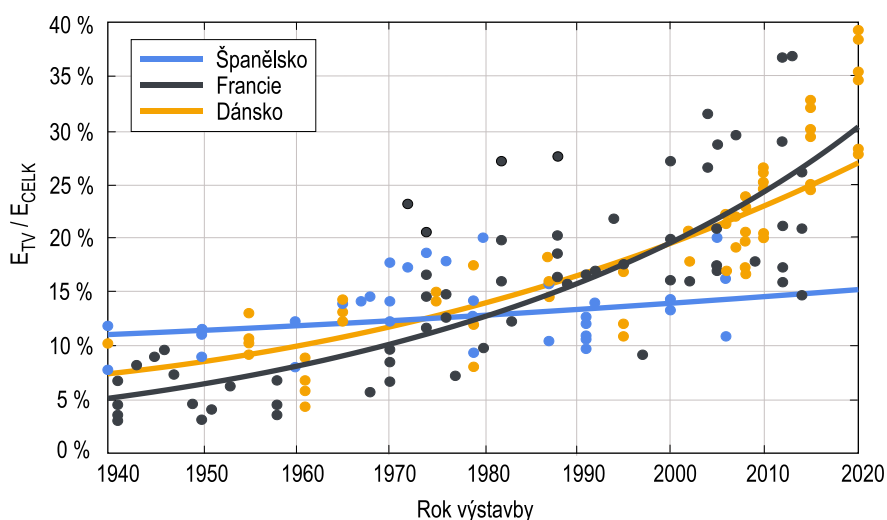
Předmětem diplomové práce je simulační analýza provozního chování přímo ohřivaného plynového zásobníku teplé vody. Analýza reaguje na současný trend zvyšování významu energetické náročnosti přípravy teplé vody a zkoumá alternativní způsob zapojení a provozu plynových zásobníkových ohřivačů.

Stávající trend snižování energetické náročnosti budov klade vysoké požadavky nejen na architektonicko-stavební řešení obálek budov, ale také na jejich technické systémy. V oblasti obytných budov se do popředí řešení energetické náročnosti dostávají zejména systémy vytápění a přípravy teplé vody, které tvoří většinový podíl na celkové spotřebě energie. Energetická náročnost systému vytápění je přímo závislá na tepelných ztrátách vytápěného objektu a podařilo se jí výrazně snížit zateplováním obálek stávajících budov, resp. zavedením přísnějších požadavků na tepelně–technické vlastnosti konstrukcí novostaveb a rekonstruovaných budov. Realizace úsporných opatření v rámci systémů přípravy teplé vody je podstatně obtížnější, protože jejich energetická náročnost závisí především na chování uživatelů a účelu použití dané budovy. Dopady provedených úsporných opatření nemají tak výrazný efekt na snížení energetické náročnosti jako v případě vytápění. V mnoha zemích navíc dochází k nárůstu spotřeby teplé vody, například Pomianowski [1] uvádí pro Dánsko 25 % nárůst spotřeby za posledních dvacet let, pro ČR uvádí Bertelsen [2] přibližně 10 % nárůst spotřeby v období mezi roky 2000 a 2015.

Zejména v případě novostaveb tvoří příprava teplé vody stále významnější podíl v celkové energetické bilanci objektu. Například Ivanko [3] uvádí, že zatímco ve sledovaných finských budovách postavených před rokem 2002 tvoří podíl energie pro přípravu teplé vody 24 až 30 % z celkové spotřeby energie, v případě kvalitně zaizolovaných novostaveb dosahuje tento podíl až 63 %. Podobný závěr uvádí také Pomianowski [1], který vyhodnocoval podíl energie pro přípravu teplé vody na celkové spotřebě energie objektů v Dánsku, Francii a Španělsku. Výsledky vyhodnocení jsou zobrazeny na Grafu 1 níže. Z grafu je jasně patrný trend nárůstu významu energetické náročnosti přípravy teplé vody v novostavbách.

Je možné předpokládat, že s výstavbou nových domů v souladu se zpřísněnými požadavky na součinitele prostupu tepla a narůstajícím počtem dodatečně zateplených starších domů bude trend snižování energetické náročnosti systémů vytápění společně s trendem nárůstu významu systémů přípravy teplé vody dále pokračovat. Vzhledem k tomuto vývoji vznikají příležitosti pro nové postupy, aplikace a koncepty zapojení zařízení určených pro přípravu teplé vody.

V rámci této práce je řešen alternativní způsob zapojení plynového ohřivače do systému kombinované přípravy teplé vody a vytápění. Koncept kombinovaného systému představený v této práci přistupuje k řešení jinak než tradiční návrhy a do určité míry upřednostňuje přípravu teplé vody před vytápěním.



Graf 1 – Nárůst podílu energie pro přípravu teplé vody vzhledem k celkové spotřebě energie v budovách, na základě [1]

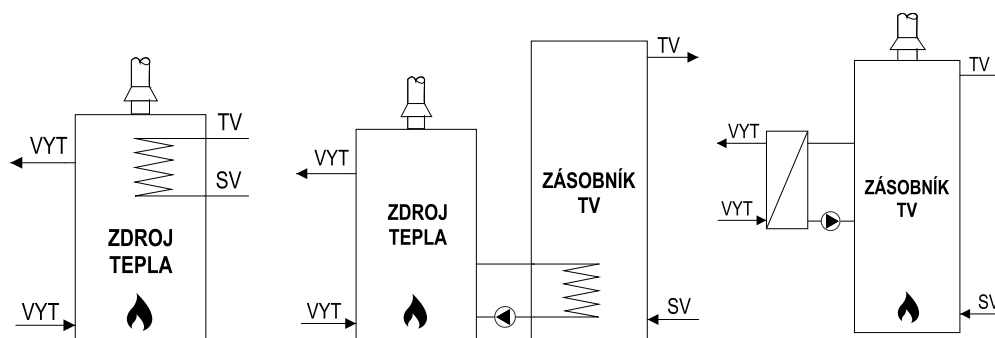
Zdroj tepla v klasickém kombinovaném systému dodává energii do vytápění přímo a teplou vodu připravuje nepřímo buď průtočně nebo přes nepřímo ohříváný zásobník teplé vody viz Obr. 1 vlevo a uprostřed. Sídlení tepla mezi zdrojem a zásobníkem probíhá prostřednictvím integrovaného nebo externího výměníku tepla. Pracovní kapalinou je otopná voda, zdrojem tepla může být v případě méně náročných aplikací například tepelné čerpadlo, pro náročnější aplikace lze využít například plynový kotel, jak je naznačeno na obrázcích. Tyto kombinované systémy jsou běžně využívány, ale koncept jejich návrhu v podstatě stále vychází z předpokladu, že energeticky náročnějším systémem je vytápění. V běžně zavedené praxi je zdroj tepla navrhován primárně podle potřeb systému vytápění.

Systém řešený v rámci této práce využívá jako zdroj tepla přímo ohříváný zásobník teplé vody. Teplá voda je dodávána z přímo ohříváného zásobníku přímo a tepelná energie do systému vytápění nepřímo prostřednictvím externího deskového výměníku. Z popisu je zřejmé, že pracovní kapalinou v primárním okruhu vytápění musí být teplá voda. Schéma zapojení je naznačeno na Obr. 1 vpravo.

Uvedený alternativní koncept zapojení není v tuzemských podmínkách plošně rozšířen a informace k jeho návrhu, provozu a regulaci je nutné dohledávat v zahraniční literatuře. Poprvé byl ve větším měřítku představen na počátku 90. let v Kanadě a Americe. Jak uvádí kanadský standard *P/G-08-02-PLBG/GAS* [4] ohřivače zapojené v kombinovaném systému měly původně sloužit pouze jako záložní zdroje k primárnímu zdroji tepla, případně jako hlavní zdroje tepla pro objekty s malou potřebou tepla na vytápění. K jejich většímu rozšíření výrazně přispěl trend zateplování a výstavby energeticky úspornějších budov. Uvedený koncept zapojení získal v Kanadě popularitu zejména díky snadné instalaci a malým nárokům na obestavěný prostor. Jak uvádí Prybyš [5] smysluplnost použití tohoto zapojení narůstá zejména v případech, kdy má objekt nízké tepelné ztráty a většinu roku jej není nutné vytápět.

Tento koncept zapojení ohřivače by teoreticky mohl představovat výhodnější alternativu k dosud používaným systémům, nicméně pro zhodnocení jeho přínosů prozatím chybí podrobná data z laboratorních a provozních měření. V zahraniční literatuře je dostupnost informací také velmi omezená, zejména co se týká praktických zkušeností a provozních měření. Zmíněný nedostatek informací je motivací k podrobnějšímu rozboru tématu. V rámci této práce je rozbor proveden formou rešerše dostupných podkladů a následně formou simulační analýzy provozního chování ohřivače zapojeného do řešeného systému. Postupy a principy popsané v rešeršní části práce jsou využity v pomocných výpočtech pro simulační analýzu.

Simulační analýza se zaměřuje na zhodnocení provozních a odběrových charakteristik ohřivače při současné dodávce tepelné energie pro přípravu teplé vody a vytápění. Simulační analýza má dva hlavní cíle, prvním je získání obecné představy o provozní charakteristice ohřivače při současné dodávce energie do obou připojených systémů, druhým je definování limitního zatížení ohřivače. Výstupy z této práce mohou být využity pro předběžné zhodnocení možných přínosů a hranic použití tohoto systému. Do budoucna by bylo vhodné simulační analýzu rozšířit o laboratorní a provozní měření.



Obr. 1 Vytápění a nepřímá příprava TV vlevo a uprostřed, přímá příprava TV a vytápění nepřímo vpravo

Vzhledem k trendu dekarbonizace sektoru budov, omezování využití neobnovitelných zdrojů energie a skutečnosti, že ohřívač řešený v rámci této práce využívá jako zdroj energie zemní plyn, je nutné obhájit přínos navrženého řešení v delším časovém horizontu.

Co se týče současného stavu a střednědobého výhledu, spotřebiče využívající zemní plyn a distribuční sítě zemního plynu jsou považovány za velmi důležitého prostředníka pro postupný přechod k zásobování budov dekarbonizovanými plyny. Desetiletý plán rozvoje plynárenské soustavy ČR počítá s rozvojem plynárenské sítě a jejím sblížením s elektroenergetickou sítí, tzv. sector couplingem, prostřednictvím koncepce P2G, ve kterém tvoří plynové spotřebiče klíčovou složku. Principem sector couplingu v konceptu P2G je využití nadbytků elektrické energie z obnovitelných zdrojů pro elektrolýzu vody, získání vodíku a jeho využití v plynárenských sítích.

Ve *Vnitrostátním plánu České republiky v oblasti energetiky a klimatu* [6] je uvedeno, že do budoucna by bylo vhodné udržet plynárenskou distribuční síť uzpůsobenou k využití jak zemního plynu, tak zelených dekarbonizovaných plynů, přičemž distribuční síť zemního plynu by se postupně měla připravit na vyšší podíl dekarbonizovaných plynů. Co se týče současného stavu, prozatím se jako realizovatelná cesta implementace konceptu P2G jeví přimíchávání vodíku do rozvodů zemního plynu. S přimícháváním vodíku do zemního plynu začalo ve velkém měřítku Německo, Francie a Velká Británie, s cílem dosáhnout až 20 % podílu vodíku v zemním plynu [7]. ČR byla zařazena mezi země s vysokým potenciálem pro realizaci přimíchávání vodíku do sítí zemního plynu a v současné době je aktivně řešena legislativa upravující pravidla pro dosažení jednotného podílu přimíchaného vodíku s ostatními státy Evropské unie.

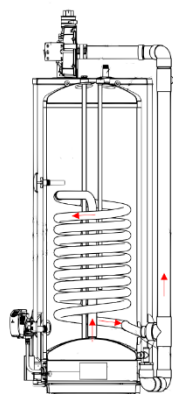
Pro přechodné období se v členských státech EU v rámci plánu dekarbonizace počítá s využitím stávajících rozvodů zemního plynu, s přimícháváním dekarbonizovaných plynů do zemního plynu (injektáž vodíku) a ve střednědobém výhledu se souběžným provozem distribuční sítě zemního plynu a distribuční sítě dekarbonizovaných plynů (vodík, syntetický methan, biomethan). Z výše uvedeného vyplývá, že systémy využívající zemní plyn mají budoucnost v rámci národních i evropských strategických plánů. Věnovat se jejich optimalizaci má ze střednědobého hlediska význam.

2 Konstrukční řešení ohřivačů a možnosti jejich zapojení

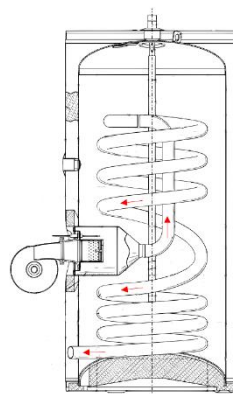
Navazující kapitoly jsou věnovány rozboru konstrukčních řešení plynových ohřivačů pro kombinovaný systém, metodikám jejich návrhu a možnostem regulace jejich provozu. Závěrem je uveden přehled přístupů k vyhodnocení provozních a odběrových charakteristik ohřivačů vody, jsou shrnuty přístupy k modelování ohřivačů a je představen simulační program zvolený pro řešení praktické části práce.

2.1 Konstrukční řešení plynových přímo ohřívaných zásobníků teplé vody

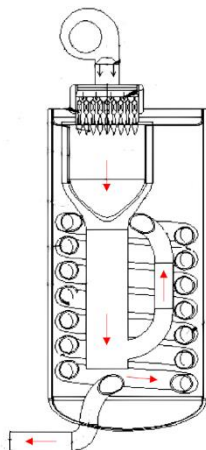
V práci jsou řešeny přímo ohřívání plynové zásobníkové kondenzační ohřivače teplé vody. Plynové kondenzační ohřivače se standardně skládají ze spalovací komory, hořáku, výměníku, ventilátoru a samotného zásobníku teplé vody s magneziovou anodou pro ochranu vnitřních povrchů zásobníku proti korozi. Konstrukční uspořádání ohřivačů se liší v závislosti na výrobci, nicméně všechny mají několik společných znaků. Kondenzační ohřivače mají oproti klasickým plynovým zásobníkovým ohřivačům zvětšenou teplosměnnou plochu výměníku. Odlišný je také směr proudění spalin. V klasických zásobníkových ohřivačích dochází ke spalování plynu ve spodní části ohřivače, proudění spalin výměníkem směrem vzhůru a odvodu ochlazených spalin do kouřovodu. V kondenzačních ohřivačích jsou spaliny vedeny obousměrně a do kouřovodu jsou odváděny ze spodní části ohřivače, jak je naznačeno na Obr. 2 až 5 z patentů Qiu a [8], Abdel-Rehima [9] a Knoepela [10]. Toto uspořádání má přispět k zajištění lepších podmínek pro práci v kondenzačním režimu. Pro zajištění kondenzace je nutné spaliny ochladit pod teplotu rosného bodu vodní páry, která je v nich obsažená, k čemuž prodloužená dráha průchodu spalin výměníkem přispívá.



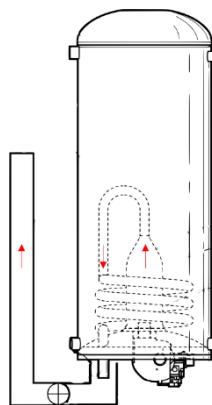
Obr. 3 Řešení se spalovací komorou ve spodní části, patent US 2019/0242620 A1 [10]



Obr. 2 Řešení se spalovací komorou v polovině výšky ohřivače, patent US 8763564 B2 [9]



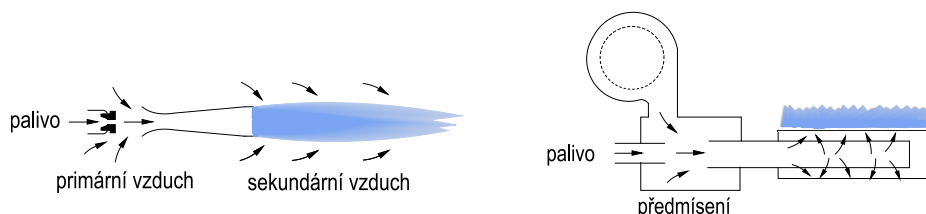
Obr. 5 Řešení se spalovací komorou ve vrchní části, patent US 9568213 B2 [8]



Obr. 4 Řešení se spalovací komorou ve spodní části, patent US 2019/0242620 A1 [10]

Výměníky jsou častým předmětem optimalizačních změn, a to jak z hlediska konstrukce, tak z hlediska použitých materiálů. Jejich optimalizaci se věnoval například Pescatore [11]. Jak uvedl ve své práci, výměník během provozu prochází neustálými cykly kondenzace a vysušování, a tudíž je značně tepelně namáhán. Příčinou cyklů kondenzace a vysušování jsou změny teploty vody v ohřivači. Teplota vody se v závislosti na provozních podmínkách může měnit v rozsahu přibližně od 45 do 85 °C. Vnitřní i vnější povrchy výměníku jsou proti korozi chráněny smaltováním. Pokud je provedeno nevhodně, může dojít k porušení ochranné vrstvy smaltu a korozi výměníku. Před uvedením na trh prochází vzorek ohřivače několik měsíců zátěžovými testy, které simulují podmínky reálného provozu. Z hlediska výměníku se sleduje odolnost vnitřních povrchů proti korozi a odolnost vnější ochranné vrstvy smaltu proti poškození. Jak uvedl Pescatore [11] konstrukčně nejrizikovějším místem je přechodová oblast mezi spalovací komorou a výměníkem tepla.

Co se týče spalovacího procesu, současné kondenzační zásobníkové ohřivače využívají technologii spalování s předmíchanou (premixed) směsí. Premixové spalovací zařízení je uspořádáno tak, že k plnému promísení zemního plynu se spalovacím vzduchem dochází ještě před vstupem do spalovací komory hořáku. Samotný proces hoření je rychlejší než u atmosférických hořáků a hořáků spalujících částečně předmísené směsi. Vzhledem k vysoké tlakové ztrátě při průchodu směsi plynu a spalovacího vzduchu, případně spalin, je nutná instalace ventilátoru. Jak uvádí Schiro [12], optimálně navržené hořáky spalující předmíchané směsi se obecně vyznačují vyšší rychlostí hoření a nižší produkcí emisí než atmosférické hořáky nebo hořáky spalující částečně předmísené směsi. Optimalizaci spalovacího procesu a vývoji v konstrukčním řešení spalovacího zařízení je věnována velká pozornost zejména z hlediska požadavku na nízkoemisní provoz. Rozdíl v principu práce hořáku s částečným a plným předmísením je schematicky znázorněn na Obr.6 níže.



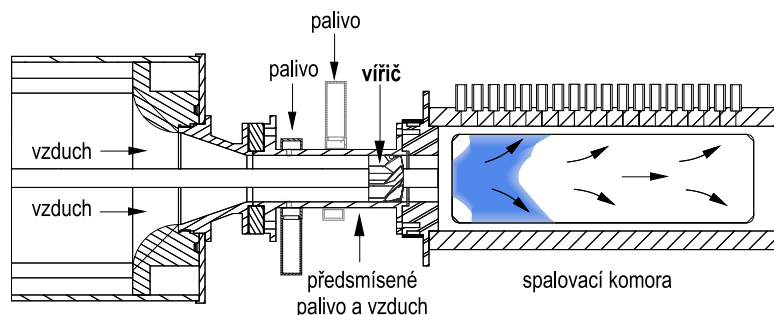
Obr. 6 – Plné předmísení vpravo a částečné předmísení vlevo na základě [13]

Proces spalování lze optimalizovat úpravou vlastností spalované směsi případně konstrukčními úpravami spalovacího prostoru. Rozboru optimálních vlastností spalované směsi pro premixové hořáky se věnoval například Raleigh [13] a Bethold [14]. Z rozboru vyplynulo, že pro optimální provoz je zásadní volba poměru mezi množstvím paliva a spalovacího vzduchu. Z hlediska produkce emisí je optimální spalování chudých směsí, tzn. směsí s vysokým přebytkem vzduchu, typicky $\geq 20\%$. Při spalování těchto směsí vzniká chladnější plamen než při spalování bohatých směsí, což se pozitivně projevuje na nižší produkci emisí NO_x a CO. Bethold [14] ve své práci uvádí, že vyprodukované emise NO_x se typicky pohybují pod hodnotou 45 mg/kWh. V případě modelů ohřivačů simulovaných v praktické části této práce se produkce emisí NO_x dle výrobce [15] pohybuje od hodnoty 22 mg/kWh do hodnoty 37 mg/kWh pro výkonově nejmenší, resp. největší model při provozu na maximální tepelný výkon. Pro chudé směsi jsou typické vysoké rychlosti hoření a nízká doba setrvání v pásmu vysokých teplot, což se pozitivně projevuje na vyšší účinnosti spalování. Pro plamen je charakteristická modrá barva a krátký dosah.

Problémem spalování chudých směsí může být riziko vzniku problémů se zážehem a nestabilita plamene při hoření, proto je nutné využívat hořáky s upravenou konstrukcí. Konstrukční úpravy spočívají v integraci vířičů do těla hořáku. Podrobný popis principu funkce a konstrukce vířičů je možné dohledat v patentových zprávách, často citovaný je například patent Chenga [16]. Vířiče slouží primárně ke stabilizaci plamene. Stabilní plamen je charakteristický stálou polohou čela plamene vzhledem k ústí hořáku, stálou

délkou a rovnoměrným tvarem. V průmyslu jsou široce rozšířené vířiče s vysokým vírovým číslem, které stabilizují plamen mechanismem recirkulace. Pro zásobníkové ohřivače se tyto vířiče nevyužívají a stabilizace plamene je dosaženo jiným mechanismem. Využívají se vířiče s nízkou hodnotou vírového čísla, tzv. Low Swirl Burners (LSB). Vířiče se instalují před ústí spalovací komory do proudu směsi paliva a vzduchu, jak je naznačeno na schématu podle Hubera [17] na Obr. 7.

Ve spalovací komoře generují vířiče turbulentní proud, jehož průřez se směrem od ústí do spalovací komory rovnoměrně rozšiřuje. S rovnoměrně se rozšiřujícím průřezem zároveň rovnoměrně klesá střední rychlost proudu. Plamen se začíná šířit proti proudu směsi a stabilizuje se v místě, ve kterém se místní rychlost proudu směsi vyrovná s rychlostí hoření. Rychlost hoření představuje rychlost chemických reakcí probíhajících při spalování.



Obr. 7 – Použití vířiče, konstrukční schéma na základě [17], schéma proudu doplněno

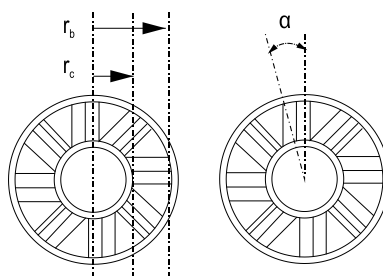
Hodnota vírového čísla charakterizuje turbulentní proudění, které je vířič schopný generovat a slouží pro porovnávání jednotlivých vířičů mezi sebou. Vztahy pro výpočet vírového čísla na základě známé geometrie vířiče a hmotnostního průtoku přes vířič je možné dohledat v odborné literatuře, uvádí jej například autoři Yegian [18] nebo Rapp [19], vztah podle Rapp [19] je uveden níže

$$S_v = \frac{2}{3} \tan \alpha \frac{1 - R_v^3}{1 - R_v^2 + \left[m_v^2 \left(\frac{1}{R_v^2 - 1} \right)^2 \right] R_v^2} \quad (1)$$

$$R_v = \frac{r_c}{r_b} \quad (2)$$

$$m_v = \frac{m_c}{m_s} \quad (3)$$

kde α , r_c a r_b jsou geometrické charakteristiky podle Obr. 8, m_c je hmotnostní tok ve středu kanálu a m_s je hmotnostní tok přes lopatky vířiče. Za vířiče s nízkou hodnotou vírového čísla jsou dle Rapp [19] považovány takové, které mají vírové číslo $S_v < 0,6$.



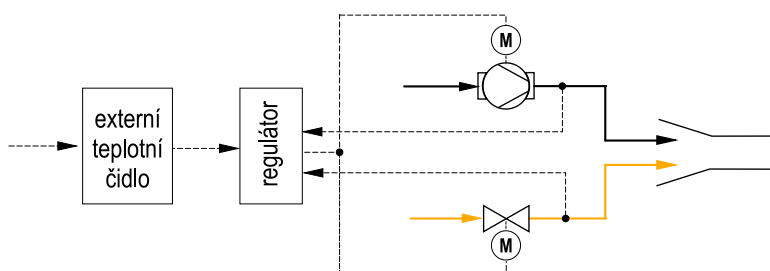
Obr. 8 – Geometrie vířiče dle [19]

Využití hořáků s nízkým vírovým číslem má zásadní význam pro kondenzační ohřivače. Protože se plamen stabilizuje na vhodném místě v závislosti na aktuálních podmínkách spalovacího procesu, není nutné řešit omezení spojená s umístěním zapalovací elektrody. Podle Yegiana [18] mohou být reaktanty zapáleny jak z vrchu, tak ze strany, a to bez negativního vlivu na stabilitu plamene. Z konstrukčního hlediska ohřivače to poskytuje větší variabilitu v možnostech umístění výměníku tepla vůči hořáku. Toho se často využívá u kondenzačních ohřivačů, které pak mohou mít výměník umístěný například pod hořákem jak je patrné z patentované konstrukce na Obr.4.

Jak uvádí Cheng [16], výhodou spalování v hořácích s nízkým vírovým číslem je skutečnost, že plamen hoří ve vznosu a není v přímém kontaktu s vnějším povrchem hořáku. Díky tomuto mechanismu hoření je vnější povrch hořáku méně teplotně namáhán. Pro ochranu povrchu hořáku se využívá zejména povlakování, jehož rozboru se věnoval například George [20]. Ten uvádí, že hořáky klasických plynových ohřivačů se zpravidla ochraňují keramickými povlaky. Jejich použití pro hořáky kondenzačních ohřivačů je naprosto nevhodné kvůli riziku vzniku koroze, a proto se používá pouze kovové povlakování.

Pro plynové ohřivače v kombinovaných systémech je zásadní schopnost modulovat výkon v závislosti na aktuálních požadavcích obou připojených systémů. Regulátory modulačních hořáků jsou schopny plynule regulovat množství přiváděného spalovacího vzduchu a paliva a tím měnit dodávaný tepelný výkon. Návrhu konceptu regulace modulačních hořáků se věnoval například Maiello [21] a Smelcer [22]. Koncept zapojení podle Maiella [21] je schematicky naznačen na Obr. 9 níže. Regulace přiváděného množství pracovní látky je realizována prostřednictvím ventilu se servopohonem na straně plynu a plynulou změnou otáček ventilátoru na straně vzduchu. Regulátor zároveň dostává zpětnou vazbu o průtoku vzduchu a plynu a generuje řídicí signál v závislosti na odchylce aktuální a požadované teploty na externím teplotním čidle. Externím teplotním čidlem může být čidlo pokojové teploty nebo venkovní čidlo, pokud je navržena ekvitermní regulace. V případě zapojení ohřivače do kombinovaného systému přípravy teplé vody a vytápění by regulátor měl mít ještě informaci o požadavcích ze strany přípravy teplé vody, což ve schématu podle Maiella [21] není zachyceno.

Schopnost modulace je charakterizována modulačním poměrem, který udává poměr mezi maximálním a minimálním dosažitelným výkonem hořáku. Smelcer [22] uvádí, že se modulační poměr u běžných modelů pohybuje okolo hodnot 4:1 v případě jednostupňových hořáků, v případě dvoustupňových hořáků může dosahovat až hodnot 25:1. Podle Maiella [21] jsou na trhu běžně dostupné hořáky s modulačními poměry 2:1, 3:1, 4:1, 5:1, 10:1, 12:1, 15:1, 18:1, 20:1, 25:1, 30:1, 40:1 a 50:1. Vyšší modulační poměr klade vyšší nároky na regulaci a konstrukci zařízení, což se ve výsledku odráží na vyšší pořizovací ceně ohřivače. Ohřivače řešené simulačně v praktické části práce mají spalovací komoru umístěnou ve vrchní části. Jsou vybaveny modulačním premixovým hořákem. Modulace je realizována prostřednictvím ventilátoru s proměnnými otáčkami a prostřednictvím plynového regulačního ventilu. Do simulačního modelu v praktické části práce je nezbytné schopnost modulace výkonu navrhnout.

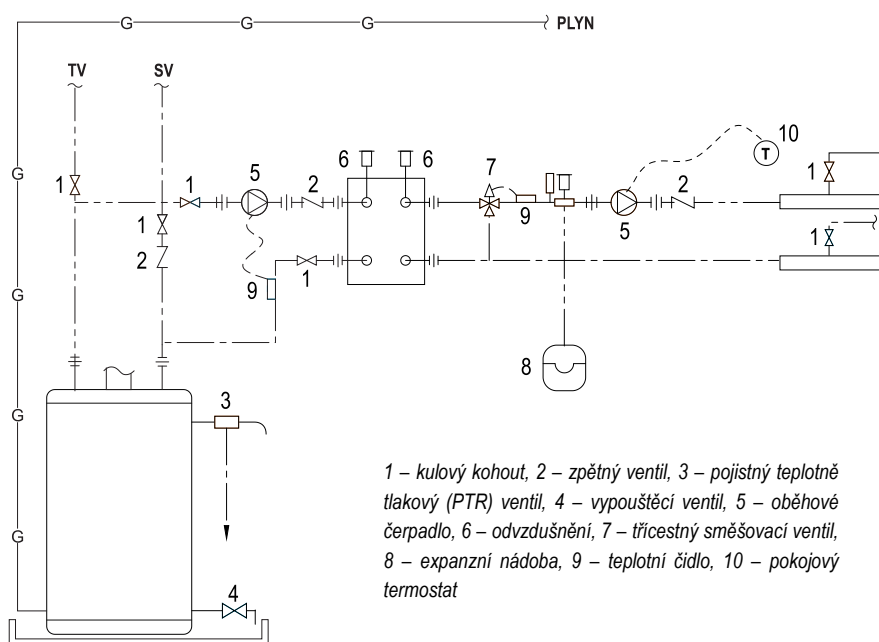


Obr. 9 –Princip modulace schematicky, koncept na základě [21]

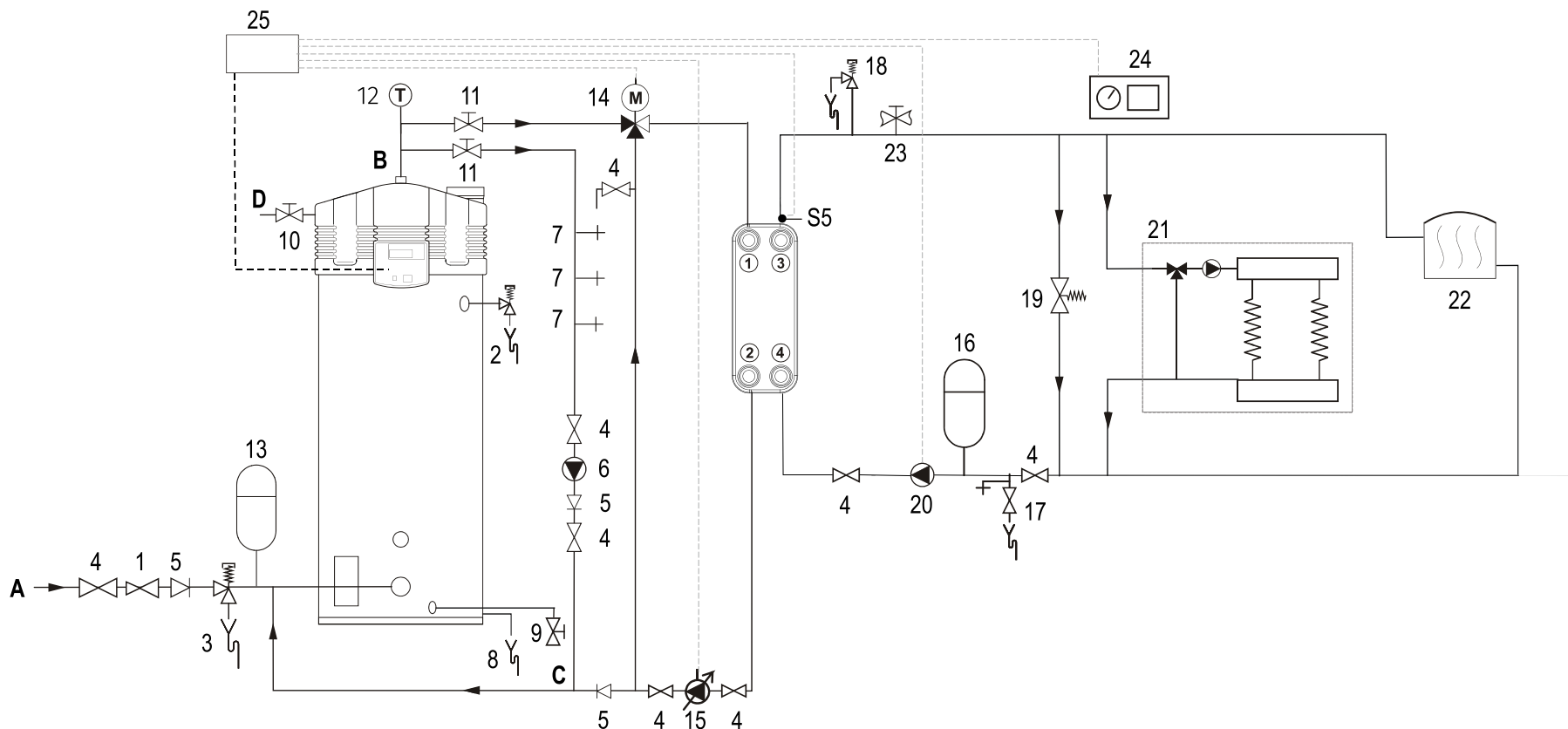
2.2 Typické zapojení ohřivačů pro kombinovaný systém

Normu, která by poskytovala doporučení k zapojení ohřivače do řešeného kombinovaného systému, se nepodařilo dohledat. V Kanadě byl k dispozici standard *P/G-08-02-PLBG/GAS-Requirements for combination heating systems: dual purpose water (potable) heater combo unit* [4], který shrnoval technické a hygienické požadavky na zapojení ohřivačů do řešeného kombinovaného systému. Jeho platnost skončila v roce 2012 a od té doby nebyl aktualizován. Doporučení k zapojení je nutné hledat přímo u výrobců ohřivačů. Mezi výrobci existují v současnosti dva přístupy k zapojení: první vychází z doporučení ve výše zmíněném standardu, druhý se od něj odlišuje přístupem k regulaci teploty vody v primárním okruhu vytápění.

Jak bylo uvedeno v úvodu, ohřivač je v řešeném systému zapojen tak, že dodává energii pro přípravu teplé vody přímo a pro vytápění nepřímo prostřednictvím deskového výměníku. V primárním okruhu systému vytápění cirkuluje teplá voda, v sekundárním okruhu otopná voda. Protože jsou systémy vytápění a přípravy teplé vody provozovány na různých teplotních úrovních, je nutné regulovat teplotu výstupní vody z ohřivače. První přístup k zapojení vychází z výše uvedeného kanadského standardu a doporučuje zařadit směšování na požadovanou teplotu až v sekundárním okruhu systému vytápění. Tento způsob zapojení doporučuje například společnost Fortis [23], schéma zapojení je uvedeno na Obr. 10 níže. Druhou variantou zapojení se směšováním v primárním okruhu systému vytápění doporučuje například společnost AO Smith [24], schéma zapojení je zobrazeno na Obr. 11 na následující straně. Ani jeden z uvedených výrobců neuvádí důvod, proč volí zrovna tyto způsoby zapojení a jaké to přináší výhody. Domnívám se, že druhý způsob zapojení může být výhodnější v případě, že je systém vytápění provozován na výrazně nižších teplotách než jakých dosahuje výstupní teplá voda z ohřivače. Předsmísení teplé vody v primárním okruhu může přispět ke snazší regulaci teploty otopné vody v sekundárním okruhu. Pro obě schémata platí, že ohřivač není zapojen pro přednostní přípravu teplé vody. V případě potřeby dodává energii pro vytápění a přípravu teplé vody současně, což je zásadní rozdíl oproti klasickým kombinovaným systémům s plynovými kotli, které pracují výhradně v režimu přednostní přípravy TV. Je nutné zmínit, že Obr. 10 a 11 nepředstavují kompletní projekční schémata, jedná se pouze o ideová schémata zapojení. Například na výstupu teplé vody z ohřivače v obou případech chybí ochrana proti opaření např. ve formě termostatického směšovacího ventilu teplé vody, kterou české normy v případě použití plynových zásobníkových ohřivačů vyžadují.



Obr. 10 – Ideové schéma zapojení dle Fortis [23]



1 – redukční ventil, 2 – pojistný teplotně tlakový (PTR) ventil, 3 – pojistný ventil, 4 – kulový kohout, 5 – zpětný ventil, 6 – cirkulační čerpadlo TV, 7 – odběrná místa TV, 8 – odvod kondenzátu, 9 – vypouštěcí ventil, 10 – plynový ventil, 11 – uzavírací servisní ventil, 12 – teploměr, 13 – expanzní nádoba studené vody, 14 – motorický třicestný směšovací ventil, 15 – oběhové čerpadlo s plynule řízenými otáčkami, 16 – expanzní nádoba otopné vody, 17 – vypouštěcí ventil, 18 – pojistný ventil, 20 – oběhové čerpadlo, 21 – okruh podlahového vytápění, 22 – okruh deskových otopných těles, 23 – napouštěcí ventil, 24 – regulátor vytápění, 25 – nadřazený regulátor, A – přívod studené vody, B – výstup teplé vody, C – cirkulace, D – přívod plynu, POZN. Číslování bylo oproti zdrojovému schématu upraveno tak, aby na sebe chronologicky navazovalo

Obr. 11 – Ideové schéma zapojení, přejato a přeloženo z AO Smith [24]

Z konceptů zapojení přímo vyplývají nároky na návrh ohřívače, na návrh obou připojených systémů a na návrh regulace. Z hlediska návrhu ohřívače jsou zásadní požadavky na zajištění optimálního provozu a požadavky na dodržení uživatelského komfortu. Optimálním provozem je u plynových ohřívačů myšleno zejména omezení počtu startů za rok a omezení cyklování, což přispívá k zajištění jejich delší životnosti. Zajištěním uživatelského komfortu je z hlediska teplé vody myšleno dodání dostatečného množství teplé vody o požadované teplotě a z hlediska vytápění udržení požadované teploty ve vytápěném prostoru. Vytápění je řešeno nepřímo přes deskový výměník, který musí být navržen tak, aby byl výkon dodávaný ohřívačem schopný přenést za všech provozních podmínek. Pro optimální provoz je také nezbytné správně zvolit regulační strategii. Regulovat je nutné provoz ohřívače a dodávku tepelného výkonu do obou připojených systémů.

Dále je nezbytné zamezit úplné stagnaci teplé vody v primárním okruhu systému vytápění. To se týká provozních stavů mimo otopné období, kdy je oběhové čerpadlo primárního okruhu vytápění vypnuto. Zamezení dlouhodobé stagnaci lze řešit regulačně zařazením funkce proplachu, která zajišťuje pravidelné spouštění oběhového čerpadla i mimo otopné období nebo uzavřením a vypuštěním primárního okruhu po dobu mimo otopné období.

V následujících kapitolách je nejdříve rozebrána metodika návrhu objemu a výkonu ohřívače pro kombinovaný systém, dále možnosti regulace ohřívače i připojených systémů a řešení hygienických rizik při provozu.

3 Postupy a nástroje pro návrh a vyhodnocení provozu ohřívače

Správně navržený ohřívač musí být schopen dodávat energii do obou připojených systémů, a to bez zbytečného předdimenzování. V práci není uvažováno s přednostní přípravou teplé vody, tzn. v případě potřeby musí být ohřívač schopen dodat dostatek energie do obou systémů současně.

Při návrhu ohřívače je nutné zohlednit odlišnost požadavků na ohřívač z pohledu přípravy teplé vody a z pohledu vytápění. Zatímco potřeba tepla pro vytápění je závislá zejména na klimatických podmínkách, tepelně-technických vlastnostech konstrukcí budovy a tepelných ziscích, potřeba tepla pro přípravu teplé vody závisí především na chování uživatelů a na účelu používání budovy. Pro systémy přípravy teplé vody jsou zpravidla charakteristické nepravidelné a nerovnoměrné odběry teplé vody v průběhu dne. Typické jsou krátké, ale energeticky náročné odběry vystřídané úseky bez odběru energie z ohřívače. Teplá voda musí být zpravidla dodávána celoročně bez přerušení a zdroj tepla musí být dimenzován na pokrytí odběrových špiček. Teplota teplé vody v zásobníku musí být zdola omezena z důvodů rizika vzniku a šíření bakterie *Legionella pneumophila*.

3.1 Postupy pro návrh ohřívače do kombinovaného systému

Z požadavků na ohřívač vyplývají nároky na jeho výkon a objem. V ČR v současné době neexistuje metodika zaměřená přímo na návrh ohřívače do řešeného systému. Dostupné metodiky návrhu výkonu společného zdroje tepla předpokládají zapojení v tradičních kombinovaných systémech, kdy je výkon dodáván přímo do vytápění a nepřímo pro přípravu teplé vody. Je nutné vyjít z doporučení ze zahraničí. Rešerši metodik návrhu výkonu ohřívače pro řešený kombinovaný systém přehledně uvedl Verhaert [25]. Jeho práci doplňuje metodika doporučovaná v Ashrae [26]. Souhrnem lze uvést, že k návrhu výkonu ohřívače zná praxe následující přístupy:

- Návrh prostým součtem
- Návrh z maxima
- Návrh s korekcí

Návrh výkonu ohřivače prostým součtem znamená sečíst dílčí výkony potřebné pro vytápění a pro přípravu teplé vody podle vzorce (4). Verhaert [25] tuto metodu nedoporučuje a zmiňuje ji pouze pro úplnost, protože v naprosté většině případů vede k předimenzování. Dílčí výkony pro přípravu teplé vody a vytápění jsou určeny pro jmenovité návrhové podmínky. Ty zejména v případě vytápění nastávají pouze výjimečně během pár dní otopného období. Návrh výkonu a objemu ohřivače pro přípravu teplé vody zase počítá s rezervou na nestandardní odběry, které nutně nemusí nastat. Pro kondenzační ohřivače je předimenzování naprosto nevhodné, protože zvyšuje pravděpodobnost nutnosti práce mimo kondenzační režim. Verhaert [25] uvádí, že v belgické praxi byla dříve běžně používána, nicméně v posledních letech se od ní ustupuje právě z důvodů uvedených výše. Pro návrh je vhodnější využít některou z dále uvedených metodik.

$$Q_{OH} = Q_{VYT} + Q_{TV} \quad (4)$$

Metoda návrhu výkonu z maxima vychází z belgických standardů, které doporučují určit výkon kombinovaného ohřivače jako maximum z dílčích výkonů potřebných pro vytápění a přípravu teplé vody podle vzorce (5):

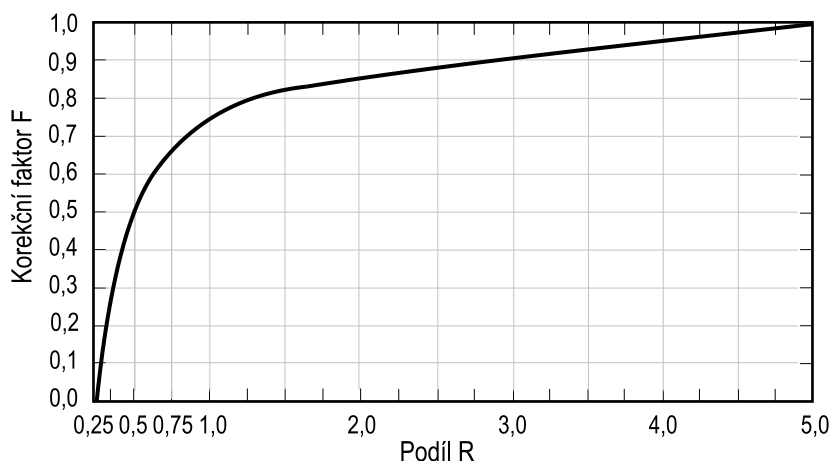
$$Q_{OH} = \max(Q_{VYT}, Q_{TV}) \quad (5)$$

Verhaert [25] uvádí, že tato metodika návrhu výkonu dává dobré výsledky v případě, že jsou dílčí výkony pro vytápění a přípravu teplé vody výrazně odlišné. V případě, že jsou přibližně stejně velké dochází relativně často k problémům s nedostatečnou dodávkou energie. Určitý kompromis mezi výše uvedenými přístupy nabízí metodika návrhu s korekcí popsána v Ashrae [26]. V té je doporučeno určit samostatně výkon potřebný pro přípravu teplé vody Q_{TV} , dále výkon potřebný pro vytápění Q_{VYT} a následně určit jejich podíl podle vzorce (6) níže:

$$R = \frac{Q_{TV}}{Q_{VYT}} \quad (6)$$

Podle zjištěné hodnoty R je nutné z Grafu 2 odečíst korekční faktor F, který slouží ke korekci výkonu potřebného pro přípravu teplé vody Q_{TV} . Celkový výkon ohřivače se poté určí součtem výkonu pro vytápění a korigovaného výkonu pro přípravu teplé vody podle vzorce (7):

$$Q_{OH} = Q_{VYT} + F \cdot Q_{TV} \quad (7)$$



Graf 2 Návrhový graf pro kombinované ohřivače podle Ashrae [26]

Ani jedna ze zmíněných metodik dostatečně důrazně neupozorňuje na nutnost zohlednit při návrhu možnosti připojeného zdroje tepla. Zejména v případě plynových ohřivačů řešených v rámci této práce je

omezujícím prvkem modulační rozsah hořáku. Vliv modulačního rozsahu a vliv pozice spínacího termostatu na návrh a provozní stavy je podrobněji rozebrán dále v práci. Co se týče určení dílčích výkonů pro vytápění Q_{VYT} a přípravu teplé vody Q_{TV} , musí být vypočteny v souladu s platnými normami.

Určení dílčího výkonu pro vytápění

Návrhový výkon pro vytápění musí být minimálně roven výkonu potřebnému pro krytí celkové tepelné ztráty objektu určené v souladu s normou ČSN EN 12831-1. Podrobný přehled postupu výpočtu tepelných ztrát je nad rámec této práce, proto není blíže popsán. Nejdůležitějšími vstupními daty pro výpočet jsou zejména klimatické podmínky v lokalitě objektu, resp. venkovní výpočtová teplota, geometrická charakteristika objektu, tepelně-technické vlastnosti konstrukcí, požadavky na vnitřní výpočtové teploty v místnostech aj. Na základě těchto a dalších doplňujících informací se určí celková tepelná ztráta objektu, která je složena z celkové tepelné ztráty prostupem $\Phi_{T,i}$ a celkové tepelné ztráty větráním $\Phi_{V,i}$. Výkon zdroje tepla je potom roven celkové tepelné ztrátě podle vzorce (8) níže.

$$Q_{VYT} = \Phi_{HL} = \sum_{i=1}^n \Phi_{T,i} + \sum_{i=1}^n \Phi_{V,i} \quad (8)$$

V případě, že jsou využity plynové kondenzační zásobníkové ohřivače, projekt by měl směřovat k návrhu nízkoteplotních otopných systémů. Nízká teplota vratné vody do ohřivače přispívá k dosažení vyššího počtu hodin, kdy má ohřivač zajištěny podmínky pro práci v kondenzačním režimu.

Určení dílčího výkonu pro přípravu teplé vody

Výkon potřebný pro přípravu teplé vody Q_{TV} je závislý zejména na způsobu užívání budovy a na chování uživatelů. Základním požadavkem na ohřivač je zajištění dodávky dostatečného množství teplé vody o požadované teplotě a v požadovaném čase. Návrh vyžaduje zohlednění mnoha různých faktorů. Přístupy k návrhu se v podstatě liší tím, jaké faktory považují za určující a jaké zanedbávají. Metodik výpočtu existuje značné množství, nicméně v ČR je nejpoužívanější metoda křivek odběru a dodávky tepla uvedená v normě ČSN 06 0320 [27], případně ČSN EN 12831-3 [28]. Návrh dle této metodiky je založen na práci s odběrovými profily teplé vody. Protože se jedná o přehledný a v praxi běžně používaný způsob výpočtu, je popsán a použit v rámci této práce. Jeho výhodou je mimo jiné možnost zobrazit navržené řešení graficky. Hlavní body, které by měl projektant při návrhu dle této metodiky projít, shrnul Vavříčka [29] následovně:

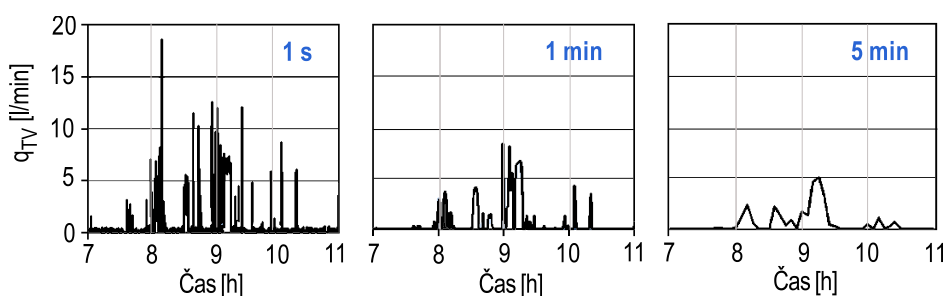
- Určení průběhu odběrového profilu TV a celkové potřeby energie pro přípravu TV
- Sestavení křivky odběru
- Sestavení křivky dodávky
- Výpočet výkonu a objemu ohřivače

Průběh odběrového profilu teplé vody se určí nejlépe z měření v daném objektu. V případě, kdy měření na stávajícím objektu není realizovatelné nebo se jedná o objekt teprve ve fázi výstavby, je nutné jej určit přibližně z normových podkladů dle typu objektu. Případně je možné využít charakteristiky odběrových profilů původně určených pro testování ohřivačů vody za účelem energetického štitkování uvedených v Nařízení komise EU č.811/2013 [30],812/2013 [31], 813/2013 [32] a 814/2013 [33]. Při návrhu parametrů ohřivače se standardně pracuje s odběrovým profilem vyhodnoceným pro periodu 24 hodin. Takto sestavený odběrový profil vyjadřuje, jak je celkové množství odebrané energie rozdělené do dílčích odběrů v průběhu dne. V případě vyhodnocení v delší periodě se do charakteru profilu promítá také vliv dne v týdnu a období v roce. Zhodnocení sezonních vlivů není možné postihnout v rámci běžného návrhu ohřivače, nicméně není problém jej zahrnout do simulačních analýz. V současné době je k dispozici několik podpůrných programů, které jsou schopné generovat realistické celoroční odběrové profily teplé vody. Příkladem může být software DHWcalc [34], který je využit v rámci praktické části práce.

Rozbor odběrového profilu lze provést několika způsoby, přičemž každý ze způsobů má při návrhu své opodstatnění. Verhaert [35] uvádí, že se používá vyjádření:

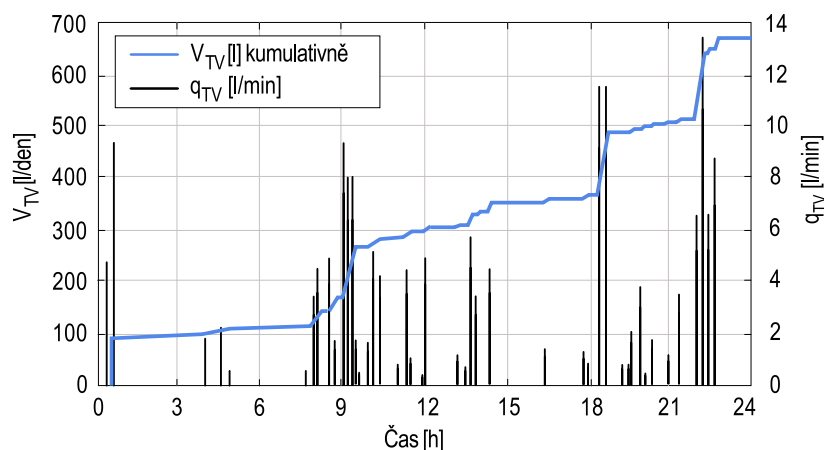
- Nespojité, tzn. zobrazení požadovaného průtoku vody q_{TV} [l/min]
- Vyjádření křivkou odebraného množství teplé vody V_{TV} [l] příp. energie E_{TV} [kWh]
- Vyjádření kumulativní křivkou odebraného množství teplé vody V_{TV} [l] příp. energie E_{TV} [kWh]

Odběrový profil vyjádřený přes průtoky q_{TV} požadované v daných odběrech umožňuje snadno definovat velikost špičkového průtoku, který je zásadní při návrhu potrubních rozvodů. Verhaert [35] se věnoval rozboru odběrových profilů přes průtoky při měřeních i v simulacích. Upozorňuje na možné problémy při volbě časového kroku měření nebo simulace. Jak je patrné z Grafu 3 níže, pokud se časový krok zvolí příliš velký, dojde při zobrazení průměrného průtoku k vyhlazení odběrových špiček. To může vést k chybnému určení špičkového průtoku a k nevhodnému návrhu.



Graf 3 Vliv časového kroku na detekci špičkového průtoku, na základě [35]

Vyjádření křivkou odebraného množství teplé vody V_{TV} , případně energie E_{TV} umožňuje přehledně zobrazit tvar odběrového profilu v průběhu dne a definovat odběrové špičky, ale není z něj na první pohled patrné, jaké je celkové množství odebrané energie za den. Kumulativní způsob vyjádření se získá postupným načítáním množství odebrané teplé vody (příp. energie odebrané v teplé vodě) za den. Po přičtení posledního odběru je z grafu možné odečíst celkové odebrané množství/odebranou energii v teplé vodě za den. Tento způsob vyjádření je užitečný pro návrh výkonu a objemu ohřívače. Na Grafu 4 je pro ukázkou zobrazeno nespojité a kumulativní vyjádření odběrového profilu.



Graf 4 Vybrané možnosti vyjádření odběrového profilu na základě [35]

Jak bylo uvedeno na předchozích stranách, pro účely praktické části této práce je k návrhu ohřívače využita metoda křivek odběru a dodávky tepla dle ČSN 06 0320 [27]. Postup návrhu je následující:

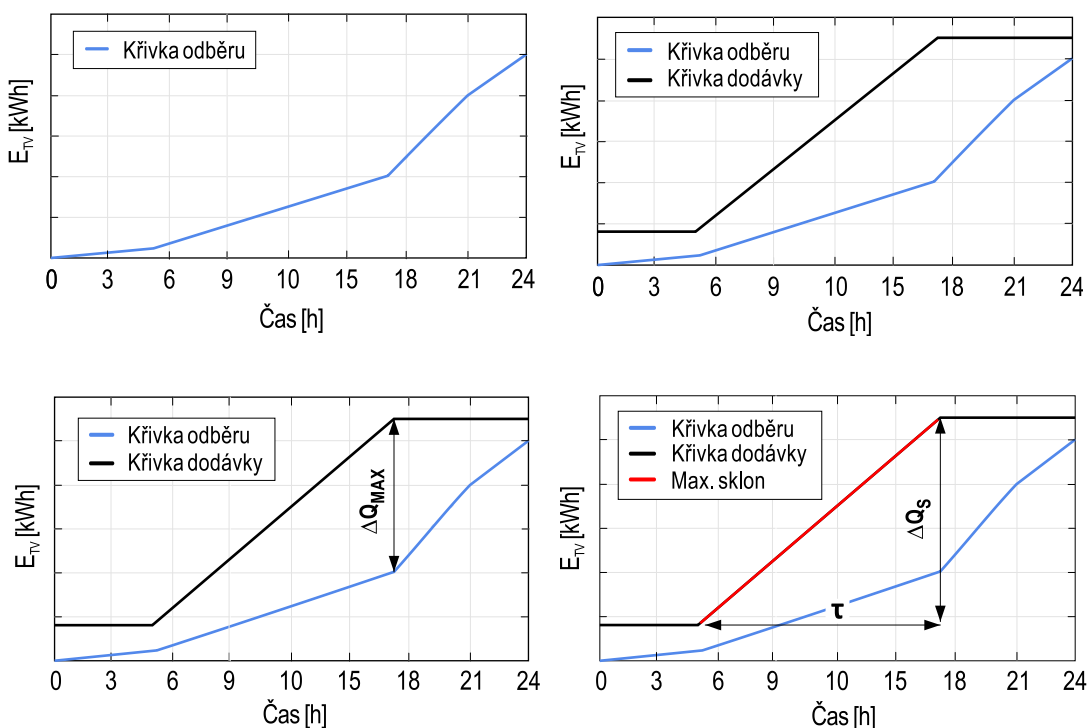
- Určí se celková potřeba energie pro přípravu TV za den
- Celková energie se rozdělí do dílčích odběrů podle zvoleného odběrového profilu
- Sestaví se kumulativní křivka odběru, navrhne se křivka dodávky a určí se parametry ohřívače

Celková potřeba energie pro přípravu teplé vody za den se určí dle vzorce (9). Zahrnuje v sobě jak tepelnou energii potřebnou pro samotnou přípravu teplé vody, tak energii potřebnou pro úhradu tepelných ztrát při přípravě a distribuci teplé vody. Ty se do výpočtu zahrnují přes poměrnou ztrátu z , která se určuje zjednodušeně odečtem z tabulky z normy. Co se týče orientačních hodnot odebraného množství teplé vody na osobu, průměrná denní spotřeba se v EU podle Wernera [36] pohybuje okolo hodnoty 36 l za den, pro ČR uvádí Matuška [37] spotřebu 39 l za den. Hodnoty od obou autorů jsou uvedeny pro teplotu teplé vody 60 °C.

$$E_{TV} = \frac{(1+z) \cdot V_{zp} \cdot \rho_w \cdot c_w \cdot (t_{TV} - t_{SV})}{3600 \cdot 1000} \quad (9)$$

Takto určená celková potřeba energie se dále rozdělí do dílčích odběrů v průběhu dne podle zvoleného odběrového profilu a vyjádření se převede na kumulativní křivku, tzn. na křivku odběru podle Grafu 5 vlevo nahoře. Na ose y je záměrně vynechaná stupnice, protože se jedná pouze o ukázkou. K takto sestavené křivce odběru se sestaví křivka dodávky tepla. Příklad možného sestavení křivky dodávky je na Grafu 5 vpravo nahoře. Sestavení tvaru konkrétní křivky dodávky je na zkušenostech projektanta, nicméně existují obecná doporučení. Prvním pravidlem je, že křivka dodávky tepla se při grafickém vyjádření vždy musí nacházet nad křivkou odběru tepla. V případě, že by se křivka dodávky posunula pod křivku odběru, ohřivač by nebyl schopen dodat požadované množství teplé vody o požadované teplotě.

Při praktickém sestavování křivky dodávky to znamená udržet určité odsazení od křivky odběru, čímž se v ohřivači vytvoří dostatečná energetická rezerva pro případný výskyt nestandardních odběrů. Druhé pravidlo se týká zohlednění možností připojeného zdroje tepla. To je nutné zejména u zdrojů jako jsou tepelná čerpadla nebo solární kolektory, jejichž provoz je do značné míry závislý na klimatických podmínkách. Případný nesoulad mezi dodávkou a odběrem tepelné energie je nutné kompenzovat vytvořením větší energetické rezervy v zásobníkovém ohřivači. V případě plynových ohřivačů řešených v této práci není nutné navrhovat energetické rezervy tak vysoké, protože ohřivač je schopen dodávat požadovaný výkon bez ohledu na okolní podmínky.



Graf 5 – Práce s křivkami odběru a dodávky

Následně se určením maximálního rozdílu energie mezi křivkou dodávky a odběru určí velikost zásobníkového ohřivače. Maximální rozdíl je možné najít graficky i početně, na Grafu 5 vlevo dole je zobrazena ukázka grafického řešení. Dosazením odečteného maximálního rozdílu do vzorce (10) lze určit velikost zásobníkového ohřivače.

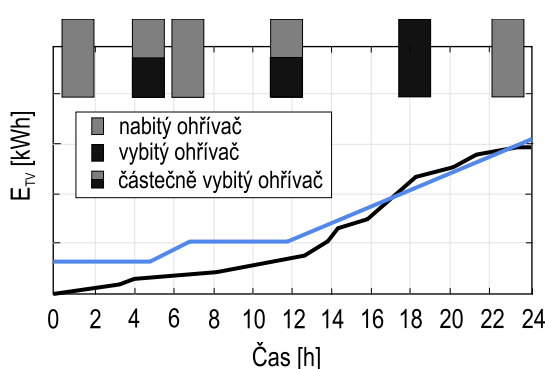
$$V_{OH} = \frac{\Delta Q_{max} \cdot 3600 \cdot 1000}{\rho_w \cdot c_w \cdot (t_{TV} - t_{sv})} \quad (10)$$

Výkon zásobníkového ohřivače potřebný pro přípravu teplé vody Q_{TV} vychází z určení maximálního sklonu křivky dodávky v čase a určí se buď graficky jak je naznačeno na Grafu 5 vpravo dole nebo výpočtem podle vzorce (11).

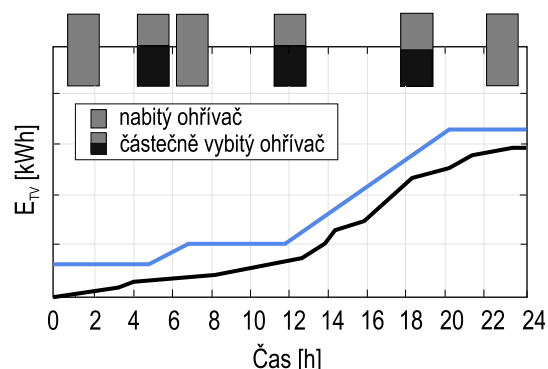
$$Q_{TV} = \left(\frac{\Delta Q_s}{\tau} \right)_{max} \quad (11)$$

Jak uvádí Vavříčka [29] i Verhaert [35] při návrhu ohřivače se v podstatě jedná o bilancování mezi velikostí výkonu a objemu ohřivače. Při zmenšování objemu ohřivače klesá využitelný akumulací prostor, a proto musí odpovídajícím způsobem narůstat dostupný výkon, aby byl ohřivač stále schopný pokrýt případnou odběrovou špičku. Krajním případem návrhu je na jedné straně průtokový ohřivač a na straně druhé zásobníkový ohřivač s velkým akumulacím prostorem. Pokud je ohřivač navržen správně, dochází v průběhu odběru teplé vody k jeho vybití pouze do takové míry, že je stále schopen dodávat dostatečné množství teplé vody o požadované teplotě.

Na Grafu 6 a Grafu 7 je schematicky znázorněna ukázka provozních stavů odpovídajících zobrazeným křivkám odběru a dodávky. Na Grafu 6 je zobrazen příklad nevhodného návrhu. Jak je patrné z grafu, nedodržení bezpečnostního odsazení křivky dodávky (modrá) od křivky odběru (černá) může vést k návrhu ohřivače, který není v odběrové špičce schopný dodat požadované množství teplé vody o požadované teplotě. Na Grafu 7 je zobrazen vhodnější příklad návrhu, který respektuje požadavek na vytvoření dostatečné energetické rezervy v ohřivači. Ohřivač dodávající tepelnou energii v souladu s modrou křivkou na Grafu 7 bude schopen splnit požadavek na dodávku i v odběrové špičce mezi 12 a 24 hodinou.



Graf 6 Nesprávný návrh na základě [38]



Graf 7 Správný návrh na základě [38]

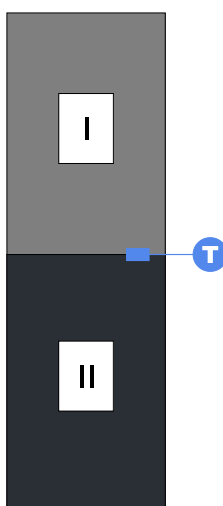
Oba autoři zároveň zdůrazňují význam správného definování odběrových špiček jak z hlediska odebraného objemu, tak z hlediska špičkového průtoku. Na rozdíl od průtokových ohřivačů je možné zásobníkové ohřivače navrhnout s menším výkonem, protože je možné část energie potřebné pro pokrytí odběru akumulovat ve vodě. Je nutné zdůraznit, že objem teplé vody o požadované teplotě, která je při odběru okamžitě k dispozici, závisí na pozici spínacího termostatu v ohřivači. Volba umístění termostatu přímo ovlivňuje četnost spínání zdroje tepla a množství teplé vody, které je v případě odběru okamžitě k dispozici na požadované nebo vyšší teplotě. Z toho plyne, že umístění termostatu (příp. termostatů) je nutné volit s ohledem na připojený zdroj tepla a možnosti jeho provozu.

3.2 Vliv pozice spínacího termostatu a objemu ohřivače na provoz

Vliv umístění spínacího termostatu na provozní charakteristiky ohřivače popsal a experimentálně ověřil Bárta [38]. V teoretickém rozboru uvedl, že volbou umístění spínacího termostatu se celkový objem vody v zásobníkovém ohřivači v podstatě rozdělí na dva dílčí objemy – pohotovostní a zbytkový, jak je naznačeno na Obr.12. Ve skutečnosti nebude rozdělení takto jednoznačné díky nedokonalé stratifikaci, nicméně pro obecný popis principu je schéma dostačující. V pohotovostním objemu je teplota vody trvale udržována na požadované hodnotě. Teplota vody v objemu pod termostatem je nižší než nastavená spínací teplota na termostatu.

Při odběru se nejdříve vybijí pohotovostní objem. Pro nenáročné odběry je kapacita pohotovostního objemu zpravidla dostatečná, a proto nemusí dojít k sepnutí dohřevu ze zdroje tepla. V případě špičkových odběrů ale může dojít k velmi rychlému vyčerpání pohotovostní kapacity a při poklesu teploty na termostatu pod žádanou hodnotu ke spuštění dohřevu, přičemž okamžik sepnutí závisí také na hysterezi nastavené na spínacím termostatu. Schopnost ohřivače dále dodávat vodu o požadované teplotě závisí na jeho nabíjecí charakteristice, tzn. na rychlosti dohřevu přiváděné studené vody na požadovanou teplotu pro odběr.

Jak bylo uvedeno na předchozí straně, při volbě umístění termostatu je nutné respektovat připojený zdroj tepla. Menší objem pohotovostní kapacity vyžaduje výkonnější zdroj tepla, který je schopen dodat požadovanou energii do ohřivače dostatečně rychle a nezávisle na okolních podmínkách. U zdrojů výkonově závislých na vnějších klimatických podmínkách, jako jsou tepelná čerpadla nebo solární kolektory, je nutné počítat s tím, že dodávku tepelné energie do zásobníku nemohou plně přizpůsobovat aktuální potřebě. To se týká zejména ranních a večerních odběrových špiček, pro které musí být nesoulad mezi odběrem a dodávkou tepelné energie kompenzován vytvořením dostatečné energetické rezervy. Vzhledem k tomu, že plynové ohřivače řešené v této práci mohou dodávat tepelnou energii bez omezení vnějšími podmínkami, mohou být navržené energetické rezervy v ohřivači nižší.



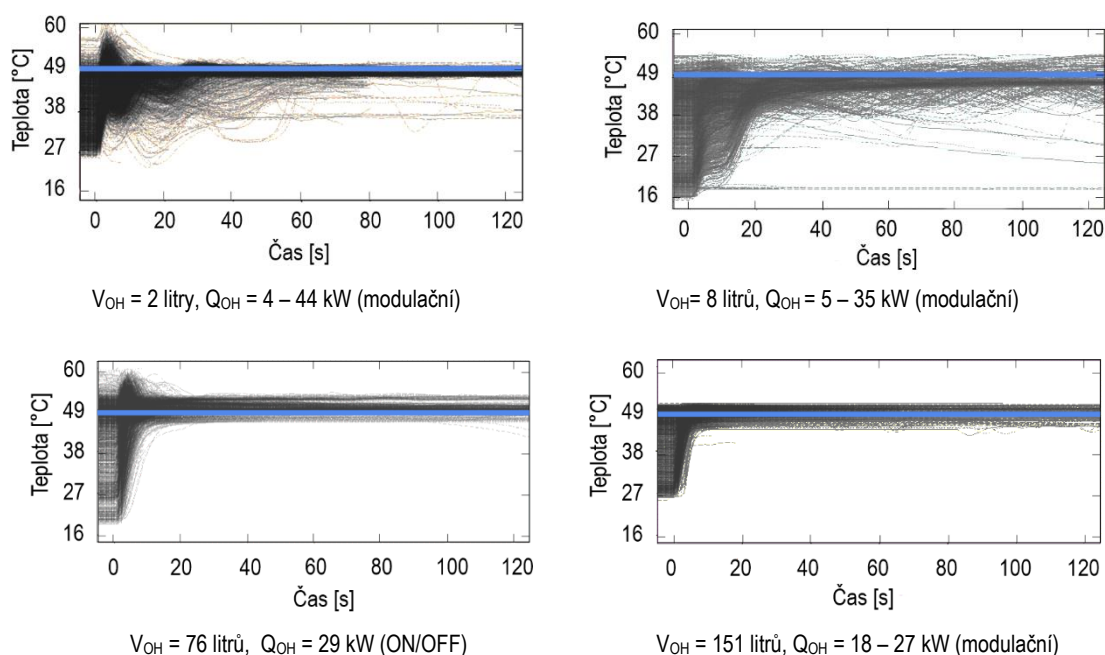
Obr. 12 – Rozdělení ohřivače na základě [38]

Redukce pohotovostní kapacity zásobníkového ohřivače (posun spínacího termostatu směrem nahoru) klade vyšší nároky na nabíjecí schopnosti zdroje tepla, tzn. na dostatečně rychlý dohřev vody ze studeného stavu na stav požadovaný při odběru. Krajním případem jsou průtokové ohřivače. Velikost potřebného pohotovostního objemu je dána také teplotou, na které má být pohotovostní objem udržován. Omezením z hlediska teploty je hygienické riziko vzniku bakterií *Legionella pneumophila*.

Hodnocení vlivu dostupného objemu plynového ohřivače na odběrové charakteristiky přípravy teplé vody se věnoval například Schoenbauer [39]. Výstupem z jeho měření je závěr, že na stabilitu teploty teplé vody na výstupu z ohřivače má zásadní vliv výkon a objem ohřivače, nastavená hystereze na teplotním

čidle a schopnost modulace výkonu. Při vyhodnocování časově nenáročných odběrů vykazovaly průtokové a zásobníkové ohřívače o velmi malém objemu vyšší výkyvy v teplotách odebírané vody než zásobníkové ohřívače s větším objemem.

Příklad porovnání je možné vidět na Grafu 8 níže. Dílčí grafy zobrazují výstupy z měření odběrů teplé vody z daného ohřívače, kdy každá křivka reprezentuje jeden odběr trvající 120 s, požadovaná teplota teplé vody byla nastavena na 49 °C a na výstupu z ohřívače nebyl instalován termostatický směšovací ventil. Na Grafu 8 vlevo nahoře jsou zobrazeny odběry z dvoulitrového ohřívače. Jak je patrné, teplota odebírané teplé vody vykazuje velké výkyvy. Podobný trend je vidět i na Grafu 8 vpravo nahoře, kdy kombinace malého objemu ohřívače a relativně vysoké hystereze na spínacím termostatu (7 K) způsobila velké výkyvy teplot v průběhu celého odběru. Větší objem ohřívače na Grafu 8 vlevo dole zajistil stabilnější teplotu výstupní vody než předchozí dva ohřívače. Velký akumulací objem v kombinaci s modulačním hořákem ohřívače na Grafu 8 vpravo dole zajišťuje dosažení stabilní výstupní teploty velmi rychle po začátku ohřevu.



Graf 8 – Porovnání testovaných ohřívačů na základě [39]

Grafy uvedené výše jsou vyhodnoceny pro krátké odběry, při kterých jsou zásobníkové ohřívače schopny udržovat stabilnější teplotu dodávky, protože pro její pokrytí zpravidla stačí kapacita pohotovostního objemu. Pokud je odběr delší a náročnější z hlediska průtoku, mohou mít se stabilitou dodávky problém zásobníkové ohřívače, zatímco průtokové ohřívače jsou po čase schopny teplotu dodávané teplé vody stabilizovat. Ve chvíli, kdy je rychle odčerpán obsah pohotovostního objemu a zásobníkový ohřívač musí začít dohřívat, může teplota dodávané teplé vody kolísat kvůli nutnosti ohřát velké množství přiváděné studené vody. Vliv časově náročnějších odběrů na odběrové charakteristiky zásobníkových a průtokových ohřívačů vyhodnocoval Kingston [40]. Výkyvy teplot dodávané teplé vody pozoroval u zásobníkových ohřívačů v případě souvislých odběrů trvajících déle než 15 minut. Jednalo o ohřívače s objemem do 300 litrů zatížené souvislými odběry o průtocích do 20 l/min.

Z výše uvedeného je patrné, že při testu limitního zatížení zásobníkových ohřívačů je nutné se zaměřit na zkoušení různých kombinací doby trvání odběru a odebíraného průtoku teplé vody. Schopnost ohřívače splnit požadavky různých kombinací bude dána zejména jeho nabíjecí charakteristikou, jeho objemem, nastavenou spínací teplotou, hysterezí na spínacím termostatu a požadovanou teplotou na odběrném místě.

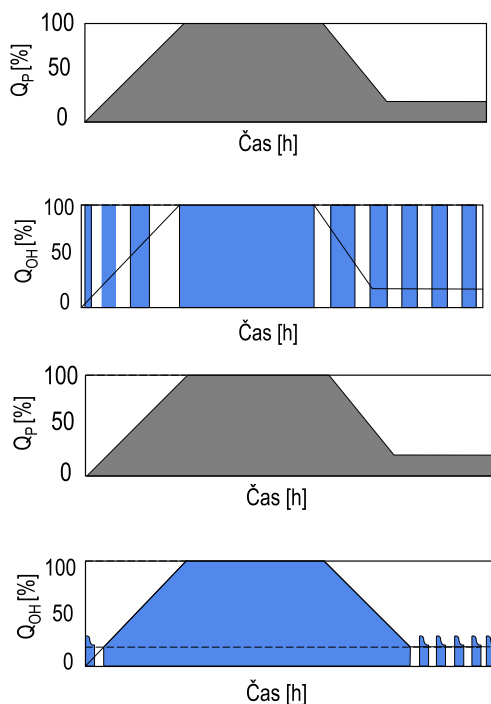
3.3 Postupy regulace provozu ohřivače a připojených systémů

V řešeném kombinovaném systému je nutné regulovat výkon zdroje tepla a tepelný příkon z otopného systému do vytápěné místnosti. Teplotu teplé vody na výstupu z ohřivače směrem k odběrným místům není nutné regulovat nadřazeným regulátorem, protože její směšování na požadovanou teplotu zajišťuje termostatický směšovací ventil s manuálním nastavením.

Vzhledem ke značnému výkonovému rozdílu pro hrazení tepelných ztrát a potřeby tepla pro přípravu teplé vody musí být ohřivač v kombinovaném systému vybaven modulačním hořákem. Schopnost modulovat výkon je nutná zejména pro zajištění hospodárného provozu za jiných než návrhových podmínek. Modulační rozsah hořáku se vyjadřuje prostřednictvím modulačního poměru. Pro účely této práce je modulační poměr označen anglickou zkratkou TDR (turndown ratio). Určí se jako poměr jmenovitého výkonu ohřivače a nejmenšího stabilně dosažitelného výkonu ohřivače podle vzorce (12):

$$TDR = \frac{Q_{OH,max}}{Q_{OH,min}} \quad (12)$$

V případě, že je maximální udávaný výkon ohřivače $Q_{OH,max} = 20$ kW a výrobce uvádí modulační rozsah hořáku TDR 5:1, bude minimální stabilně dosažitelný výkon ohřivače $Q_{OH,min} = 4$ kW. Přínos využití ohřivače s modulačním hořákem názorně ukazuje Obr. 13 níže. Na obrázku je porovnán provoz ohřivače s ON/OFF a modulačním hořákem pod částečným a jmenovitým zatížením, kde Q_p je požadovaný výkon a Q_{OH} je výkon skutečně dodávaný ohřivačem. Jak je patrné, ohřivač s ON/OFF hořákem je nucen cyklovat mnohem častěji než ohřivač s modulací výkonu. Cyklování je nežádoucí jev a má za následek zkrácení životnosti ohřivače. Cílem návrhu regulační strategie by mimo jiné mělo být omezení počtu startů hořáku na minimum a zajištění dostatečně dlouhé doby chodu ohřivače.

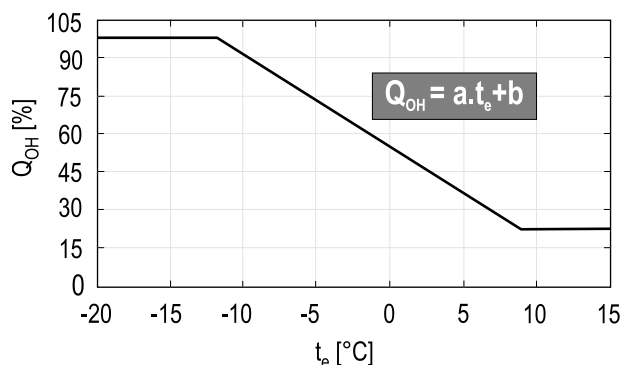


Obr. 13 - Provoz ohřivače s ON/OFF a modulačním hořákem na základě [41]

Siegenthaler [41] uvádí, že modulace výkonu zpravidla probíhá úpravou množství plynu a spalovacího vzduchu přiváděného do hořáku. Změna je realizována prostřednictvím regulační klapky se servopohonem. Signál pro přestavení klapky je přiváděn z externího regulátoru. Externí regulátor může generovat signál pro modulaci výkonu například na základě změny teploty výstupní a vratné vody do ohřivače.

Další možností je regulace na základě venkovní teploty, tzn. ekvitermní regulace. Tato možnost byla zvolena pro regulaci výkonu ohřívače v rámci simulačního řešení, a proto bude podrobněji rozebrána dále. Ekvitermní regulace byla zvolena především z důvodu jejího širokého a úspěšného uplatnění v praktických aplikacích. V rámci této práce je uvažována lineární změna výkonu ohřívače s venkovní teplotou podle obecné rovnice (13), kde a , b jsou konstanty zjištěné dopočtem a t_e je venkovní teplota. Ukázka výsledné křivky, podle které probíhá modulace výkonu je na Grafu 9.

$$Q_{OH} = a \cdot t_e + b \quad (13)$$



Graf 9 Příklad tvaru křivky modulace výkonu

Ekvitermní regulace je v simulačním řešení zvolena jak pro regulaci výkonu ohřívače, tak pro regulaci tepelného příkonu do otopného systému. Ekvitermní regulace tepelného příkonu je zajištěna směřováním v motorickém třicestném směšovacím ventilu. Byla zvolena z důvodu širokého uplatnění v praktických aplikacích, ve kterých po optimalizaci dosahuje dobrých výsledků z hlediska udržování požadované teploty v místnosti, jak uvádí například Bašta [42]. Při použití v praxi je nedostatkem ekvitermní regulace nutnost vyladit parametry ekvitermy přímo podle podmínek konkrétní aplikace. Nastavení je zpravidla nutné provést opakovaně než se jej podaří optimalizovat, což může být poměrně zdlouhavé. Tato nevýhoda při simulačních řešeních odpadá a parametry ekvitermy je možné nastavit poměrně snadno, protože jsou známy všechny detaily o řešeném systému, včetně jeho dynamického chování.

Ekvitermní regulátor zajišťuje regulaci teploty přívodní vody do otopné soustavy, jedná se tedy o kvalitativní regulaci. Výpočet požadované přívodní teploty vody vychází z úvahy, že její teplota musí být maximální při nejnižší venkovní teplotě, tedy venkovní výpočtové. S nárůstem venkovní teploty lze požadovanou teplotu přívodní vody snižovat, protože zároveň klesají tepelné ztráty objektu, a tudíž i požadovaný tepelný příkon do místností. Z popisu je patrné, že určujícím parametrem pro výpočet je poměr mezi aktuálním a návrhovým výkonem dodávaným v otopné vodě, tedy parametr nazývaný zatížení otopné soustavy. Požadovaná aktuální teplota přívodní vody se získá zápisem a úpravou rovnic vyjadřujících parametr zatížení otopné soustavy φ . Všechny níže uvedené rovnice jsou přejaty z publikace od Bašty [42].

Protože se jedná o kvalitativní regulaci, zůstává průtok otopné vody konstantní a zatížení otopné soustavy lze stanovit pouze z rozdílu teplot podle vzorce (14) níže:

$$\varphi = \frac{\delta t}{\delta t_N} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{t_{w1,N} - t_{w2,N}} \quad (14)$$

Parametr zatížení otopné soustavy lze také vyjádřit z poměru aktuální a návrhové tepelné ztráty objektu. Matematicky vyjádřeno vzorcem (15) níže:

$$\varphi = \frac{Q_A}{Q_N} = \frac{t_i - t_e}{t_{i,N} - t_{e,N}} \quad (15)$$

Odvozený vztah musí také obsahovat vazbu na požadovanou teplotu v místnosti a typ zvolené otopné soustavy. Využije se možnost vyjádřit parametr zatížení otopné soustavy dle vztahu (16) níže, který vychází z popisu fyzikálních principů prostupu tepla teplosměnnou plochou otopného tělesa.

$$\varphi = \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_N} \right)^n = \left(\frac{\frac{t_{w1} + t_{w2}}{2} - t_i}{\frac{t_{w1,N} + t_{w2,N}}{2} - t_{i,N}} \right)^n \quad (16)$$

Úpravou a vyjádřením z výše uvedených rovnic lze pro teplotu přívodní vody do soustavy psát výsledný vztah (17):

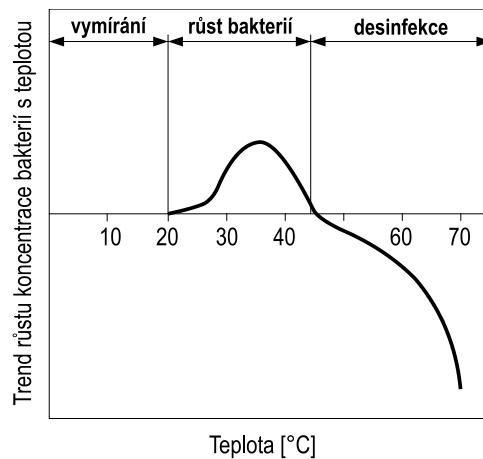
$$t_{w1} = t_i + \Delta t_N \cdot \varphi^{\frac{1}{n}} + 0,5 \cdot \delta t_N \cdot \varphi \quad (17)$$

Takto vypočtená teplota přívodní vody slouží k sestavení ekvitermní křivky, což je závislost teploty přívodní vody na venkovní teplotě. Jak je patrné z rovnic uvedených výše, průběh této křivky závisí na projektovaném teplotním spádu na otopných tělesech, druhu otopné soustavy a tepelně–technických vlastnostech vytápěné budovy. Jak uvádí Bašta [42] pokud není navržena ekvitermní regulace s vazbou na vnitřní teplotu, pak je nutné doplnit ekvitermní regulaci regulací místní.

Regulace navržená pro řešený systém musí být schopná zajišťovat efektivní provoz v otopném období, kdy je požadavek na dodávku energie do obou připojených systémů, i v létě, kdy je ohříváč využíván pouze pro přípravu teplé vody. V praktické části práce je pro simulačně řešený systém využita ekvitermní regulace výkonu zdroje tepla, ekvitermní předregulace přívodní teploty vody do otopné soustavy a kvantitativní regulace tepelného příkonu do vytápěné zóny prostřednictvím čerpadla s proměnnými otáčkami. Tuto regulační strategii doporučuje pro kombinované systémy například Arena [43], který uvádí, že vysoký modulační rozsah ohříváče v kombinaci s dodatečnou regulací výkonu pomáhá zamezit cyklování ohříváče v případě, že je do systému vytápění potřeba dodávat malé výkony.

Co se týče regulace teploty vody přímo v ohříváči, je nutné zohledňovat omezení daná hygienickými požadavky na provoz. Teplota vody se v ohříváčích běžně udržuje na hodnotách vyšších než 50 °C, přestože požadovaná teplota teplé vody na odběrných místech zpravidla nepřevyšuje 45 °C. To má za následek vyšší tepelné ztráty do okolí a z energetického hlediska se nejedná o efektivní řešení. Nicméně určité přehřátí je nutné, protože slouží jako preventivní termická dezinfekce vody od bakterií *L. pneumophila*. O vzniku, šíření a možnostech dezinfekce ohříváčů od bakterie *L. pneumophila* bylo zveřejněno značné množství odborných publikací. Například v publikaci Legionella and Building Services uvádí Brundrett [44], že *L. pneumophila* je aerobní bakterie způsobující akutní respirační onemocnění a těžké zápal plic. Dle publikace se z odběrných míst šíří do okolí prostřednictvím aerosolu, který lze snadno vdechnout do plic. Vyskytuje se jak v teplé vodě, tak v biofilmu, který se tvoří na stěnách zásobníku i potrubních rozvodů. Fleming ve studii [45] na základě výsledků z experimentů tvrdí, že až 95 % bakterií *L. pneumophila* přežívá právě v biofilmu, který zároveň zvyšuje její odolnost vůči termické dezinfekci. V další publikaci Brundrett [46] uvádí, že bakterie *L. pneumophila* nejsou příliš virulentní a onemocnění hrozí pouze rizikovým skupinám populace, zejména lidem s oslabeným imunitním systémem a onemocněním plic. Van Kenhove [47] uvádí, že určité množství bakterií je ve vodě přítomno vždy a nebezpečné jsou pouze vysoké koncentrace. Těm se zabráňuje právě udržováním relativně vysoké teploty vody v zásobnících.

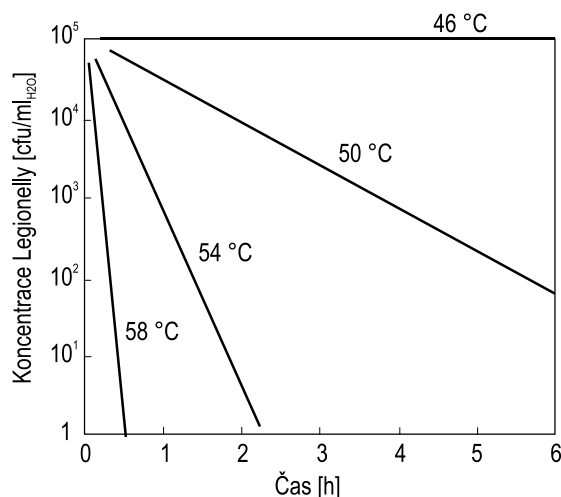
Šíření bakterie v rozvodech je závislé zejména na dostupnosti živin, dále na teplotě a na průtoku vody. Jak je patrné z Grafu 10 na následující straně, bakterie se velmi dobře množí při teplotách v rozmezí od 20 do 45 °C, s optimem při 37 °C. Při teplotách nad 46 °C dochází k termické dezinfekci, tzn. vymírání bakterií. Při teplotách pod 20 °C se bakterie přestává množit. Trend změny koncentrace bakterií v závislosti na teplotě je zobrazen na Grafu 11 na následující straně.



Graf 10 Šíření bakterie s teplotou na základě [44]

Jak uvedl Brundrett [44], pro vybití většiny bakterií přítomných v daném objemu vody je nutné objem přehřát na 58 °C a udržovat na této teplotě po dobu alespoň 30 minut. Poměrně dlouhou dobu bylo běžnou praxí udržovat teplotu vody v zásobnících na relativně vysokých teplotách. V souvislosti se zpřísněním požadavků na energetickou efektivitu provozu se začalo velké množství odborníků věnovat problematice snižování provozních teplot v ohřivači se vztahem k *L. pneumophila*. V nedávné době to byla například studie Van Kenhove [47] a Rhoadse [48]. Oba autoři vycházeli ze závislosti rychlosti usmrcení bakterie na teplotě, které publikoval Brundrett [46]. Pro částečné snížení tepelných ztrát z ohřivače doporučují oba autoři neprovozovat zásobník trvale na vysokých teplotách. Místo toho navrhuji provozní teplotu snížit a zařadit krátkodobé přehřevy celého objemu vody na vysokou teplotu, např. 70 °C.

Co se týče potrubních rozvodů, jsou z hygienického hlediska problematická zejména málo používaná odběrná místa, kde voda dlouhou dobu stagnuje. Ve studii, kterou provedl Rhoads [48] bylo prokázáno, že odběrná místa s vysokou frekvencí odběrů vykazují menší potenciál pro množení bakterií *L. pneumophila*. Tato informace je zásadní pro návrh systému řešeného v této práci. V primárním okruhu vytápění cirkuluje v průběhu otopného období teplá voda. Mimo otopné období je oběhové čerpadlo vytápění vypnuto, tzn. voda v primárním okruhu stagnuje. Z hygienického hlediska se jedná o rizikový stav. Řešením je buď primární okruh vytápění mimo otopné období uzavřít a vypustit, anebo problém vyřešit zařazením vhodné bezpečnostní funkce do regulátoru. Tzn. zařadit funkci proplachu primárního okruhu, která zajistí pravidelné spouštění oběhového čerpadla mimo otopné období. Proplach musí být proveden vodou o vysoké teplotě a po dostatečně dlouhou dobu.



Graf 11 Koncentrace Legionelly na základě [44]

3.4 Hodnocení charakteristik ohříváče

Kvalitu ohříváče a kvalitu regulace jeho provozu lze hodnotit na základě charakteristik. V rámci reálných měření a numerických simulací je možné vyhodnocovat mimo jiné:

- Provozní charakteristiky
- Nabíjecí charakteristiky
- Odběrové charakteristiky

Provozní charakteristiky podávají informace přínosné pro hodnocení vlivu zatížení ohříváče na četnost servisních zásahů. V případě plynových ohříváčů je přínosné vyhodnocovat například počty startů za rok nebo četnost stavů, kdy byl ohříváč nucen cyklovat. Nabíjecí charakteristiky podávají informaci o chování ohříváče v průběhu nabíjení z vychlazeného stavu. Při zkoušení těchto charakteristik nesmí docházet k odběru teplé vody. Charakteristiky slouží k hodnocení kvality konstrukčního řešení ohříváče a zvoleného způsobu ohřevu. Jejich průběh je ovlivněn například připojeným zdrojem tepla, provedením návarků, stratifikací vody v ohříváči nebo výškou umístění spínacího termostatu.

Odběrové charakteristiky slouží k vyhodnocení schopnosti ohříváče dodat požadované množství teplé vody o požadované teplotě. Podávají informaci schopnosti ohříváče dodávat dostatek teplé vody při různém zatížení. Mohou sloužit jako indikátory komfortu dodávky teplé vody.

V případě ohříváčů řešených v této práci budou odběrové charakteristiky teplé vody ovlivněny požadavkem na současnou dodávku teplé vody do systému vytápění.

Provozní charakteristiky

Provozní charakteristiky plynových ohříváčů jsou v rámci praktické části této práce vyhodnocovány pro období jednoho roku. Jsou vyhodnocovány přes počet startů ohříváčů za rok a přes maximální, minimální a průměrnou souvislou dobu chodu ohříváčů za rok. Přestože se jedná o kondenzační ohříváče, charakteristiky spojené s hodnocením provozu v kondenzačním režimu nebyly v praktické části řešeny z důvodu uvedených v kapitole 5, proto nebudou dále rozebrány.

Optimální provozní charakteristika plynového ohříváče je taková, při které nedochází k nadbytečnému spínání ohříváče a cyklování. Pro vyhodnocování provozní charakteristiky v praktické části práce je nutné stanovit referenční hodnotu počtu startů za rok a optimální doby chodu, ke které bude možné vztáhnout dosažené výsledky. Vzhledem k nedostupnosti informací o řešeném systému musí být vztažná hodnota stanovena přibližně z měření kondenzačních plynových kotlů.

Počet startů za rok závisí na podmínkách konkrétní instalace, možnostech modulace, předimenzování kotle, dostupném objemu připojeného zásobníku teplé vody a dalších faktorech. Bennett [49] uvádí ve statistikách platných pro plynové kotle určené pro vytápění rozsah od 2 do 60 startů za den, přičemž horní hranice se týká nadměrně předimenzovaných zařízení. Pro kotle s výkonem shodným s návrhovou tepelnou ztrátou objektu udává počet startů za den od 2 do 10, pro kotle s dvojnásobným výkonem vzhledem k tepelné ztrátě objektu udává počet startů za den 20. Po přepočtu na počet startů za rok se jedná o rozmezí 730 až 7300 startů. Z měření plynového kotle o výkonu 10 kW pro vytápění a přípravu teplé vody s integrovaným 120 litrovým zásobníkem teplé vody doplňuje Soukup [50] počet startů za rok 2000 pro rodinný dům s tepelnou ztrátou 4 kW. Výsledky ze simulační části práce by se měly pohybovat v podobném rozsahu s tím, že nižší počet startů je z hlediska životnosti ohříváče optimálnější.

Z hlediska doby chodu při jednom cyklu udává Bennett [51] optimální dobu přibližně 10 minut a vyšší, s tím, že negativní vliv na účinnost a produkci emisí má doba chodu kratší než 3 minuty.

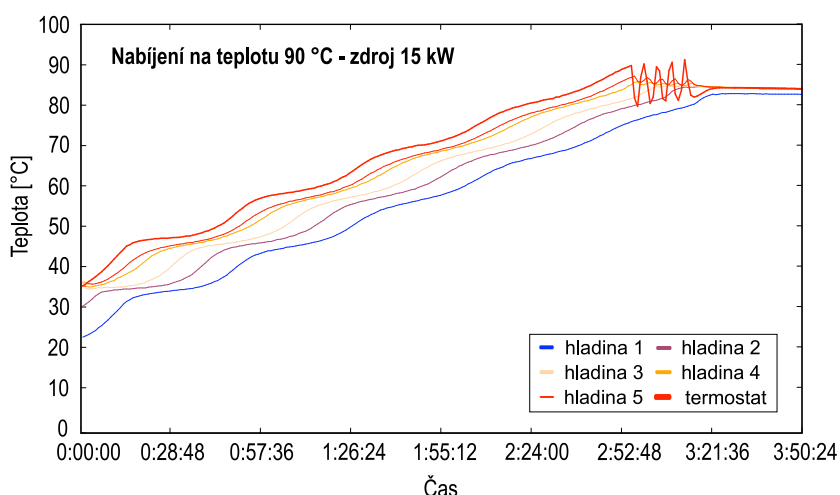
V simulační části práce je v parametrické studii hledáno optimální nastavení ohříváče pro různé scénáře. Hledáno je takové nastavení, při které bude počet startů za rok co nejmenší a vyhodnocená průměrná doba chodu ohříváče za jeden cyklus co nejvyšší. Získané hodnoty počtu startů za rok by se neměly výrazně

odlišovat od rozsahu uvedeného výše, dosažená průměrná doba chodu by neměla být kratší než 3 minuty, v optimálním případě by měla vycházet alespoň 10 minut.

Nabíjecí charakteristiky

Nabíjecí charakteristiky slouží k zobrazení průběhu teplot v ohřívači v závislosti na čase při nabíjení. Používají se ke zhodnocení rychlosti dohřevu vody z vychlazeného stavu na požadovanou teplotu a zároveň ke zhodnocení chování ohřívače v průběhu tohoto dohřevu. Tyto informace jsou přínosné v případě, že se ohřívač instaluje do objektu s náročnými odběrovými špičkami, při kterých dochází k vyčerpání celého užitečného objemu. Z nabíjecí charakteristiky je možné odečíst délku intervalu, kterou ohřívač potřebuje, aby byl schopen celý objem dohřát ze studeného stavu zpět na požadovanou teplotní hladinu. Zkouška nabíjecí charakteristiky probíhá bez současného odběru teplé vody.

Příklad možného grafického výstupu z měření nabíjecí charakteristiky je zobrazen na Grafu 12 z měření, které provedl Tolar [52]. Jedná se o měření akumulární nádrže s integrovaným výměníkem pro průtočnou přípravou teplé vody. Kmitání na konci nabíjení je dle autora způsobeno cyklováním termostatu. Výsledky nabíjecí charakteristiky získané v praktické části práce by měly mít podobný charakter. Vzhledem k určitému zjednodušení použitého numerického modelu, jinému zdroji tepla a odlišnému principu dodávky tepelné energie je v praktické části práce možné očekávat mírně odlišnou dynamiku ohřevu než je uvedena na ukázkovém grafu.



Graf 12 - Příklad nabíjecí charakteristiky akumulární nádrže na základě [52]

Odběrové charakteristiky

Odběrové charakteristiky podávají informaci o schopnosti ohřívače dodávat dostatek teplé vody o požadované teplotě pod různými zatíženími. Hodnotí se dvě základní skupiny zatížení:

- Jednorázový nepřerušovaný odběr o konstantním průtoku
- Přerušované odběry o rozdílných průtocích a délce trvání (zátěžový resp. odběrový profil)

Odběrová charakteristika získaná při zatížení ohřívače jednorázovým trvalým odběrem slouží ke grafickému určení limitního zatížení ohřívače z pohledu odebíraného průtoku o určité zvolené teplotě. Jejím číselným výstupem je množství dodané teplé vody o požadované teplotě.

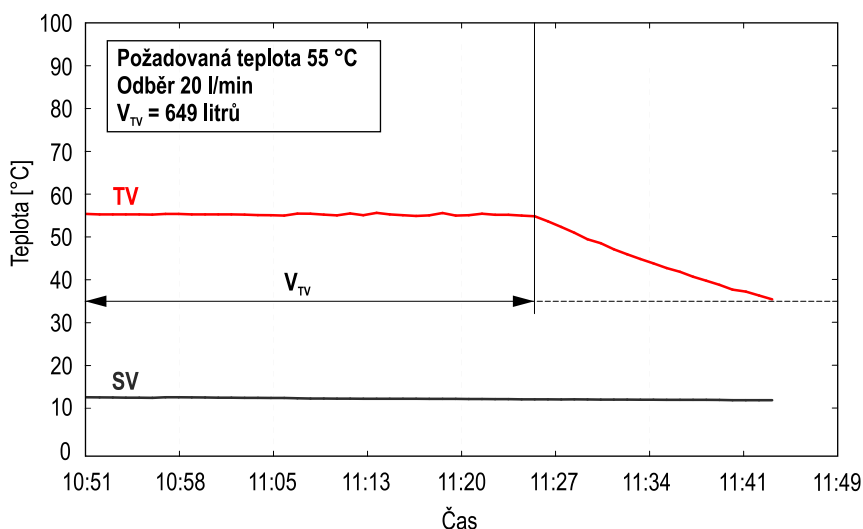
Zkouška zatížení jednorázovým odběrem probíhá z plně nabitého ohřívače. Z ohřívače je nepřerušovaně odebírán zvolený průtok teplé vody o zvolené teplotě. Průtok a teplota se volí s ohledem na očekávané provozní podmínky v místě instalace ohřívače. Zkoušku je vhodné provést postupně pro několik typických průtoků, v případě rodinných domů např. 5, 10 a 20 l/min. V průběhu zkoušky je snímána teplota za směšovací ventil teplé vody. Zkouška končí ve chvíli, kdy není ohřívač není dále schopen za nastavených podmínek teplou vodu o požadované teplotě dodávat.

Zkoušku je možné provést dvěma způsoby. Při prvním je k ohřivači připojen zdroj tepla, který může v případě potřeby vodu dohřát. Při této konfiguraci zkoušky je kromě indikátorů uvedených výše možné určit také trvalý průtok, který je ohřivač schopen při daném výkonu zdroje trvale dodávat. Tzn. takový průtok, při kterém nedojde k poklesu teploty pod požadovanou hodnotu.

Druhý způsob provedení zkoušky je popsán v německé normě DIN 4708-3 [53]. Při zkoušce podle této normy probíhá odběr z plně nabitého ohřivače, ale zdroj tepla musí být odstaven. Z toho je patrné, že není možné vyhodnotit průtok, který je ohřivač schopen dodávat trvale. Tento typ zkoušky se často využívá pro hodnocení charakteristik nepřímé přípravy teplé vody například v akumulačních nádržích. Umožňuje zhodnotit vliv konstrukčního řešení výměníku na sdílení tepla mezi otopnou vodou v akumulační nádrži a teplou vodou protékající výměníkem. Číselným výstupem je celkové množství teplé vody, které je ohřivač schopen dodat, než teplota teplé vody poklesne pod nastavenou hodnotu.

Na Grafu 13 níže je zobrazena ukázka naměřené odběrové charakteristiky ze zatížení jednorázovým trvalým odběrem vyhodnocená podle DIN 4708-3. Jedná se o zkoušení akumulační nádrže s integrovaným výměníkem pro průtočnou přípravu teplé vody, které provedl Tolar [52]. Do grafu je naznačen úsek, ve kterém bylo vyhodnoceno množství teplé vody o požadované teplotě. Podle normy se vyhodnocuje nejen dodané množství teplé vody o požadované teplotě (zde 649 litrů), ale také celkové protečené množství teplé vody do poklesu teploty pod 35 °C. V případě ukázkového měření z Grafu 13 níže se celkem jedná o množství 1042 litrů. Při poklesu teploty odebírané teplé vody pod hranici 35 °C zkouška končí.

Vzhledem k tomu, že předmětem praktické části práce je řešení odběrových charakteristik přímo ohřivaných plynových zásobníků, je využít první popsání způsob vyhodnocení jednorázového nepřerušovaného odběru. Metodika vyhodnocení odběrové charakteristiky je shodná s postupem podle normy DIN 4708, jediný rozdíl je v provedení zkoušky. Ve zkoušce provedené v praktické části této práce není zdroj tepla odstaven a v případě potřeby může dodávat energii.



Graf 13 – Odběrová charakteristika na základě [52], odečet V_{TV} doplněn

Druhou možností získání odběrové charakteristiky je zatížení ohřivače zátěžovým profilem, který je složen z přerušovaných odběrů o různém průtoku a délce trvání. Zatížení tímto typem odběrů má simulovat odběrové charakteristiky ohřivače na skutečném místě instalace. Využívá se například při hodnocení ohřivačů v rámci energetického štítkování. Na rozdíl od zatížení souvislým jednorázovým odběrem umožňuje zátěžový profil lépe hodnotit dynamiku nabíjení a vybíjení ohřivače a vliv této dynamiky na stabilitu dodávky teplé vody. Zatížení je možné vyhodnocovat pro různé časové intervaly.

V případě vyhodnocení například pro jeden typický den v roce je možné odběrové charakteristiky zobrazit graficky ve formě průběhu dodávané teploty v závislosti na odebíraném průtoku. Toto zobrazení

umožňuje zhodnotit, jaký sled odběrů je pro ohřivač kritický. Příkladem kritického zatížení může být mnoho krátkých odběrů v rychlém sledu za sebou vystřídáných energeticky náročnou odběrovou špičkou. Pohotovostní kapacita zásobníku může být vyčerpána z krátkých odběrů a chybí pro pokrytí odběrové špičky. Číselným výstupem z tohoto typu zkoušky může být množství teplé vody, které bylo dodané o teplotě nižší než požadované.

Celoroční odběrovou charakteristiku je možné hodnotit přes indikátor úrovně nabití ohřivače za rok. Postup vyhodnocení je následující. Ohřivač se po dobu celého roku zatíží zvoleným zátěžovým profilem a sledují se teploty vody v ohřivači v místě termostatu. Následně se pro celý rok vyhodnotí, v kolika případech v roce nebyl ohřivač během odběru teplé vody nabit na dostatečnou teplotu. Tento způsob vyhodnocení lze použít například pokud je potřeba porovnat provoz ohřivače na několik různých instalacích s různým charakterem odběrů, např. rodinné, bytové a administrativní objekty. Z dosažených výsledků je možné posoudit, jaký charakter odběrů je pro ohřivač nejnáročnější, resp. při kterém nejčastěji docházelo k poklesu teploty teplé vody pod požadovanou hodnotu.

V případě ohřivačů řešených v praktické části práce tento způsob vyhodnocení umožňuje poměrně snadno zhodnotit vliv zatížení ohřivače od vytápění i přípravy teplé vody. Na Grafu 14 níže je uveden příklad možného vyhodnocení celoroční charakteristiky. Okrajové podmínky a intervaly teplot sledovaných na termostatu mohou být nastaveny například takto:

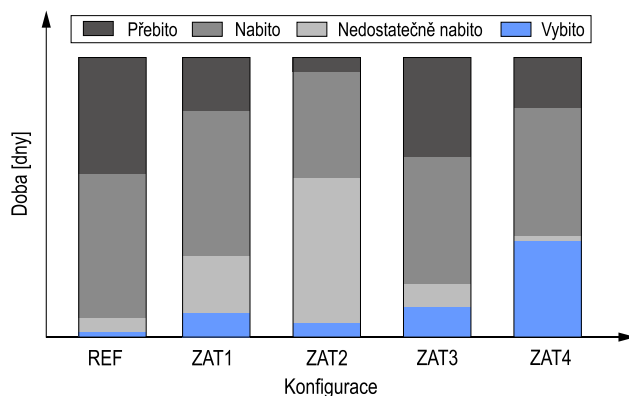
Okrajové podmínky

Spínací teplota na termostatu t_{SET} : 55 °C
 Požadovaná teplota teplé vody t_{TV} : 45 °C

Intervaly

Přebito: $t_{SET} > 55 \text{ °C}$
 Nabito: $45 \text{ °C} \leq t_{SET} \leq 55 \text{ °C}$
 Nedostatečně nabito: $35 \text{ °C} \leq t_{SET} < 45 \text{ °C}$
 Vybito: $t_{SET} < 35 \text{ °C}$

Výstupem z takto vyhodnocené celoroční charakteristiky je graf, který zobrazuje celkový čas, kdy byl zásobník přebit, nabit, nedostatečně nabit nebo plně vybit. V případě zobrazené ukázky je při stavu přebito a nabito zajištěno, že za směšovací ventil je k dispozici teplota o teplotě 45 °C a vyšší. Stav přebito představují dobu, kdy buď nedocházelo k žádnému odběru vody z ohřivače nebo byl odběr tak malý, že teplota na termostatu nestihla poklesnout pod 55 °C. Stav nabito představují situaci, kdy docházelo k odběru teplé vody, ale ohřivač dokázal dodávku splnit. Při stavu nedostatečně nabito sice nebude na odběrném místě k dispozici voda o požadované teplotě, ale uživatel ještě nebude pociťovat diskomfort. Stav vybito reprezentují situace, kdy není na odběrném místě k dispozici voda o dostatečné teplotě a uživatel může pociťovat diskomfort. Ideální provozní charakteristika je taková, ve které se vyskytnou pouze stavy přebito a dostatečně nabito.



Graf 14 – Příklad hodnocení nabití pro různé konfigurace zatížení

3.5 Přístupy k modelování ohřivačů a volba simulačního nástroje pro hodnocení provozu

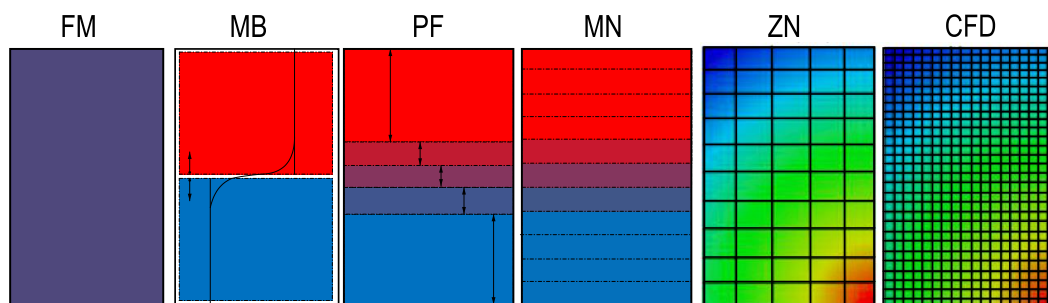
K analýze provozních charakteristik ohřivačů je možné využít simulační nástroje. Základním předpokladem pro úspěšné provedení simulací je zvolení vhodného simulačního nástroje pro konkrétní řešený problém. Předmětem praktické části této práce je simulační vyhodnocení provozu ohřivače, který je instalován v systému přípravy teplé vody a vytápění. Zvolený simulační nástroj musí umožňovat sestavení celého řešeného systému. Sestavený numerický model celého systému by měl poskytovat odpovědi na všechny zkoumané problémy a měl by být právě tak komplexní, aby bylo možné výsledkům simulace porozumět a dále s nimi pracovat. Hlavním kritériem pro výběr simulačního nástroje je možnost detailního zkoumání provozních charakteristik ohřivače. Knihovna zvoleného simulačního nástroje musí obsahovat numerický model ohřivače, jehož charakteristiky budou s dostatečnou přesností odpovídat charakteristikám skutečného ohřivače. Druhým požadavkem je možnost simulovat odběry teplé vody v podrobném rozlišení, aby bylo možné sledovat chování ohřivače během odběrových špiček. Prakticky to znamená požadavek na schopnost simulačního nástroje provádět simulace v krocích v řádu minut.

Při výběru simulačního nástroje je možné vyjít z požadavků na model ohřivače, který musí být buď dostupný v knihovně simulačního nástroje nebo jej musí být možné pomocí simulačního nástroje vymodelovat. Vzhledem k tomu, že je rozsah práce omezen na pouze na numerické modelování, nebudou dále rozebrány analytické modely ani datové modely aproximované neuronovými sítěmi.

Numerické modely jsou založeny na řešení fyzikálních rovnic popisujících sledovaný děj. V případě ohřivačů se obecně jedná o rovnice přenosu hybnosti, tepla a hmoty. Numerické modely ohřivačů je možné rozlišit do skupin podle toho, v jakém rozsahu a detailnosti jednotlivé jevy přenosu hybnosti, tepla a hmoty řeší. Dle Dumonta [54] lze v současnosti nejvíce používané numerické modely ohřivačů dělit od nejméně komplexního po nejkompexnější následovně:

- Dokonale promíchané modely (FM)
- Dvouzónové modely s pohyblivou hranicí (MB)
- Plug-Flow modely (PF)
- Multisegmentové modely (MN)
- Zonální modely (ZN)
- CFD modely (CFD)

První čtyři vyjmenované modely představují skupinu jednorozměrných modelů a odlišují se od sebe tím, v jakém rozsahu řeší vývin teplotního profilu v ohřivači. Teplotní profil ovlivňuje stratifikaci, tedy zvrstvení vody v ohřivači dané rozdílnou hustotou v jednotlivých stratifikačních vrstvách. Modely FM stratifikaci zanedbávají úplně, viz Obr.14, a modely MB jí modelují velmi zjednodušeně. Modely PF a MN jsou dle Soomra [55] v numerických simulačních nástrojích často využívány, protože představují dobrý kompromis mezi přesností získaných výsledků a náročností na výpočetní čas. Poslední dva modely představují skupinu trojrozměrných modelů, přičemž zjednodušení zonálních modelů spočívá dle Dumonta [54] v zanedbání přenosu hybnosti. Typicky se využívají při řešení optimalizace konstrukce ohřivače.



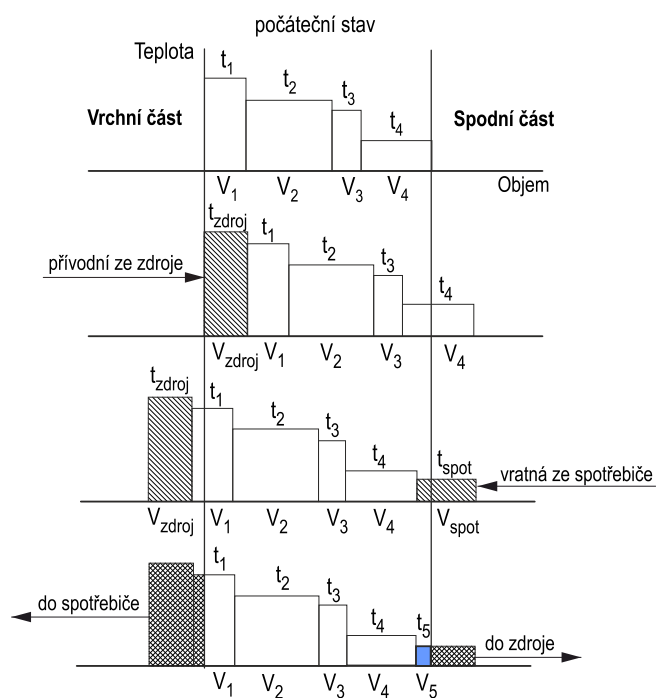
Obr. 14 - Schematické znázornění přístupů k modelování ohřivačů na základě [54]

Pro simulaci provozu ohřivače v rámci této práce nejsou zonální ani CFD modely vhodné, protože jsou příliš komplexní a neumožňují v dostupném čase modelovat celý řešený systém. Je nutné zvolit simulační nástroj, který je postaven na využití některého z jednorozměrných modelů ohřivačů. Výhody a nevýhody prvních čtyř modelů je potřeba podrobněji rozebrat.

Dokonale promíchané modely (Full mixed, FM) představují nejjednodušší a z hlediska výpočetního času nejrychlejší volbu. Při výpočtu se předpokládá homogenní teplota v celém objemu ohřivače, z čehož vyplývá, že model neumožňuje zhodnotit stratifikaci. Jak uvádí Dumont [54] model by měl být používán pouze při simulacích takových případů, kdy je možné stratifikaci skutečného ohřivače zanedbat. Například při simulaci ohřivačů s velmi malým objemem nebo ohřivačů navržených do systémů s velmi vysokým průtokem (High Flow). Pro systém řešený v této práci nejsou vhodné.

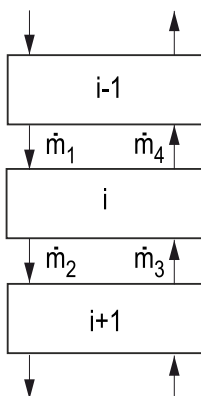
Dvouzónové modely s pohyblivou hranicí (Two zone with moving boundary layer, MB) uvažují, že ohřivač je rozdělen na dvě izotermické zóny – teplou a studenou, s proměnným objemem. Bilanční rovnice jsou řešeny pouze pro dvě zóny, což představuje výrazné zrychlení výpočetního času oproti multisegmentovému modelu. Dle Dickese [56] se používají pokud není možné využít multisegmentové modely kvůli vysoké náročnosti na výpočetní čas. Pro systém řešený v této práci nejsou vhodné.

Modely pístového toku (Plug-Flow, PF) simulují chování ohřivače pomocí proměnného počtu segmentů o proměnném objemu. Princip modelování je ukázán na příkladu na Obr. 15. Dle Kleinbacha [57] je ohřivač na ukázce v počátečním čase rozdělen na 4 segmenty o určitém objemu a teplotě. V následujícím časovém kroku dodá zdroj tepla objem V_{zdroj} o teplotě t_{zdroj} . Je uvažováno, že $t_{zdroj} > t_i$, takže nový segment je umístěn do vrchní části ohřivače a všechny ostatní segmenty jsou posunuty dolů. Pokud je zároveň v tom samém okamžiku do ohřivače přiveden objem V_{spot} o teplotě $t_{spot} < t_i$, pak se tento segment umístí do spodní části ohřivače a všechny ostatní segmenty se posunou nahoru. Tzn. k posunu profilu vlivem přívodu segmentu do vrchní a spodní části ohřivače může docházet současně. Celkový posun je daný rozdílem mezi objemem přivedeným do vrchní a do spodní části ohřivače. Části segmentů vytlačené z ohřivače vlivem posunu jsou navraceny do zdroje nebo do spotřebiče tepla. Pokud se teplota nově přivedeného segmentu neliší od teploty segmentu v ohřivači o více než 0,5 K, pak dojde ke smíšení těchto dvou segmentů. Pokud se liší, nový segment je do ohřivače zařazen jako samostatný. Kleinbach [57] upozorňuje, že tyto modely by se měly používat s opatrností, protože bylo zjištěno, že výsledky dosažené při simulaci ohřivačů tímto modelem byly závislé na volbě časového kroku simulace.



Obr. 15 - Princip Plug-Flow modelu na základě [57]

V multisegmentových modelech je ohřivač modelován jako N plně promíchaných segmentů o určitém objemu. Stupeň stratifikace je určen volbou N, přičemž vyšší počet N znamená vyšší úroveň stratifikace. V případě volby N=1 je multisegmentový model převeden na FM model, tzn. plně promíchaný bez vlivu stratifikace. Předpokladem pro modelování je, že proudy tekoucí z / do segmentu jsou promíchány před tím, než do segmentu vstoupí. Příklad je uveden na Obr.16. Dle Kleinbacha [57] to znamená, že proud o hmotnostním toku \dot{m}_1 je smísen s proudem o hmotnostním toku \dot{m}_4 a podobně proud o hmotnostním toku \dot{m}_2 se smísí s proudem o hmotnostním toku \dot{m}_3 , takže parametry výsledného proudu jsou určeny před provedením energetické bilance v segmentu. Dle Dumonta [54] se jedná o nejčastěji používaný model, protože představuje dobrý kompromis mezi přesností modelu a náročností na výpočet.



Obr. 16 – Hmotnostní toky v MN modelu na základě [57]

Validované modely ohřivačů využívající princip multisegmentových modelů a modelů Plug-Flow jsou dostupné například v knihovnách simulačního programu TRNSYS, viz Tabulka 1. TRNSYS byl zvolen pro řešení simulací v praktické části této práce zejména z toho důvodu, že obsahuje rozsáhlou knihovnu s ohřivači a zásobníky teplé vody o různém uspořádání např. vnitřních výměníků a s širokými možnostmi přizpůsobení základních modelů ohřivačů konkrétní řešené aplikaci. V ohřivačích modelovaných multisegmentovými modely je v TRNSYSu možné definovat například počet segmentů N, upravovat výšku vstupních a výstupních návrků, je možné definovat objem ohřivače, počet vnitřních výměníků, doplňkový zdroj tepla, pozici spínacího termostatu a počet spínacích termostátů, dále lze definovat například vlastnosti izolace ohřivače. K TRNSYSu je dostupný obsáhlý manuál s popisem principu, funkce a účelu použití jednotlivých modelů z knihoven. Ostatní simulační programy umožňující modelovat ohřivače vody, jako je například PolySun nebo T*SOL neumožňují tak komplexní a z uživatelského hlediska přívětivou práci, proto nebyly zvoleny.

Tabulka 1 - Seznam vybraných dostupných modelů ohřivačů v knihovnách TRNSYSu [58]

Kategorie modelu	Označení modelu	Knihovna	Poznámka
Multisegmentový model (MN)	Type 158	Základní	
	Type 156	Základní	
	Type 153	Základní	
	Type 154	Základní	Konstantní objem
	Type 531	TESS	
	Type 532	TESS	
	Type 533	TESS	
Plug-Flow model (PF)	Type 38	Základní	Konstantní objem
Dokonale promíchaný model (FM)	Type 39	Základní	Proměnný objem

Zvolený simulační nástroj TRNSYS-Transient System Simulation Program [58] je široce používaný modulární program určený pro analýzu energetických systémů budov. Modely používané k sestavení celého řešeného systému se v TRNSYSu označují jako moduly. Moduly mohou být buď dílčí komponenty systému a budovy nebo uživatelské podprogramy, například databáze klimatických dat. Moduly jsou v TRNSYSu pojmenovány jako „Type xxx“, například Type 110 značí čerpadlo. Základem pro práci s moduly je uživatelské rozhraní IISiBat, které umožňuje vkládat jednotlivé moduly, určit jejich parametry a následně mezi nimi definovat propojení. Definováním parametrů se určí vlastnosti modulů, které jsou v průběhu simulace neměnné. Vstupy a výstupy modulů jsou časově proměnné a určují se výpočtem v přidruženém výpočetním programu, který následně do IISiBat vrací výsledky.

Jak uvádí Matuška [59] simulační výpočty probíhají na principu sekvenčního modelování. Jednotlivé moduly jsou volány postupně, v každém se řeší příslušné matematické rovnice, jejichž výsledky jsou následně předány do dalšího modulu jako vstupy. Při použití některého modulu z knihovny TRNSYSu musí uživatel zadat pouze parametry a konstanty výpočtu a po provedení simulace obdrží výstupy [60]. Simulační prostředí TRNSYSu umožňuje programovat vlastní moduly nebo upravovat zdrojové kódy již existujících modulů. V rámci práce nebyly tyto možnosti využity, a proto nebudou popsány podrobněji. TRNSYS využívá přístup white box modelování. White box modely charakterizují chování jednotlivých simulovaných komponent detailními matematickými rovnicemi, které vychází ze základních fyzikálních principů popisující sledovaný děj. Parametry jednotlivých komponent, klimatická data, odběrové profily teplé vody a další vstupní parametry a okrajové podmínky musí zadat uživatel [61].

4 Cíle a metodika vyhodnocení provozu ohřivače na základě simulací

V této kapitole je uveden přehled cílů práce, účel sestaveného numerického modelu, simulované scénáře a zvolené indikátory hodnocení provozu ohřivače.

4.1 Účel numerického modelu

Numerický model je sestaven za účelem provedení simulací pro tři různé ohřivače umístěné ve třech objektech s rozdílným charakterem odběrů teplé vody a potřebou tepla na vytápění. Sestavený numerický model umožňuje vyhodnotit mnoho různých scénářů a konfigurací řešeného systému ve velmi krátkém čase, což je zásadní výhoda oproti provádění skutečných měření. Dále umožňuje simulovat sestavené scénáře za naprosto shodných klimatických a dalších okrajových podmínek, což je výhodné zejména ve chvíli, kdy je potřeba provádět parametrické studie. Sestavený numerický model umožňuje provést roční simulaci provozu ohřivačů v jemném časovém kroku, což je pro vyhodnocení charakteristik přípravy teplé vody zásadní přínos. Simulace jsou provedeny pro různé zatížení odběrovými profily teplé vody bez změny odběrového profilu vytápění.

4.2 Výzkumné otázky

Provedené simulační analýzy mají přispět k získání obecné představy o provozních a odběrových charakteristikách ohřivačů v kombinovaném systému a mají odpovědět na následující otázky:

- Jaký charakter zatížení je pro ohřivač kritický a co by mělo být zohledněno při návrhu?
- Jaké faktory mají vliv na provozní a odběrové charakteristiky ?

4.3 Stanovení cílů

Hlavním cílem simulační analýzy je odpovědět na výzkumné otázky položené výše. Aby mohly být otázky zodpovězeny, je nutné splnit níže uvedené dílčí cíle.

Prvním z dílčích cílů praktické části práce je sestavení funkčního modelu řešeného systému. V použitém simulačním programu se celkový model sestavuje z dílčích modulů, které reprezentují jednotlivé funkční prvky skutečného systému. V modulech je nutné nastavit značné množství parametrů, z nichž některé mohou výrazně ovlivnit výsledky simulační analýzy. Z těchto důvodů je dalším cílem této části práce popsat dílčí moduly, ze kterých je celkový model složen zdůvodnit nastavení jejich parametrů.

Předmětem práce je simulační analýza provozního chování třech modelů ohřivačů. Před provedením simulační analýzy je nutné provést ověření kvality sestavených modelů ohřivačů. Vzhledem k pandemické situaci a uzavřeným laboratorům nebylo možné provést vlastní měření podle kterého by se modely ohřivačů mohly ověřit. Modely musely být ověřeny pouze orientačně. K orientačnímu ověření byla využita data z technické dokumentace zkoumaných ohřivačů.

Problémem z hlediska nastavení modulů ohřivačů je variabilita v možnostech nastavení spínací teploty a hystereze na spínacím termostatu. Výrobce ohřivače uvádí pro oba parametry pouze nastavitelný rozsah bez doporučení, za jakých podmínek je vhodné volit jakou hodnotu. Volba spínací teploty navíc závisí na uživatelských preferencích. Jak vyplynulo z rešeršní části, nevhodná kombinace těchto parametrů může zásadním způsobem negativně ovlivnit provozní charakteristiku. Dalším dílčím cílem je provést parametrickou studii a najít pro daný ohřivač a dané okrajové podmínky optimální kombinaci hystereze a spínací teploty termostatu. Navazující simulace budou následně provedeny s optimálním nastavením.

Dále je cílem provést test provozní a odběrové charakteristiky ohřivače při jednorázovém zatížení trvalým průtokem a poté při zatížení odběrovým profilem. Na základě výsledků je možné definovat, jaké zatížení je pro ohřivač hraniční a jak se projevuje na provozní charakteristice. Vzhledem k velkému objemu výstupních dat je vyhodnocení simulací provedeno v Matlabu. Sestavený skript pro vyhodnocení je přiložen k práci. Výsledky ročních simulací jsou porovnány a zhodnoceny přes definovaná hodnotící kritéria.

Přínosem analýz provozních charakteristik je rozšíření prozatím dostupných informací k provozu kombinovaných ohřivačů o nové poznatky.

4.4 Simulované scénáře

Pro simulační analýzu je v TRNSYSu sestaveno jedno základní schéma zapojení. To zůstává pro všechny řešené varianty shodné, mění se pouze parametry některých modulů numerického modelu. Simulační analýza je provedena pro tři modely ohřivačů umístěné ve třech různých objektech. Každý ze scénářů představuje modelový příklad možného použití ohřivače ve skutečné instalaci:

- **Scénář A:** Ohřivač IR 12–160 v rodinném domě
- **Scénář B:** Ohřivač IR 20–200 v bytovém domě
- **Scénář C:** Ohřivač IR 32–380 v modulárních mycích boxech

Účelem scénáře A je simulovat použití ohřivače v podmínkách typických pro novostavby rodinných domů. Model rodinného domu je záměrně sestaven tak, aby měl nízkou tepelnou ztrátu a náročnějším systémem z hlediska dodávky energie byl systém přípravy teplé vody. Scénář A představuje modelový případ cílové skupiny objektů, pro který je řešený způsob zapojení a provozu ohřivače doporučovaný.

Scénář B představuje situaci, která nastane, pokud je ohřivač vzhledem k parametrům připojeného objektu navržen nevhodně. Model bytového domu je záměrně sestaven tak, aby měl vysokou tepelnou ztrátu vzhledem ke jmenovitému výkonu ohřivače. Ohřivač musí dodávat velké množství energie pro pokrytí požadavků vytápění, což se může negativně projevit na dodávce teplé vody. Scénář B je modelovým příkladem projekční chyby.

Scénář C představuje situaci v modulárních mycích boxech, kde ohřivač dodává minimální množství energie pro vytápění buňky pro zaměstnance, ale musí být schopen pokrýt energeticky náročné odběry teplé vody. Na rozdíl od rodinného domu ze scénáře A se jedná o delší a četnější odběry, které představují jiný charakter zatížení než v případě rodinného domu.

4.5 Stanovení indikátorů

Pro zhodnocení simulační analýzy a porovnání jednotlivých simulovaných variant mezi sebou je nutné definovat kritéria pro vyhodnocení. Zvolená kritéria musí zhodnotit provozní i odběrovou charakteristiku ohřivače. Jak bylo uvedeno v teoretické části práce, jako indikátory provozní charakteristiky je možné použít počet startů a souvislou dobu chodu v dané periodě vyhodnocení. Provozní charakteristiku lze vyhodnocovat v měřítku dní graficky zobrazením dodávky energie z ohřivače do teplé vody v závislosti na čase. To umožní zhodnotit jak často ohřivač za daný den sepnul a jak dlouho trvala dodávka energie. V delším časovém měřítku, například za periodu celého roku, je možné provozní charakteristiku zhodnotit číselně. Pro číselné zhodnocení provozní charakteristiky byl sestaven skript v Matlabu, nejdůležitější části skriptu jsou uvedeny v Příloze 4, celý skript je přiložen k práci na CD.

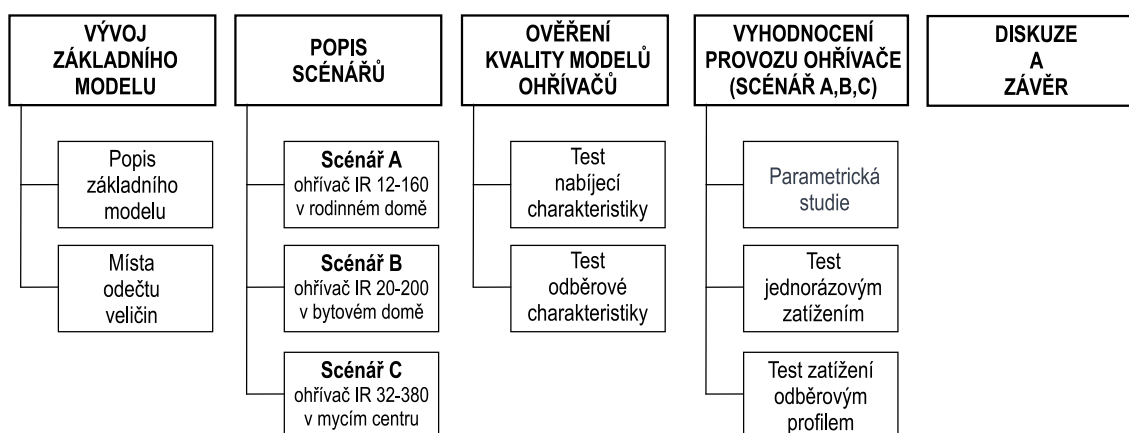
Testy odběrové charakteristiky je možné hodnotit v různém časovém měřítku a rozsahu. Pro praktickou část práce byl zvolen test odběrové charakteristiky pod jednorázovým zatížením a pod zatížením odběrovým profilem. Test pod jednorázovým zatížením probíhá v časovém měřítku hodin a indikátorem hodnocení je doba, po kterou je ohřivač schopen dodávat požadovaný průtok o požadované teplotě. Test odběrovým profilem teplé vody je možné provést v časovém měřítku hodin až roků a hlavním indikátorem pro hodnocení ohřivače je schopnost dodávat požadovaný průtok vody o požadované teplotě po celou dobu trvání odběru. Test zatížení odběrovým profilem je možné vyhodnotit v měřítku jednotlivých dní graficky, kdy se sleduje teplota a průtok dodávané teplé vody. V případě periody jednoho roku lze pro hodnocení odběrové charakteristiky použít číselný indikátor úrovně nabití ohřivače, tak jak bylo uvedeno v teoretické části práce.

Indikátorem pro hodnocení provozní charakteristiky ohřivače z hlediska vytápění je dodržení požadované teploty ve vytápěném prostoru. Dodržení teploty je závislé nejen na schopnosti ohřivače dodat

požadované množství energie, ale také na přenosových schopnostech výměníku tepla, otopných ploch a na použité regulaci. Z toho důvodu jsou parametry výměníku, otopných ploch a nastavení regulace navrženy pro všechny řešené případy individuálně a model je při každé změně v nastavení budovy odpovídajícím způsobem přenastaven.

4.6 Postup simulací

Model popsaný v předchozí kapitole je postupně nastaven pro simulaci všech tří ohřivačů, jak je schematicky naznačeno na Obr. 17 níže. Nastavení jednotlivých scénářů je popsáno a kvalita sestavených modely ohřivačů je ověřena testem nabíjecí a odběrové charakteristiky teplé vody bez současného odběru teplé vody do vytápění. Ověření je provedeno proti datům z technické dokumentace výrobce. Následně je pro každý scénář provedena parametrická studie optimálního nastavení. S optimálním nastavením je proveden test vyhodnocení provozu ohřivače pro současnou dodávku energie do vytápění a pro přípravu teplé vody. Zjištěné poznatky jsou diskutovány a následně shrnuty v závěru.



Obr. 17 - Postup simulací

5 Vývoj simulačního modelu

V této kapitole je představeno schéma zapojení modelu, které bylo použito pro roční simulaci provozních charakteristik všech tří ohřivačů. Jsou popsány společné okrajové podmínky. Veškeré popisy modulů uvedené v této kapitole jsou čerpány z manuálu k TRNSYSu [62].

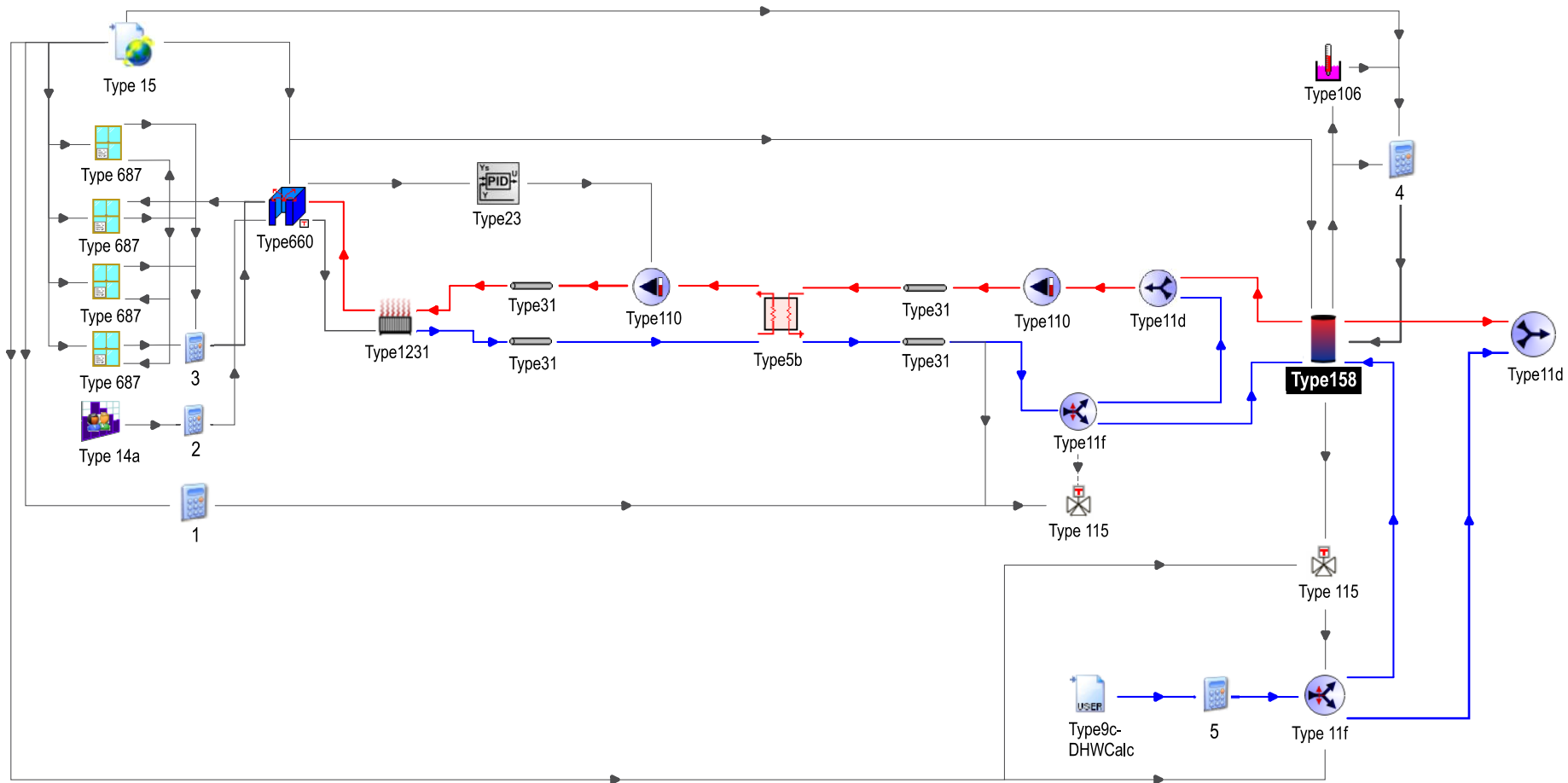
5.1 Vývoj základního modelu

Řešeným systémem je kombinovaný systém přípravy teplé vody a vytápění, jehož sestavený model je zobrazen na Obr. 18 na následující straně. Jako společný zdroj tepla je v systému využit přímo ohřivaný plynový zásobníkový ohřivač s modulačním hořákem. Zásobníkový ohřivač připravuje teplou vodu pro přímou dodávku tepelné energie do systému přípravy teplé vody. Do systému vytápění je tepelná energie dodávána nepřímo prostřednictvím protiproudého deskového výměníku. Před vstupem do výměníku je teplá voda směřována v motorickém třícestném směšovací ventilu na požadovanou výstupní teplotu. Směšování je řízeno ekvitermní regulací. Cirkulaci teplé vody v sekundárním okruhu systému vytápění zajišťuje oběhové čerpadlo s proměnnými otáčkami. Otáčky čerpadla jsou řízeny PI regulátorem ve vazbě na aktuální teplotu v zóně. Není uvažována přednostní příprava teplé vody, ohřivač musí být schopný připravovat teplou vodu a současně dodávat dostatek energie do systému vytápění.

Ohřivač je reprezentován modulem Type 158. Spínání dohřevu je řízeno modulem Type 106, který monitoruje teplotu na termostatu ohřivače a v případě potřeby generuje signál pro spuštění dohřevu. Modul 4 obsahuje rovnice, které simulují modulační hořák. Výkon je modulován lineárně v závislosti na venkovní teplotě. Venkovní teplota je na vstup do modulu 4 přivedena z modulu Type 15, který představuje klimatická data. Do rovnic pro modulaci je dále zahrnuta bezpečnostní funkce pro odběry teplé vody. Ta v případě výskytu odběru teplé vody zajistí modulaci na maximální výkon bez ohledu na to, jaký je aktuální požadavek na dodávku výkonu do vytápění od ekvitermní regulace.

Co se týče odběrových profilů teplé vody, pro jejich generování byl využit program DHWcalc. Pro načtení vygenerovaných profilů do prostředí TRNSYSu slouží modul Type 9c. Pro směšování na požadovanou teplotu je využit modul Type 11f, který představuje rozdělovací ventil, Type 11d který představuje směšovací ventil a Type 115, který slouží ke generování řídicího signálu pro rozdělovací ventil. Systém pracuje s proměnnou teplotou studené vody za rok, která je přejímána z modulu Type 15.

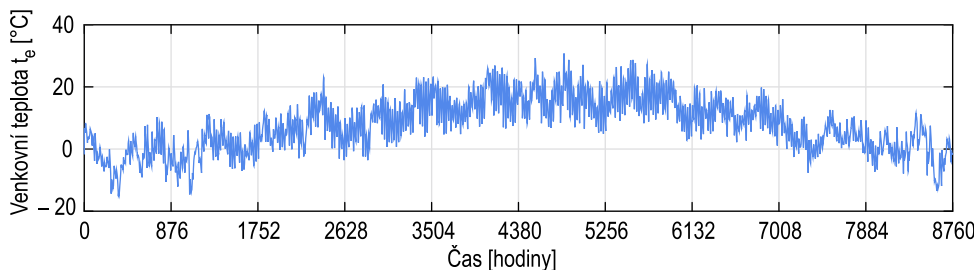
Otopný systém je tvořen primárním a sekundárním okruhem. V primárním okruhu je teplá voda z ohřivače směšována na požadovanou teplotu pomocí soustavy rozdělovacího a směšovacího ventilu Type 11f, resp. Type 11d. Směšování je řízeno ekvitermní regulací, jejíž rovnice jsou obsaženy v modulu 1. Vypočtená požadovaná ekvitermní teplota je přivedena na vstup do modulu Type 115, který generuje řídicí signál pro směšovací a rozdělovací ventil. Cirkulaci teplé vody v primárním okruhu zajišťuje čerpadlo s konstantními otáčkami. Ke sdílení tepla mezi primárním a sekundárním okruhem slouží výměník, který je reprezentován modulem Type 5b. V sekundárním okruhu zajišťuje cirkulaci otopné vody čerpadlo s proměnnými otáčkami. Čerpadlo je řízeno PI regulátorem, který zajišťuje změnu otáček čerpadla a tedy regulaci přívodní teploty otopné vody v případě, že předmísení v primárním okruhu nebylo pro aktuální podmínky dostatečné. Modul Type 1231 reprezentuje otopnou soustavu. Budova je reprezentována modulem Type 660 a okna budovy modulem Type 687. Oba moduly jsou propojeny s modulem Type 15, ze kterého přebírají informaci o venkovní teplotě, případně o dopadajícím slunečním záření. Proměnnou obsazenost budovy simuluje modul Type 14a.



Obr. 18 – TRNSYS Deck file sestaveného základního modelu

Klimatická data

Pro načítání klimatických dat slouží modul Type 15, data jsou dostupná přímo v knihovně TRNSYSu. Jsou využita klimatická data pro Prahu CZ-Praha-115180.tm2 z databáze Meteororm V 5.0.13. Roční průběh teplot suchého teploměru ve zvoleném místě je zobrazen na Grafu 15. Roční střední teplota pro Prahu je 7,9 °C, maximální naměřená teplota 30,7 °C, minimální naměřená teplota -15,2 °C. Minimální naměřená teplota ukazuje, že v pomocných výpočtech pro stanovení tepelných ztrát modulu budovy Type 660 a pro návrh parametrů otopné plochy Type 1231 nelze uvažovat jako nejnižší venkovní výpočtovou teplotu -12 °C, ale tato musí být snížena na extrém z použitých klimatických dat.



Graf 15- Roční průběh teplot suchého teploměru pro Prahu

Modul budovy, modul oken a profil obsazenosti budovy

Pro modelování budovy je využit modul Type 660. Simulační výpočty jsou založeny na řešení tepelných a hmotnostních bilancí modulu v každém časovém kroku simulace. Do Type 660 je nutné zadat součinitel tepelných ztrát prostupem, tepelnou kapacitu a objem simulované budovy. Pro všechny řešené objekty byly definovány geometrické charakteristiky, skladby konstrukcí a jejich tepelně-technické vlastnosti. Z nich byly dopočteny potřebné parametry pro zadání do modulu Type 660. Kompletní výpis pomocných výpočtů je vzhledem k rozsahu uveden pouze v příloženém excelu PV_Langerova.xls, nejdůležitější hodnoty a výpočty jsou pro rodinný dům, bytový dům a automyčku uvedeny v Příloze 1, Příloze 2 a Příloze 3.

Pro výpočet tepelných toků neprosklenými částmi obálky budovy je Type 660 nutné propojit s informací o venkovní teplotě z modulu Type 15, který představuje klimatická data. Propojením s modulem Type 687, který představuje prosklenou plochu, se do výpočtu zahrnou tepelné toky skrz okna. Zohledňují se tepelné toky prostupem i tepelné zisky radiací. Do modulu okna je nutné zadat hodnotu SHGC (Solar Heat Gain Coefficient), která vyjadřuje poměr záření, které prošlo celou sestavou okna k záření, které na celou sestavu okna dopadlo. Do simulace byla hodnota SHGC zadána z doporučeného rozsahu podle organizace *National Fenestration Rating Council* [63], která zajišťuje certifikaci a kontrolu kvality oken v USA. Do simulačního řešení jsou zahrnuty také vnitřní zisky od osob. Profil obsazenosti budovy je definován pomocí Type 14a a pro rodinný dům, bytový dům a automyčku je uveden v Příloze 1, Příloze 2 a Příloze 3.

Odběrové profily teplé vody

Odběrové profily jsou načítány přes Type 9c z externího textového souboru. Externí soubor byl vygenerován pomocí programu DHWCalc [34]. DHWcalc je na základě uživatelsky zadaných parametrů schopný generovat realistické odběrové profily teplé vody v minutovém časovém kroku. Program je založen na využití statistiky a statistického rozdělení odběrů podle zadaných okrajových podmínek. Uživatel zadá celkové množství odebrané teplé vody za den a charakterizuje typy odběrů zadáním průměrného průtoku za daný odběr, zadáním průměrné délky trvání daného odběru a podílu daného typu odběru na celkovém odebraném množství TV za den. Konkrétní hodnoty použité v rámci této práce se pro každý simulovaný objekt liší a jsou uvedeny v příslušných kapitolách. Dále je nutné definovat, s jakou pravděpodobností se dílčí odběry v odběrovém profilu vyskytují. Program nabízí více možností zadání, například pro rodinné domy byla využita volba *DHW Standard Distributions*, které již obsahuje předdefinované nastavení

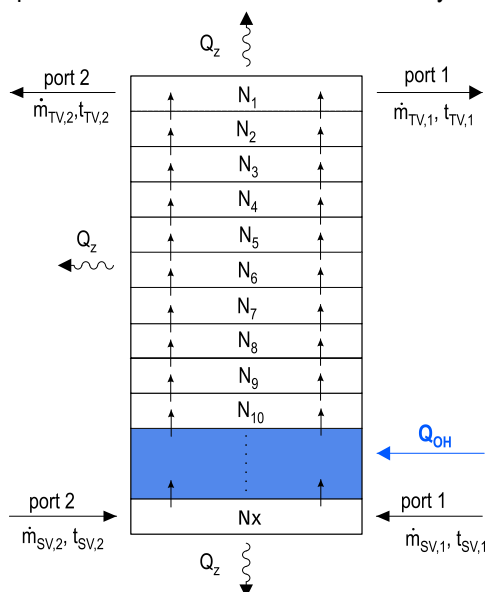
pravděpodobnostního rozdělení. Toto nastavení uvažuje pro malé a střední odběry konstantní pravděpodobnost výskytu přes den a nulový výskyt přes noc, pro odběry vany a sprchy uvažuje se špičkami ráno a večer. Tento trend výskytu odběrových špiček dobře koresponduje s výsledky experimentálních měření v českých bytových domech, které provedl v roce 2003 Bárta [64] a poté v roce 2016 rozsáhleji Vavříčka a Mazur [65]. Pro modulární mycí boxy bylo definováno jiné rozdělení a je podrobněji popsáno v příslušné kapitole v navazujících částech práce. Veškeré použité odběrové profily jsou uloženy ve formátu .txt na CD, které je přiloženo k práci.

Moduly ohřivačů

Ohřivače jsou modelovány pomocí modulu Type 158. V nastavení modulu se určí celkový objem vody v ohřivači a počet kontrolních objemů N_i , kterými se definuje úroveň stratifikace ohřivače. Spur [66] uvádí, že hodnota $N_i = 1$ odpovídá plně promíchanému a hodnota $N_i = 100$ dokonale stratifikovanému ohřivači.

Pokud je do ohřivače některým ze vstupních portů přivedeno určité množství vody o určité teplotě, dojde nejdříve ke sdílení tepla s vodou v kontrolním objemu, do kterého byla nová voda přivedena. Teprve po promíchání se množství tekutiny o výsledné teplotě $t_{v,i}$ přivede do sousedních kontrolních objemů, kde opět dochází ke sdílení tepla. Při výpočtu jsou uvažovány tepelné ztráty do okolí z vrchní části, z podstavy i z pláště ohřivače. Type 158 umožňuje nadefinovat dva vstupní a dva výstupní porty z ohřivače a jejich umístění. Proudění je modelováno tak, že vstupní port 1 je spárován s výstupním portem 1. Množství tekutiny o teplotě $t_{sv,1}$ vstupující do vstupního portu 1 prochází dílčími kontrolními objemy se kterými sdílí teplo a opouští ohřivač výstupním portem 1 při teplotě $t_{tv,1}$, jak je uvedeno na Obr. 19.

V TRNSYSu v současné době nejsou k dispozici moduly pro modelování spalovacích komor a plynových přímo ohřivaných zásobníků teplé vody. Plynové zásobníkové ohřivače je nutné modelovat zjednodušeně definováním množství energie dodané ze zdroje tepla Q_{OH} přes vstup nazvaný *Auxiliary Heat Input*. Uživatel definuje množství a výšku vstupu, čímž specifikuje, do kterého z dílčích kontrolních objemů je energie přivedena. Z uvedeného vyplývá, že množství dodaného tepla do ohřivače nevychází z řešení rovnic spalování zemního plynu, ale je definováno napřímo výpočtem z rovnic pro modulaci výkonu. Z výše uvedených informací také plyne, že v rámci práce není možné vyhodnocovat provozní charakteristiky spojené s prací v kondenzačním režimu. Sestavené moduly ohřivačů byly ověřeny podle dat od výrobce. Porovnání charakteristik sestavených modulů a skutečných ohřivačů bylo provedeno přes nabíjecí a odběrové charakteristiky přípravy teplé vody. Ověření je uvedeno v navazujících kapitolách spolu s podrobným popisem nastavení parametrů modulu každého ze tří řešených ohřivačů.



Obr. 19 – Schéma Type 158 na základě [67]

Řídicí signál pro spuštění dohřevu vody v ohřivači a rovnice pro modulaci výkonu ohřivačů

Modul Type 106 řídí spínání dodávky energie. Monitoruje teplotu na termostatu v ohřivači a porovnává ji s uživatelsky nastavenou spínací teplotou se zohledněním nastavené hystereze. Pokud je teplota na termostatu nižší než nastavená spínací teplota mínus polovina nastavené hystereze, Type 106 generuje řídicí signál 1 pro dodávku energie. Řídicí signál je v rovnicích níže označen písmenem Y a je vstupem do rovnic pro modulaci výkonu ohřivače v modulu 4 (kalkulačka).

Modulace dodávaného výkonu je řešena ekvitermně s bezpečnostní funkcí dodávky teplé vody pro případ odběrové špičky. Pokud není požadavek na pokrytí špičkového odběru TV, ohřivač moduluje výkon Q_{OH} ekvitermně v závislosti na venkovní teplotě t_{eB} , jak je naznačeno v prvním vztahu. Venkovní teplota je do modulu přivedena z Type 15, který načítá klimatická data. Logika zápisu vztahu říká, že pro teploty nižší než dolní limitní t_{e_limd} bude dodán maximální výkon Q_{OH_max} , pro teploty vyšší než horní limitní t_{e_limh} bude dodán minimální výkon Q_{OH_min} , který je možné modulací dosáhnout.

Pro modulaci výkonu při venkovních teplotách v oblasti mezi dolní a horní limitní teplotou platí poslední část vztahu. Ta uvádí, že pro oblast mezi t_{e_limd} a t_{e_limh} bude výkon ohřivače modulován lineárně podle venkovní teploty. Konstanty a, b v rovnici jsou uvedeny pro každý z řešených ohřivačů v příslušné kapitole. Jejich výpočet je vzhledem k rozsahu uveden pouze v přiloženém excelu s pomocnými výpočty PV_Langerova.xls.

Pokud se vyskytne odběrová špička teplé vody, ohřivač dodá maximální výkon Q_{DHW} bez ohledu na aktuální venkovní teplotu podle druhého vztahu. Druhý vztah uvádí, že pokud se na vyskytne větší než nulový průtok (odběr) teplé vody a zároveň bude teplota vody na termostatu t_{SET} nižší než nastavená limitní t_{lim} ohřivač dodá maximální (jmenovitý) výkon Q_{OH_max} . V případě, že je teplota na termostatu vyšší než nastavená limitní teplota nebo v případě, že k odběru teplé vody na odběrná místa nedochází, je Q_{DHW} nulový a je dodáván výkon Q_{OH} vypočtený podle první rovnice. Poslední uvedený vztah zajišťuje výběr většího z obou vypočtených výkonů, tzn. výsledný výkon skutečně dodaný ohřivačem bude mít hodnotu Q_{OH_OUT} .

$$Q_{OH} = LT(t_{eB}, t_{e_limd}) * Y * Q_{OH_max} + GT(t_{eB}, t_{e_limh}) * Y * Q_{OH_min} + AND(GT(t_{eB}, t_{e_limd}), LT(t_{eB}, t_{e_limh})) * Y * (-a * t_{eB} + b)$$

$$Q_{DHW} = AND(GT(q_{DHW}, 0), LT(t_{SET}, t_{lim})) * Y * Q_{OH_max}$$

$$Q_{OH_OUT} = MAX(Q_{OH}, Q_{DHW})$$

Modul deskového protiproudého výměníku

Deskový protiproudý výměník je modelován pomocí modulu Type 5. Sdílení tepla v Type 5 je modelováno zjednodušeně výpočtem dle metody $\varepsilon - NTU$. Známymi veličinami jsou hmotnostní průtoky a teploty obou pracovních kapalin na vstupech do výměníku. Parametrem je teplosměnná plocha výměníku A a hodnota celkového součinitele prostupu tepla U. Z těchto hodnot Type 5 dopočítává termickou účinnost ε a následně výstupní teploty obou proudů. Do modulu výměníku je nutné zadat součin U.A [W/K]. Výměník je simulován zjednodušeně a je předpokládáno, že součin UA zůstává při změně provozních parametrů konstantní. Součin UA je v pomocných výpočtech nutné navrhnout tak, aby byl výměník schopen výkon dodaný v teplé vodě na primární straně přenést do strany sekundární. Návrh výměníku pro všechny tři simulované ohřivače a příslušné budovy je uveden v přiloženém excelu PV_Langerova.xls, případně v Příloze 1, Příloze 2 a Příloze 3.

Moduly potrubí

Modul potrubí umožňuje zohlednit tepelné ztráty v rozvodech otopné vody. Pro modelování potrubí je využit modul Type 31. Proud vstupující do modulu je rozdělen na několik segmentů, teplota vody vstupující z počátečního segmentu do následujícího je vždy nižší o tepelné ztráty.

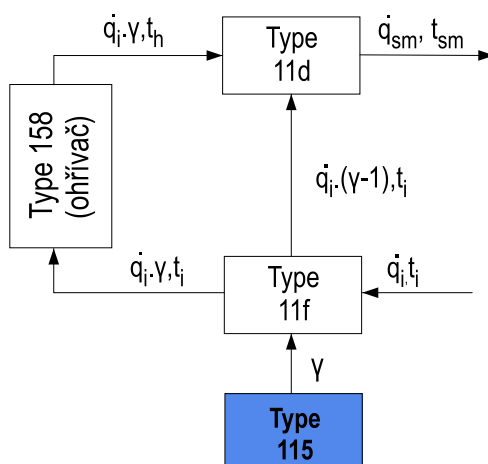
Moduly směšovacích a rozdělovacích armatur

Jako směšovací armatura je použit modul Type 11d, jako rozdělovací armatura modul Type 11f. V modulech dochází ke směšování, resp. rozdělování proudů podle směšovacích rovnic. V případě směšování se výstupní hmotnostní průtok se určí prostým součtem obou vstupních hmotnostních průtoků a teplota proudu po smísení ze směšovací rovnice, viz matematický manuál k TRNSYSu [67].

V případě rozdělovacích armatur je nutné definovat, v jakém poměru bude vstupní průtok rozdělen. Tento dělicí poměr je možné definovat buď jako parametr nebo jako proměnnou. Ta musí být určena externím regulátorem a následně přivedena na vstup do rozdělovací armatury. V práci je poměr definován jako proměnná a jako regulátor využit modul Type 115, který je podrobněji popsán dále v textu. Teploty po rozdělení zůstávají rovny teplotě vstupního proudu a průtoky se určí podle rovnic uvedených v matematickém manuálu [67].

Řízení směšování teplé vody pro systém přípravy TV a pro vytápění

Pro řízení směšování TV je využit modul Type 115. Slouží ke generování řídicího signálu, resp. rozdělovacího poměru γ pro rozdělovací ventil. Signál je generován tak, aby byla na výstupu ze směšovacího ventilu udržena požadovaná nastavená teplota. Pro řízení směšování otopné vody je také využit modul Type 115 pracující na stejném principu. Rozdíl je v nastavení požadované výstupní teploty ze směšovacího ventilu – v případě směšování TV byla nastavena jako parametr, ale v případě otopné vody je proměnná – její výpočet probíhá v ekvitermním regulátoru a je přivedena do modulu Type 115 jako vstup. Princip výpočtu je popsán na následujících stranách. Princip řízení směšování je naznačen na Obr. 20.



Obr. 20 – Řízení směšování na základě [67]

Modul otopných ploch

Pro modelování otopných ploch je využit modul Type 1231. Jeho parametrem je návrhový výkon, návrhová střední teplota otopné vody, návrhová teplota okolního vzduchu, koeficient počtu trubek, vnitřní průměr potrubí a návrhový exponent n , který charakterizuje typ zvolené otopné plochy. Pro správné nastavení modulu je nutné provést pomocné výpočty. Pomocné výpočty jsou uvedeny v příloženém excelu PV_Langerova.xls

Ekvitermní regulace směšování teplé vody pro systém vytápění

Ekvitermní regulace slouží k regulaci teploty teplé vody vstupující do primárního okruhu systému vytápění. Teplota otopné vody je regulována směšováním pomocí Type 115 a Type 11d tak, aby bylo na výstupu dosaženo vypočtené ekvitermní teploty. Princip výpočtu ekvitermní teploty vychází ze závislosti vstupní teploty teplé vody do soustavy na venkovní teplotě a podrobněji byl popsán v teoretické části práce.

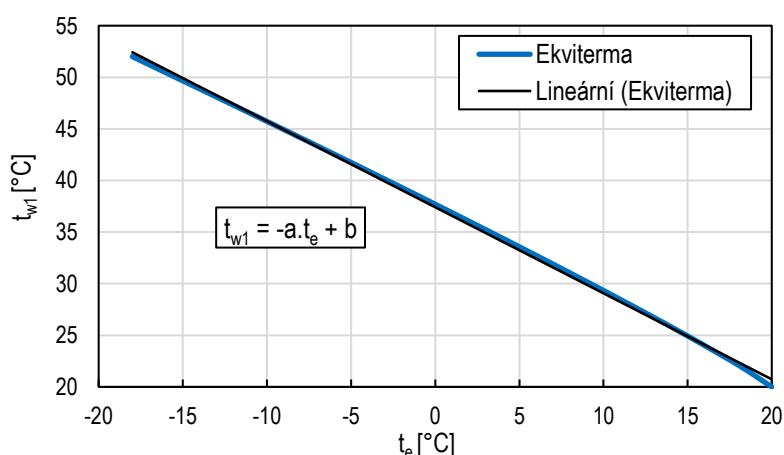
Na základě vztahů z teoretické části práce byly v pomocném excelu PV_Langerova.xls sestaveny ekvitermní křivky pro všechny uvažované budovy. Pro použití v TRNSYSu je nutné zjistit rovnice křivek. Křivky je možné aproximovat polynomem 1. nebo 2. řádu. Pro zjednodušení výpočtu byla zvolena aproximace polynomem 1. řádu, který vykazoval hodnotu spolehlivosti proložení $R^2=0,999$, což je pro účely práce dostačující. Rovnici ekvitermy po náhradě polynomem 1. řádu (přímkou) lze obecně zapsat rovnicí 18 níže:

$$t_{w1} = a \cdot t_e + b \quad (18)$$

Hodnoty koeficientů a a b závisí na konkrétním objektu a parametrech otopného systému. Pro ukázkou je na Grafu 16 zobrazena rovnice ekvitermní křivky pro rodinný dům s podlahovou otopnou plochou simulovanou v kombinaci s ohřivačem IR 12-160. Výsledná rovnice byla implementována do TRNSYSu pomocí modulu 1 (kalkulačka). Příklad obecného tvaru sestavené rovnice je uveden níže. Zápis říká, že pokud je aktuální venkovní teplota t_e menší než návrhová $t_{e,N}$, je teplota přívodní vody po smísení rovna návrhové teplotě $t_{w1,N}$. Pokud je teplota vyšší než návrhová, je teplota přívodní vody směřována v závislosti na aktuální venkovní teplotě t_e podle ekvitermní křivky s obecnou rovnicí $-a \cdot t_e + b$, kde a a b jsou konstanty.

Obecný zápis použitého vztahu:

$$tw1=LT(te,te_N)*tw1_N+AND(GT(te,te_N),LT(te,te_K))*(-a*te+b)$$



Graf 16 Příklad možného sestavení ekvitermní křivky pro podlahovou otopnou plochu

Moduly čerpadel

Čerpadlo primárního a sekundárního otopného okruhu je modelováno pomocí modulu Type 110. V primárním okruhu je uvažováno čerpadlo pracující s konstantními otáčkami. V sekundárním okruhu je uvažováno čerpadlo s proměnnými otáčkami. Díky změně otáček je schopné udržovat hmotnostní průtok na výstupu mezi dolní mezní hodnotou a maximální hodnotou a tím ovlivňovat výkon dodávaný do vytápěné zóny. Dolní mezní hodnota je nastavena na hodnotu 0,2 z důvodu zachování stability výpočtu. Změna hmotnostního průtoku probíhá lineárně s hodnotou řídicího signálu γ . Řídicí signál γ je generován pomocí modulu PI regulátoru Type 23, jeho nastavení je popsáno v následující podkapitole.

Řízení provozu oběhového čerpadla sekundárního okruhu

Provoz oběhového čerpadla sekundárního okruhu vytápění je řízen pomocí Type 23, který představuje PID regulátor. Derivační složka regulátoru byla vyřazena a do simulace byl použit jako PI regulátor. Odečet parametrů pro nastavení PI regulátoru byl proveden metodou Zieglera–Nicholse z odezvy systému na jednotkový skok řídicího signálu. Odezva byla zjištěna v simulaci tak, že byl od budovy odpojen modul

simulující klimatická data, vnitřní a vnější zisky. Venkovní teplota byla nastavena manuálně na stejnou teplotu, jaká byla manuálně nastavena v zóně. Čerpadlo nejdříve pracovalo s řídicím signálem 0 (tzn. stav vypnuto), který byl následně skokově zvýšen na hodnotu 1 a byl zaznamenán nárůst teploty v zóně. Zjištěná odezva byla využita pro nastavení parametrů PI regulátoru. Byla použita metodika nastavení popsaná v publikaci Åströma a Hägglunda [68]. Přechodové charakteristiky a výsledné parametry pro nastavení PI regulátorů jsou pro všechny simulované varianty uvedeny v pomocném excelu PV_Langerova.xls.

5.2 Uvažovaná zjednodušení

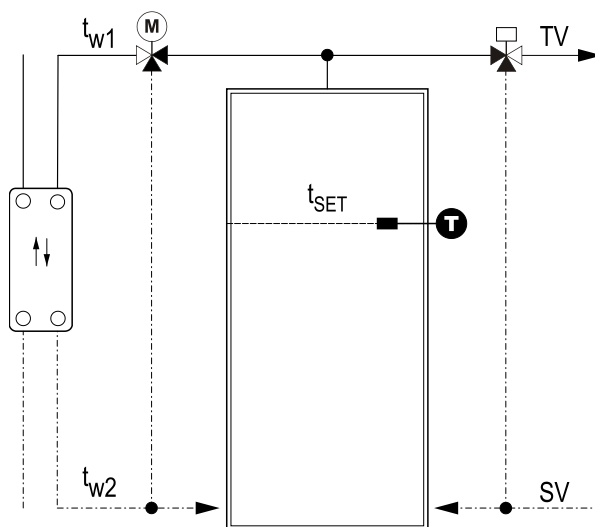
Pro zjednodušení nejsou uvažovány tepelné ztráty v rozvodech teplé vody na odběrná místa, jsou uvažovány pouze pro rozvody systému vytápění. Tepelné ztráty v rozvodech je zpravidla nutné uvažovat zejména v bytových domech, ale v rámci této práce je scénář pro bytový dům již v základu navržen s projekční chybou, proto nebyla ohřivači přidána další zátěž v podobě ztrát. V řešeném rodinném domě a v automyčce by ztráty netvořily zásadní navýšení celkové potřeby tepla pro přípravu teplé vody, proto nebyly do modelu zahrnuty.

5.3 Popis značení a odečtu veličin z numerického modelu

Pro vyhodnocení provozních a odběrových charakteristik jsou z modelu to textového souboru vytištěny následující veličiny:

- | | |
|--|---|
| ■ Teplota v zóně | t_i |
| ■ Teplota a průtok teplé vody po smísení | $t_{45^{\circ}\text{C}}, q_{45^{\circ}\text{C}}$ příp. $t_{50^{\circ}\text{C}}, q_{50^{\circ}\text{C}}$ |
| ■ Teplota a průtok studené vody | $t_{\text{SV}}, q_{\text{SV}}$ |
| ■ Teplota a průtok teplé vody do prim. okruhu vytápění | t_{w1}, \dot{m}_w |
| ■ Teplota na termostatu | t_{SET} |
| ■ Výkon dodaný ohřivačem | Q_{OH} |

Pokud je v navazujícím textu uvedeno **teplota teplé vody**, je tím myšlena teplota teplé vody odečítaná za směšovací ventil teplé vody podle Obr. 21 níže. Teplota je dále v textu označena podle požadované nastavené hodnoty, například pokud je na směšovacím ventilu nastaven požadavek na teplotu po smísení 45 °C, teplota bude označena jako $t_{45^{\circ}\text{C}}$. Pokud je dále v textu uvedeno **teplota teplé vody do vytápění**, je tím myšlena teplota t_{w1} odečítaná za motorickým směšovacím ventilem vytápění podle Obr. 21 níže.



Obr. 21 - Místa odečtu vybraných veličin

6 Popis scénářů

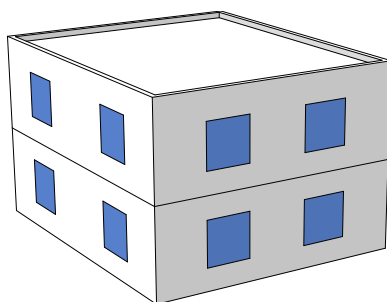
V této kapitole je uveden popis jednotlivých řešených scénářů a jejich hlavní parametry zadávané do numerického modelu. Pro každý scénář jsou uvedeny základní parametry modulu budovy a parametry ohřívače. Na závěr je pro každý scénář uvedena souhrnná tabulka nejdůležitějšího nastavení všech použitých modulů. Veškeré pomocné výpočty jsou vzhledem k rozsahu uvedeny v příloženém excelu PV_Langerova.xls.

6.1 Scénář A: Ohřívač IR 12-160 v rodinném domě

Scénář A představuje modelovou situaci současných novostaveb rodinných domů s nízkou tepelnou ztrátou. Je uvažováno, že se rodinný dům nachází v Praze a použitý ohřívač IR 12-160 slouží k vytápění a přípravě teplé vody pro čtyřčlennou rodinu.

Typologie budovy a parametry systému vytápění

Model budovy je uvažován zjednodušeně jako jednozónový a má tepelnou ztrátu 4,6 kW při návrhových podmínkách, tzn. venkovní výpočtová teplota $t_e = -15 \text{ °C}$ a požadovaná vnitřní výpočtová teplota $t_i = 20 \text{ °C}$. Zasklení tvoří 18 % z povrchu obálky budovy. Obsazenost budovy je proměnná, uvažovaný profil obsazenosti je uveden v Příloze 1. Budovu obývá čtyřčlenná rodina. Je uvažována podlahová otopná plocha s návrhovým teplotním spádem 45/35 °C. Dimenzování modulu výměníku tepla bylo provedeno metodou středního logaritmického teplotního spádu. Navržený výměník má teplosměnnou plochu 0,26 m².



Obr. 22 - Referenční budova rodinného domu

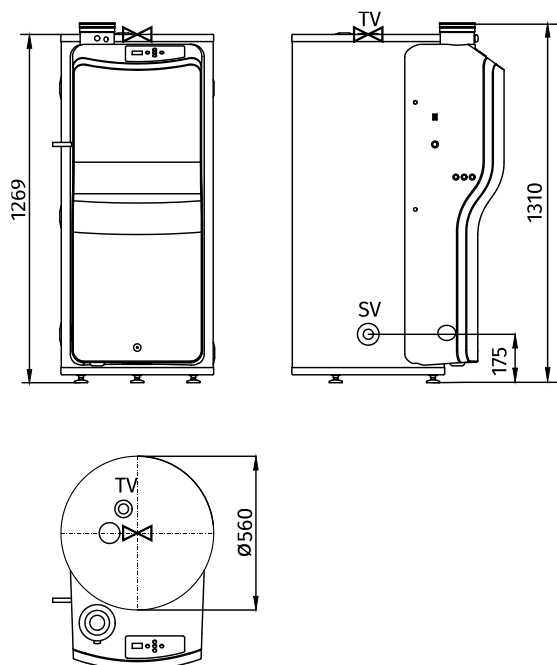
Tabulka 2 - Parametry referenční budovy rodinného domu

Budova	RDREF
Lokalita	Praha
Vytápěná podlahová plocha	170 m ²
Počet podlaží	2
Počet obyvatel	4
Počet zón	1
Celkový součinitel tepelných ztrát prostupem	130 W/K
Podíl zasklení	18 %
Otopný systém	podlahové vytápění
Návrhový teplotní spád sekundárního okruhu vytápění	45/35 °C
Požadovaná vnitřní výpočtová teplota	20 °C
Venkovní výpočtová teplota	-15 °C
Návrhový průtok otopnou soustavou	390 kg/h
Teplosměnná plocha výměníku (při $U_{prům} = 2500 \text{ W/m}^2\text{K}$, $LMTD = 7,05 \text{ K}$)	0,26 m ²
Poměr jmenovitého výkonu pro přípravu TV a vytápění ¹⁾	1,4

1) výpočet v Příloze 1

Ohřivač IR 12–160

Použitý ohřivač IR 12–160 je plynový kondenzační zásobníkový ohřivač o jmenovitém výkonu 11,7 kW, užitém objemu 160 litrů a třídě energetické účinnosti A. Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, ohřivač je modelován zjednodušeně definováním množství energie dodané přímo do teplé vody, charakteristiky výměníku nejsou zohledňovány a proto nejsou blíže popsány. Spínací teplota termostatu je nastavitelná v rozsahu 40–85 °C, hystereze je nastavitelná v rozsahu 2–15 K. Z výroby je přednastavena spínací teplota 65 °C a hystereze 10 K.



Obr. 23 – Rozměrové schéma ohřivače IR 12-160 dle výrobce [15]

Tabulka 3 - Parametry ohřivače IR 12-160

Ohřivač	Model IR 12-160
Objem ohřivače	160 litrů
Jmenovitý výkon ohřivače	11,7 kW
Výška ohřivače	1,27 m
Výška připojení studené vody	0,18 m
Výška výstupu teplé vody	1,27 m
Výška umístění termostatu	0,89 m

Do modulu ohřivače je nutné zadat koeficient tepelné ztráty, který v simulačním programu reprezentuje tepelně izolační vlastnosti ohřivače. Protože výrobce žádné parametry izolace ohřivače neuvádí a vlastní experimentální měření nebylo vzhledem k pandemické situaci možné provést, je nutné je určit přibližně. K přibližnému určení je využita známá hodnota třídy energetické účinnosti ohřivače. Z té je možné určit rozsah, ve kterém se pohybuje skutečná změřená statická ztráta ohřivače.

Hodnota statické ztráty se pro účely energetického štítkování ohřivačů určuje experimentálně v laboratoři. Experimentálně zjištěná hodnota statické ztráty se porovná s teoreticky vypočtenou hodnotou podle Tabulky 4 na následující straně a ohřivač se zatřídí do příslušné energetické třídy. Experimentální měření musí proběhnout v souladu s Nařízením komise EU č. 812/2013 [31], resp. podle norem, které toto nařízení předepisuje. Norem je k dispozici několik, ale jak uvádí Matuška [69] předepsaná metoda zkoušení je v podstatě ve všech shodná. Pro simulaci zkoušky je zásadní, že reálné měření probíhá při teplotě vody v ohřivači 65 °C ± 3 K a při teplotě okolí 20 °C ± 3 K po dobu 24 hodin. Při skutečné zkoušce se

vyhodnocuje průměrná denní spotřeba elektrické energie dodávané pro udržení vody v ohřivači na předepsané teplotě. Výhodou simulačního řešení je možnost vyhodnocovat přímo tepelnou ztrátu, kterou simulační nástroj umožňuje vytisknout jako výstup.

V případě řešeného ohřivače IR 12-160 udává výrobce třídu energetické účinnosti A. To znamená, že experimentálně zjištěná statická ztráta, kterou výrobce určil, se musí pohybovat v rozmezí podle rovnice z tučně vyznačeného řádku Tabulky 4. Pokud je užitný objem ohřivače IR 12-160 roven 160 litrům a ohřivač má mít třídu energetické účinnosti A, potom se musí experimentálně i simulačně zjištěná statická ztráta pohybovat v rozmezí:

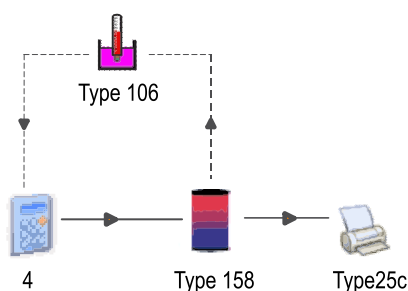
$$5,5 + 3,16 \cdot 160^{0,4} \leq S < 8,5 + 4,25 \cdot 160^{0,4}$$

$$29,6 \leq S < 40,9$$

Tabulka 4 – Výňatek z tabulky pro zatřídění ohřivače do třídy energetické účinnosti [31]

Třída energetické účinnosti	Statická ztráta S [W] při užitém objemu V_{OH} [l]
A+	$S < 5,5 + 3,16 \cdot V^{0,4}$
A	$5,5 + 3,16 \cdot V^{0,4} \leq S < 8,5 + 4,25 \cdot V^{0,4}$
B	$8,5 + 4,25 \cdot V^{0,4} \leq S < 12 + 5,93 \cdot V^{0,4}$
C	$12 + 5,93 \cdot V^{0,4} \leq S < 16,66 + 8,33 \cdot V^{0,4}$
D	$16,66 + 8,33 \cdot V^{0,4} \leq S < 21 + 10,33 \cdot V^{0,4}$

Přičemž by bylo vhodné, aby statická ztráta simulačního modelu vycházela přibližně uprostřed tohoto intervalu, tzn. okolo hodnoty $S = 35,3$ W. Pro zkoušku byl v simulačním programu sestaven pomocný numerický model podle Obr. 24. Type 25c slouží k tisku výsledků do textového souboru. Type 158 představuje ohřivač, Type 106 slouží k sepnutí ohřevu a monitorování teploty na termostatu v ohřivači. Modul 4 slouží k dodávce energie do ohřivače. Energie byla dodávána tak, aby byla teplota vody v ohřivači trvale udržována na hodnotě 65 °C. Teplota okolí byla nastavena na 20 °C.



Obr. 24 - Pomocný model

Tepelně izolační vlastnosti modelu se nastavují přes parametr *Koeficient (tepelné) ztráty (Loss Coefficient)*. Za tento koeficient byly postupně dosazovány různé hodnoty a byla sledována statická ztráta ohřivače za 24 hodin při teplotě vody v ohřivači 65 °C a teplotě okolí 20 °C. Z této ztráty byla určena průměrná tepelná ztráta ohřivače za 24 hodin a ta byla porovnána s požadavkem uvedeným výše. Za vyhovující hodnotu koeficientu tepelné ztráty považují **0,43 W/m²K**, tzn. **1,55 kJ/h.m²K**, při němž byla dosažena hodnota průměrné statické ztráty 35,5 W. Tento koeficient je nastaven do modelu pro všechny navazující simulace. V Tabulce 5 na následující straně je uveden souhrn nastavení základního modelu pro simulaci ohřivače IR 12-160. Pod tabulkou jsou uvedeny použité rovnice pro modulaci výkonu ohřivače a použitá rovnice pro ekvitermní řízení směšování v primárním okruhu vytápění. Výpis ze zkoušky statické ztráty je uveden v příloženém excelu PV_Langerova.xls.

Tabulka 5 – Souhrn nastavení modelu pro simulaci ohřivače IR 12–160

Komponenta	Parametr	Hodnota	Jednotka	Modul
Ohřivač	Jmenovitý výkon	11,7	kW	Type 158
	Objem ohřivače	160	l	
	Výška ohřivače	1,27	m	
	Počet kontrolních objemů	25	–	
	Relativní výška portu 1 a 2 – vstupní	0,138	–	
	Relativní výška portu 1 a 2 – výstupní	1	–	
	Relativní výška umístění termostatu	0,7	–	
	Relativní výška umístění zdroje tepla	0,39	–	
	Součinitel prostupu tepla podstavy, plášť	0,43	W/m²K	
Čerpadlo	Jmenovitý průtok okruh zdroje tepla	390	kg/h	Type 110
	Jmenovitý průtok otopným systémem	390	kg/h	
Potrubí	Vnitřní průměr	0,035	m	Type 31
	Součinitel prostupu tepla	0,075	W/m²K	
Výměník	Součin UA	648	W/K	Type 5b
Otop. těleso	Návrhový výkon	4,6	kW	Type 1231
	Návrhová střední teplota otopné vody	40	°C	
	Návrhová vnitřní výpočtová teplota	20	°C	
	Exponent n	1,1	–	
Budova	Součinitel tepelných ztrát prostupem neproskl. konstrukcemi	91	W/K	Type 660
	Tepelná kapacita	218286	kJ/K	
	Objem	510	m³	
Okno	Plocha oken celkem	36	m²	Type 687
	Součinitel prostupu tepla	0,27	W/m²	
	SHG koeficient	0,25	–	
PI regulátor	K	1,29	–	Type 23
	Ti	0,45	–	

Modulace výkonu ohřivače:

$$Q_{OH} = LT(t_{eB}, -12) * Y * 42120 + GT(t_{eB}, 9) * Y * 12600 + AND(GT(t_{eB}, -12), LT(t_{eB}, 9)) * Y * (-1404 * t_{eB} + 29484)$$

$$Q_{DHW} = AND(GT(q_{DHW}, 0), LT(t_{SET}, 55)) * Y * 42120$$

$$Q_{OH_OUT} = MAX(Q_{OH}, Q_{DHW})$$

Ekvitermní regulace směřováním v primárním okruhu

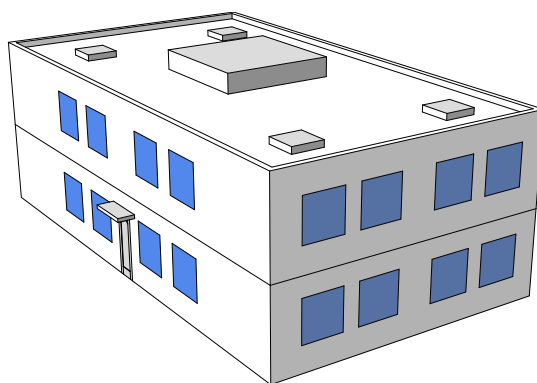
$$tw1 = LT(te, -15) * 55 + AND(GT(te, -15), LT(te, 20)) * (-0.92 * te + 38.945)$$

6.2 Scénář B: Ohřivač IR 20-200 v bytovém domě

Scénář B představuje modelovou situaci nevhodného návrhu ohřivače vzhledem k parametrům připojené budovy. Návrhová tepelná ztráta simulovaného objektu představuje 89 % jmenovitého výkonu ohřivače. Očekávaným výstupem ze simulace tohoto scénáře je, že ohřivač bude mít problém splnit požadavky na vytápění a přípravu teplé vody.

Typologie budovy a parametry systému vytápění

Model budovy je uvažován zjednodušeně jako jednozónový. Navržená referenční budova má tepelnou ztrátu 16,7 kW při návrhových podmínkách, tzn. venkovní výpočtová teplota $t_e = -15\text{ °C}$ a požadovaná vnitřní výpočtová teplota $t_i = 20\text{ °C}$. Zasklení tvoří 22 % z povrchu obálky budovy. Obsazenost budovy je proměnná, uvažovaný profil obsazenosti je uveden v Příloze 2. Je uvažováno, že v bytovém domě žije celkem 12 domácností. Je uvažována podlahová otopná plocha s návrhovým teplotním spádem 45/35 °C. Navržený výměník tepla má teplosměnnou plochu 0,95 m².



Obr. 25 - Referenční budova bytového domu

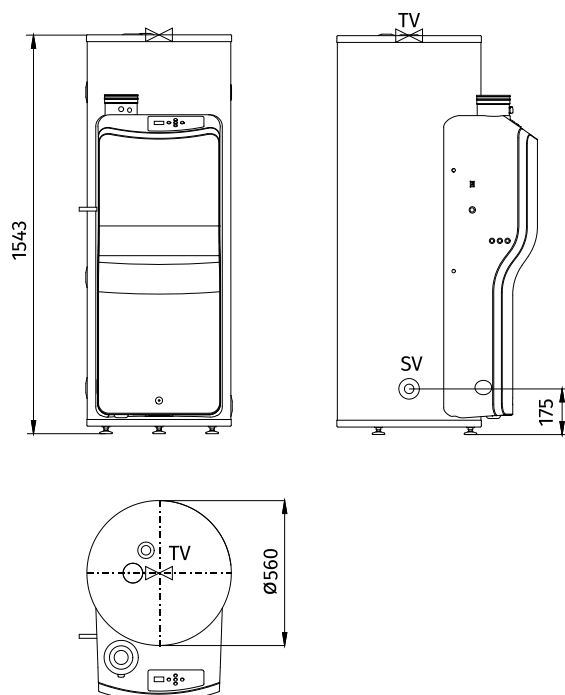
Tabulka 6 - Hlavní charakteristiky referenčního bytového domu

Budova	BDREF
Lokalita	Praha
Vytápěná podlahová plocha	900 m ²
Počet podlaží	2
Počet obyvatel	30
Počet zón	1
Celkový součinitel tepelných ztrát prostupem	477 W/K
Podíl zasklení	20 %
Otopný systém	Podlahové vytápění
Návrhový teplotní spád otopného systému	45/35 °C
Požadovaná vnitřní výpočtová teplota	20 °C
Venkovní výpočtová teplota	-15 °C
Návrhový průtok otopnou soustavou	1425 kg/h
Teplosměnná plocha výměníku (při $U_{prům} = 2500\text{ W/m}^2\text{K}$, $LMTD = 7,05\text{ K}$)	0,95 m ²
Poměr jmenovitého výkonu pro přípravu TV a vytápění ¹⁾	0,85

1) výpočet v Příloze 2

Ohřivač IR 20-200

IR 20–200 je plynový kondenzační zásobníkový ohřivač o jmenovitém výkonu 19,1 kW, užitém objemu 200 litrů a třídě energetické účinnosti A. Pro rozsah nastavení spínací teploty a hystereze na termostatu platí stejné hodnoty jako pro předchozí ohřivač.



Obr. 26 - Rozměrové schéma ohřivače IR 20-200 dle výrobce [15]

Tabulka 7 - Parametry ohřivače IR 20-200

Ohřivač	Model IR 20-200
Objem ohřivače	200 litrů
Jmenovitý výkon ohřivače	19,1 kW
Výška ohřivače	1,5 m
Výška připojení studené vody	0,18 m
Výška výstupu teplé vody	1,5 m
Výška umístění termostatu	1,1 m

Odhad statické ztráty a určení koeficientu tepelné ztráty

Odhad byl proveden stejným postupem jako v případě předchozího ohřivače. Pokud je užitém objem ohřivače IR 20-200 roven 200 litrům a ohřivač má mít třídu energetické účinnosti A, potom se musí experimentálně i simulačně zjištěná statická ztráta pohybovat v rozmezí:

$$5,5 + 3,16 \cdot 200^{0,4} \leq S < 8,5 + 4,25 \cdot 200^{0,4}$$

$$31,8 \leq S < 43,9$$

Odhad je opět proveden tak, aby průměrná statická ztráta zjištěná za periodu 24 hodin vyšla přibližně uprostřed intervalu, tzn. okolo hodnoty 37,7 W. Z provedené zkoušky vyplynulo, že za vyhovující hodnotu koeficientu tepelné ztráty lze považovat **0,38 W/m²K**, tzn. **1,35 kJ/h.m²K**, při němž byla dosažena požadovaná hodnota statické ztráty 37,4 W. Tento koeficient je nastaven do modelu pro všechny navazující simulace. V Tabulce 8 je na následující straně uveden souhrn nejdůležitějšího nastavení pro simulaci ohřivače IR 20-200. Výpis ze zkoušky je uveden v příloženém excelu PV_Langerova.xls.

Tabulka 8 – Souhrn nastavení modelu pro simulaci ohřivače IR 20–200

Komponenta	Parametr	Hodnota	Jednotka	Modul
Ohřivač	Jmenovitý výkon	19,1	kW	Type 158
	Objem ohřivače	200	litrů	
	Výška ohřivače H	1,5	m	
	Počet kontrolních objemů	38	–	
	Relativní výška portu 1 a 2 – vstupní	0,12	–	
	Relativní výška portu 1 a 2 – výstupní	1	–	
	Relativní výška umístění termostatu	0,7	–	
	Relativní výška umístění vstupu zdroje tepla	0,2	–	
	Součinitel prostupu tepla podstavy, plášť	0,38	W/m²K	
Čerpadlo	Jmenovitý průtok okruh zdroje tepla	1425	kg/h	Type 110
	Jmenovitý průtok otopným systémem	1425	kg/h	
Potrubí	Vnitřní průměr	0,05	m	Type 31
	Součinitel prostupu tepla	0,075	W/m²K	
Výměník	Součin UA	2366	W/K	Type 5b
Otop. těleso	Návrhový výkon	16,7	kW	Type 1231
	Návrhová střední teplota otopné vody	40	°C	
	Návrhová vnitřní výpočtová teplota	20	°C	
	Exponent n	1,1	–	
Budova	Součinitel tepelných ztrát prostupem neprosk.konstrukcemi	382	W/K	Type 660
	Tepelná kapacita	620743	kJ/K	
	Objem	2430	m³	
Okno	Plocha oken celkem	86	m²	Type 687
	Součinitel prostupu tepla	0,27	W/m²	
	SHG koeficient	0,25	–	
PI regulátor	K	4,5	–	Type 23
	Ti	0,96	–	

Modulace výkonu ohřivače:

$$Q_{OH} = LT(t_{eB}, -12) * Y * 68400 + GT(t_{eB}, 9) * Y * 20520 + AND(GE(t_{eB}, -12), LE(t_{eB}, 9)) * Y * (-2292 * t_{eB} + 41256)$$

$$Q_{DHW} = AND(GT(q_{DHW}, 0), LE(t_{SET}, 65)) * Y * 68400$$

$$Q_{OH_OUT} = MAX(Q_{OH}, Q_{DHW})$$

Ekvitermní regulace směřováním v primárním okruhu

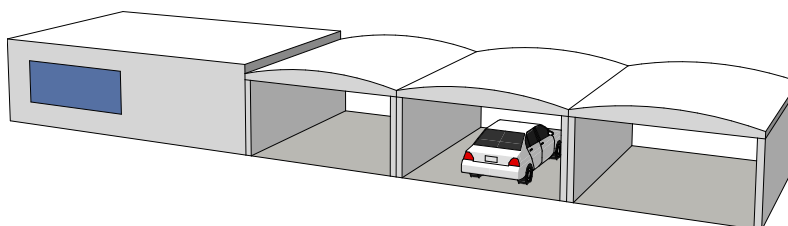
$$tw1 = LT(t_e, -15) * 52 + AND(GE(t_e, -15), LE(t_e, 20)) * (-0.90 * t_e + 38.843)$$

6.3 Scénář C: Ohříváč IR 32-380 v mycím centru

Scénář C představuje typickou situaci v objektu s nízkou tepelnou ztrátou. Rozdílem oproti scénář A jsou charaktery odběrů teplé vody, které se v objektu vyskytují. Na rozdíl od scénáře A se nejedná o krátké nahodilé odběry, ale o pravidelné dlouhotrvající odběry. Ty představují výrazně odlišný charakter zatížení než odběry v rodinném domě.

Typologie budovy a parametry systému vytápění

Podoba uvažovaného mycího centra je schematicky znázorněna na Obr. 27 níže. Pro účely simulací je uvažováno, že je vytápěna pouze buňka pro zaměstnance. Většina samoobslužných mycích stanic má vzhledem k potřebě zabránit vzniku námrazy v zimním období zavedeno také podlahové vytápění pod mycími boxy, nicméně v rámci této práce není uvažováno. Uvažovat podlahové vytápění pod boxy by znamenalo zásadním způsobem přestavět model a provést řadu pomocných výpočtů, což vzhledem k rozsahu práce není možné. Buňka pro zaměstnance je uvažována jako jednozónová a má tepelnou ztrátu 3 kW při návrhových podmínkách, tzn. při venkovní výpočtové teplotě $t_e = -15\text{ °C}$ a požadované vnitřní výpočtové teplotě $t_i = 20\text{ °C}$. Zasklení tvoří 7 % z povrchu obálky buňky. Pro vytápění buňky pro zaměstnance je navržena podlahová otopná plocha s návrhovým teplotním spádem 45/35 °C. Navržený výměník má teplosměnnou plochu 0,19 m². Myčka je provozována nepřetržitě po celý den 7 dní v týdnu. V čase od 7.00 do 16.00 je přítomen jeden zaměstnanec zajišťující obsluhu myčky, mimo tento časový úsek je buňka pro zaměstnance neobsazená. Je uvažováno, že část buňky pro zaměstnance zabírá vytápěný technologický box, ve kterém je umístěn ohříváč, chemikálie a další komponenty pro zajištění mycího procesu. K buňce jsou připojena 3 krytá otevřená mycí stání.



Obr. 27 - Referenční objekt

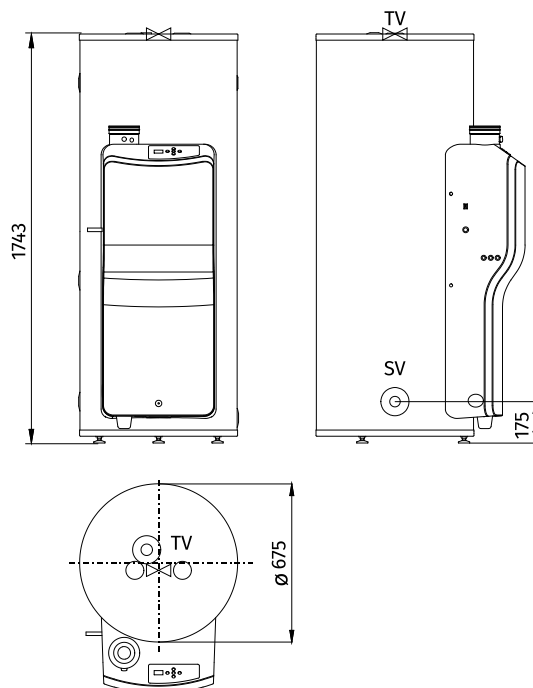
Tabulka 9 - Parametry referenčního objektu automyčky

Budova	AMREF
Lokalita	Praha
Vytápěná podlahová plocha	67 m ²
Počet podlaží	1
Počet zaměstnanců	1
Počet zón	1
Celkový součinitel tepelných ztrát prostupem	95 W/K
Podíl zasklení	7 %
Otopný systém	Podlahové vytápění
Návrhový teplotní spád otopného systému	45/35 °C
Požadovaná vnitřní výpočtová teplota	20 °C
Návrhová venkovní výpočtová teplota	-15 °C
Návrhový průtok otopnou soustavou	285 kg/h
Teplosměnná plocha výměníku (při $U_{prům} = 2500\text{ W/m}^2\text{K}$, $LMTD = 7,05\text{ K}$)	0,19 m ²
Poměr jmenovitého výkonu pro přípravu TV a vytápění ¹⁾	7,7

1) výpočet v Příloze 3

Ohřivač IR 32-380

IR 32–380 je plynový kondenzační zásobníkový ohřivač o jmenovitém výkonu 31,3 kW, užitém objemu 380 litrů a třídě energetické účinnosti A. Stejně jako u předchozího případu je ohřivač modelován zjednodušeně definováním množství energie dodané přímo do teplé vody a proto nejsou zohledňovány charakteristiky výměníku. Pro rozsah nastavení spínací teploty a hystereze na termostatu platí stejné hodnoty jako pro předchozí ohřivač.



Obr. 28 - Rozměrové schéma ohřivače IR 32-380 dle výrobce [15]

Tabulka 10 - Parametry ohřivače IR 32-380

Ohřivač	Model IR 32-380
Objem ohřivače	380 litrů
Jmenovitý výkon ohřivače	31,3 kW
Výška ohřivače	1,7 m
Výška připojení studené vody	0,17 m
Výška výstupu teplé vody	1,7 m
Výška umístění termostatu	1,2 m

Odhad statické ztráty a určení koeficientu tepelné ztráty

Odhad byl proveden stejným postupem jako v případě předchozího ohřivače. Pokud je užité objem ohřivače IR 32-380 roven 380 litrům a ohřivač má mít třídu energetické účinnosti A, potom se musí experimentálně i simulačně zjištěná statická ztráta pohybovat v rozmezí:

$$5,5 + 3,16 \cdot 380^{0,4} \leq S < 8,5 + 4,25 \cdot 380^{0,4}$$
$$39,5 \leq S < 54,2$$

Odhad je opět proveden tak, aby statická ztráta vyšla přibližně uprostřed intervalu, tzn. okolo hodnoty 46,9 W. Z provedené zkoušky vyplynulo, že za vyhovující hodnotu koeficientu tepelné ztráty lze považovat **0,31 W/m²K, tzn. 1,1 kJ/h.m²K**, při němž byla dosažena požadovaná hodnota statické ztráty 45,6 W. Tento koeficient je nastaven do modelu pro všechny navazující simulace. Souhrn nastavení modelu pro simulaci ohřivače IR 32-380 je uveden v Tabulce 11 na následující straně. Výpis ze zkoušky je uveden v příloženém excelu PV_Langerova.xls.

Tabulka 11 – Souhrn nastavení modelu pro simulaci ohřivače IR 32–380

Komponenta	Parametr	Hodnota	Jednotka	Modul
Ohřivač	Jmenovitý výkon	31,3	kW	Type 158
	Objem ohřivače	380	l	
	Výška ohřivače	1,7	m	
	Počet kontrolních objemů	40	–	
	Relativní výška portu 1 a 2 – vstupní	0,1	–	
	Relativní výška portu 1 a 2 – výstupní	1	–	
	Relativní výška umístění termostatu	0,7	–	
	Relativní výška umístění zdroje tepla	0,15	–	
	Součinitel prostupu tepla podstavy, plášť	0,31	W/m ² K	
Čerpadlo	Jmenovitý průtok okruh zdroje tepla	285	kg/h	Type 110
	Jmenovitý průtok otopným systémem	285	kg/h	
Potrubí	Vnitřní průměr	0,035	m	Type 31
	Součinitel prostupu tepla	1,2	W/m ² K	
Výměník	Součin UA	473	W/K	Type 5b
Otop. těleso	Návrhový výkon	3,3	kW	Type 1231
	Návrhová střední teplota otopné vody	40	°C	
	Návrhová vnitřní výpočtová teplota	20	°C	
	Exponent n	1,1	–	
Budova	Součinitel tepelných ztrát prostupem neproskl. konstrukcemi	89	W/K	Type 660
	Tepelná kapacita	105063	kJ/K	
	Objem	181	m ³	
Okno	Plocha oken celkem	6	m ²	Type 687
	Součinitel prostupu tepla	0,27	W/m ²	
	SHG koeficient	0,25	–	
PI regulátor	K	4,5	–	Type 23
	Ti	1,14	–	

Modulace výkonu ohřivače:

Pro tuto aplikaci ohřivače nebyla uvažována a ohřivač vždy dodával maximální výkon

Ekvitermní regulace směřováním v primárním okruhu

$$tw_1 = LT(te, -15) * 52 + AND(GE(te, -15), LE(te, 20)) * (-0.90 * te + 38.843)$$

7 Ověření kvality modelů ohřivačů

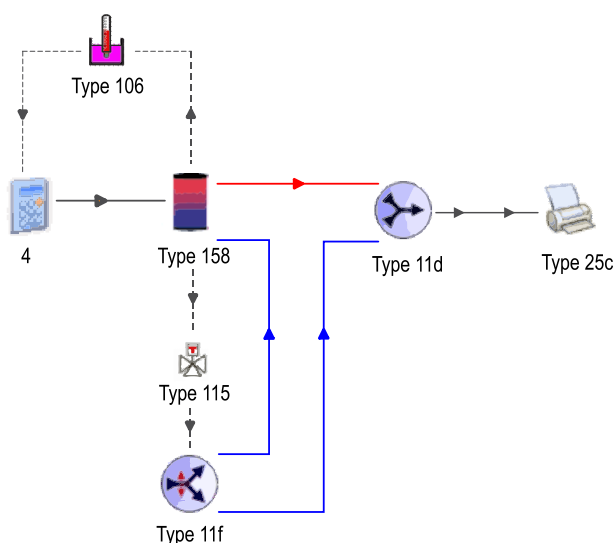
Vzhledem k tomu, že bylo zanedbáno sdílení tepla mezi výměníkem a vodou v ohřivači a dodávka výkonu je simulována zjednodušeně, je nutné ověřit, jestli charakteristiky ohřivače z numerického modelu odpovídají charakteristikám skutečného ohřivače. Porovnání s daty od výrobce je nutné také vzhledem k tomu, že je potřeba zkontrolovat správnost zadání počtu kontrolních objemů do modulu ohřivače. Počet kontrolních objemů ovlivňuje stratifikaci a tedy i charakteristiky nabíjení a vybíjení ohřivače. Vlastní experimentální měření pro kalibraci modelu ohřivače nebylo vzhledem k pandemické situaci možné provést. Níže uvedené porovnání je myšleno pouze jako orientační kontrola, nikoli jako ověření modelu v plné míře. Pro kontrolu byly sestaveny dva pomocné TRNSYS modely. Kontrola proběhla dvěma testy:

- Test nabíjecí charakteristiky
- Test odběrové charakteristiky – trvalý průtok teplé vody bez vlivu odběru do vytápění

Test nabíjecí charakteristiky byl proveden simulací jednorázového ohřevu vody v ohřivači z počáteční teploty 10 °C na konečnou teplotu 85 °C. Sledována byla teplota na termostatu, který byl umístěn ve tři čtvrtině výšky ohřivače. Test trvalého průtoku teplé vody byl proveden porovnáním dat ze simulace a dat z měření od výrobce. Výrobce uvádí naměřené hodnoty průtoku teplé vody, které je ohřivač schopen trvale dodávat při určitém teplotním rozdílu mezi studenou a teplou vodou.

Pomocný numerický model sestavený pro test nabíjecí charakteristiky je shodný s modelem pro zkoušku koeficientu tepelné ztráty z Obr. 24. Type 106, který monitoruje teplotu na termostatu a generuje řídicí signál pro sepnutí dodávky energie v tomto případě generuje signál pro dodávku energie okamžitě po spuštění simulace. Funkce modulace výkonu ohřivače nebyla použita a ohřivač po celou dobu jednorázového ohřevu dodával maximální množství energie. Na vstup do Type 25c je přivedena sledovaná teplota na termostatu, která je vytištěna do textového souboru pro vyhodnocení.

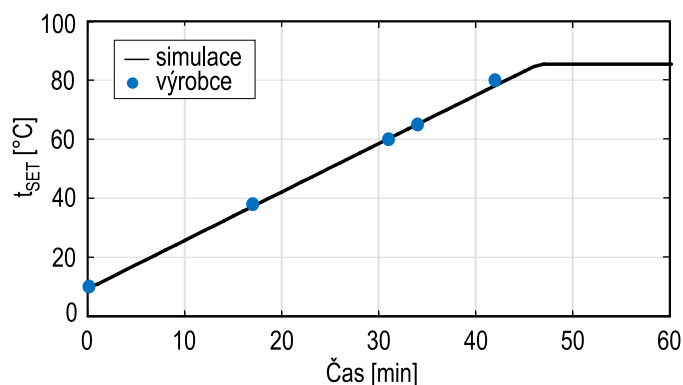
Pomocný numerický model, který byl použit pro zkoušku trvalého průtoku teplé vody je na Obr. 29 níže. V Type 11f byla nastavena teplota studené vody 10 °C a příslušný průtok. V Type 115 byla nastavena požadovaná teplota teplé vody po smísení tak, aby odpovídala příslušnému teplotnímu rozdílu mezi studenou a teplou vodou. Např. pokud je požadovaný teplotní rozdíl mezi studenou a teplou vodou roven 55 °C a teplota studené vody je 10 °C, potom musí být teplota teplé vody po smísení nastavena na 65 °C. Type 106 a Modul 4 slouží k dodávce energie do ohřivače. Opět nebyla uvažována modulace, ale trvalá dodávka jmenovitého výkonu daného ohřivače. Pro vyhodnocení byl snímán průtok a teplota teplé vody na výstupu ze směšovacího ventilu Type 11d, které byly pomocí Type 25c vytištěny do textového souboru pro vyhodnocení.



Obr. 29 – Pomocný numerický model pro zkoušku odběrové charakteristiky

Ověření kvality modelu ohřivače IR 12-160

Test nabíjecí charakteristiky byl proveden pomocí prvního pomocného modelu popsaného na předchozí straně. Počet kontrolních objemů ohřivače byl nastaven na 25. Sledována byla teplota na termostatu, který byl umístěn ve tři čtvrtině výšky ohřivače. Průběh nabíjecí charakteristiky získaný ze simulace byl porovnán s kontrolními body, které uvádí výrobce v dokumentaci [15] a [70]. Porovnání je znázorněno na Grafu 17 níže. Výrobce neuvádí nabíjecí charakteristiku ve formě křivky, ale pouze jako dosaženou teplotu v kontrolních časech 17, 27, 31, 34 a 42 minut. Číselné porovnání teplot dosažených v kontrolních bodech při simulaci s teplotami od výrobce je uvedeno v Tabulce 12 níže. Nejvyšší dosažená odchylka výsledků nabíjecí charakteristiky z numerického modelu oproti výsledkům skutečného měření je 2,3 %. Pro účely této práce je odchylka přijatelná a takto nastavený modul ohřivače vyhovuje.



Graf 17 – Grafické porovnání simulace s daty od výrobce

Tabulka 12 – Číselné porovnání simulace s daty od výrobce

Čas kontroly	17 min	27 min	31 min	34 min	42 min
Dosažená teplota – výrobce [°C]	38,0	54,0	60,0	65,0	80,0
Dosažená teplota – simulace [°C]	37,2	53,6	60,1	65,1	78,1
Odchylka výrobce a simulace [%]	+2,20	+0,80	-0,20	-0,10	+2,30

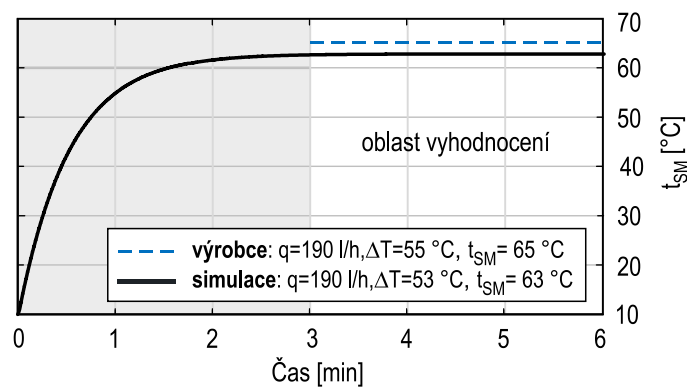
Test odběrové charakteristiky byl proveden pomocí druhého pomocného modelu. Počet kontrolních objemů ohřivače byl opět nastaven na 25. Podle výrobce [70] je ohřivač IR 12-160 při uvažování teploty studené vody 10 °C schopen trvale dodávat:

- Teplou vodu průtokem 190 l/h při $\Delta T = 55$ °C, tzn. při teplotě po smísení $t_{sm} = 65$ °C
- Teplou vodu průtokem 210 l/h při $\Delta T = 50$ °C, tzn. při teplotě po smísení $t_{sm} = 60$ °C
- Teplou vodu průtokem 230 l/h při $\Delta T = 44$ °C, tzn. při teplotě po smísení $t_{sm} = 54$ °C

V numerickém modelu byla počáteční teplota vody v ohřivači nastavena na 10 °C a průtok trvale nastaven na požadovanou hodnotu podle výčtu výše. Voda v ohřivači byla nejdříve dohřáta na požadovanou teplotu, což je zobrazeno v první části grafu. Schopnost trvalé dodávky byla vyhodnocena po ustálení teploty na termostatu na požadované hodnotě, což je zobrazeno v druhé části grafu.

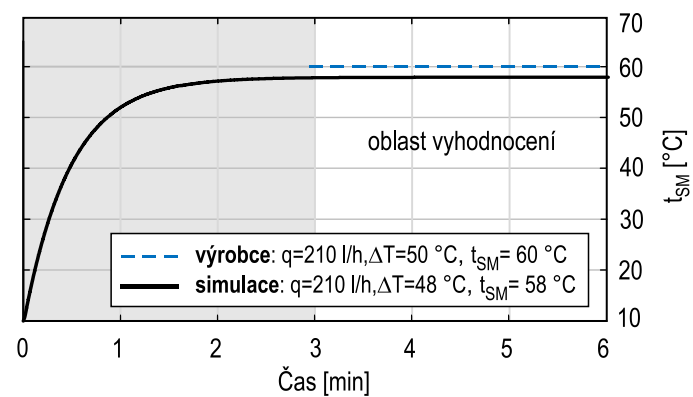
Při požadavku na trvalý průtok 190 l/h a $\Delta T = 55$ °C viz Graf 18, resp. 210 l/h a $\Delta T = 50$ °C viz Graf 19 nebyla při simulaci dodržena požadovaná teplota po smísení o 2 °C. Při průtoku 230 l/h a při požadavku na $\Delta T = 44$ °C viz Graf 20 byla teplota po smísení dodržena. Pro účely této práce považují tyto výsledky za vyhovující. I přes zanedbání vlivu výměníku tepla a jeho nahrazení prostým definováním dodaného množství energie přes vstup *Auxiliary Heat Input* se podařilo dosáhnout hodnot uváděných výrobcem pouze s malou odchylkou. Nastavený počet kontrolních objemů 25 vyhovuje. Záznam dat z testu je uveden v příloženém excelu PV_Langerova.xls.

Dosažené teploty při trvalé dodávce průtoku 190 l/h (3,2 l/min)



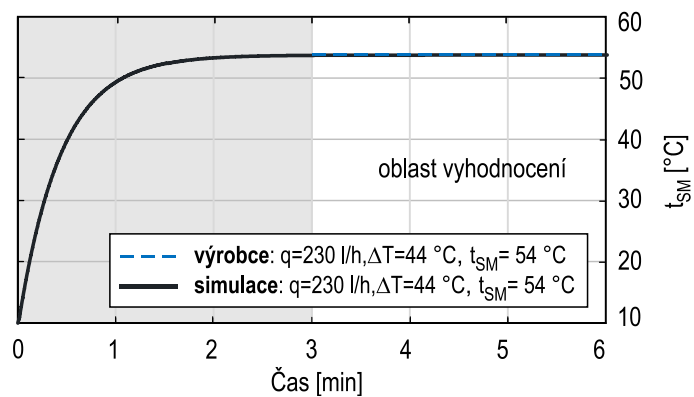
Graf 18 – Charakteristika trvalé dodávky pro průtok 190 l/h

Dosažené teploty při trvalé dodávce průtoku 210 l/h (3,5 l/min)



Graf 19 – Charakteristika trvalé dodávky pro průtok 210 l/h

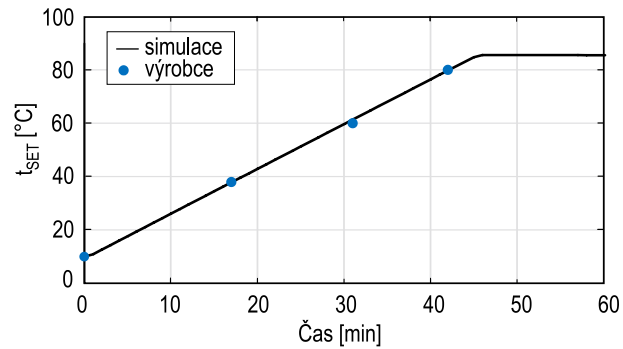
Dosažené teploty při trvalé dodávce průtoku 230 l/h (3,8 l/min)



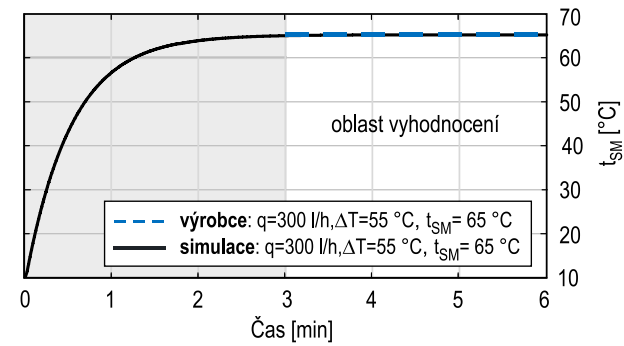
Graf 20 – Charakteristika trvalé dodávky pro průtok 230 l/h

Ověření kvality modelu ohřivače IR 20-200

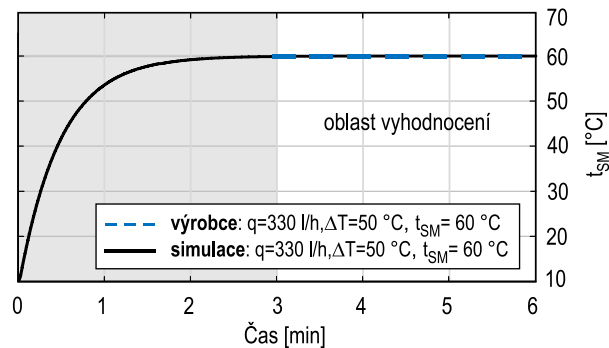
Celý záznam porovnání je uveden v příloženém excelu PV_Langerova.xls. Porovnání nabíjecí charakteristiky numerického modelu ohřivače s daty od výrobce je na Grafu 21 níže. Vedle a pod je na Grafu 22, 23 a 24 uvedeno porovnání simulace trvalé dodávky průtoku s daty od výrobce. Vzhledem dosaženým výsledkům považuji zvolené nastavení modulu ohřivače pro účely této práce za vyhovující. Počet kontrolních objemů ohřivače byl nastaven na 38.



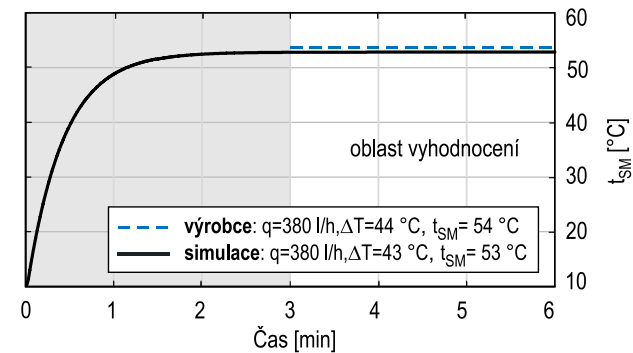
Graf 21 Nabíjecí charakteristika IR 20-200



Graf 22 Charakteristika trvalé dodávky pro průtok 300 l/h



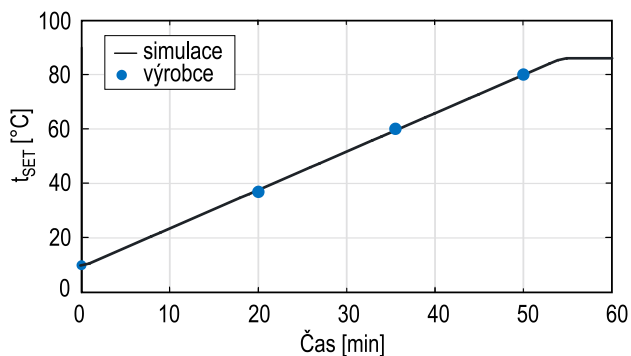
Graf 24 Charakteristika trvalé dodávky pro průtok 330 l/h



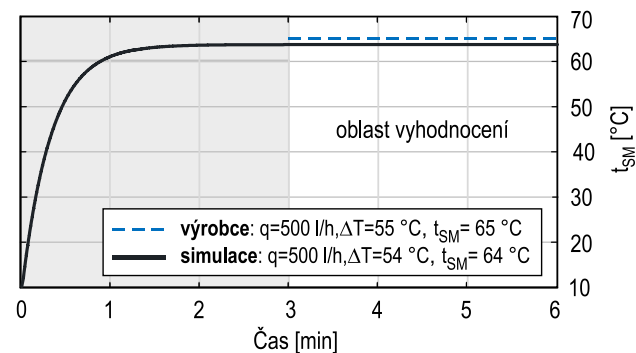
Graf 23 Charakteristika trvalé dodávky pro průtok 380 l/h

Ověření kvality modelu ohřivače IR 32-380

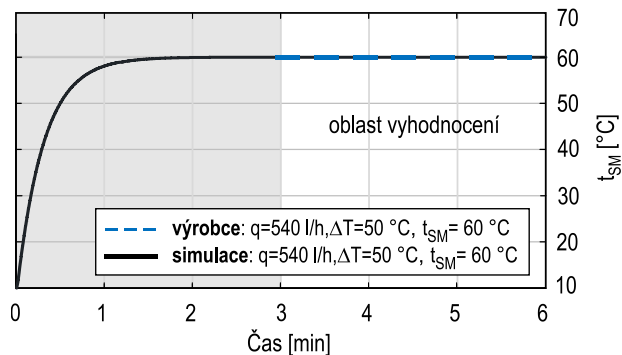
Kontrola byla provedena stejným způsobem jako u předchozího ohřivače. Kompletní záznam porovnání je uveden v příloženém excelu PV_Langerova.xls.. Porovnání nabíjecí charakteristiky numerického modelu ohřivače s daty od výrobce je uvedeno na Grafu 25 níže. Vedle a pod je na Grafu 26, 27 a 28 uvedeno porovnání simulace trvalé dodávky průtoku s daty od výrobce. Vzhledem dosaženým výsledkům považuji zvolené nastavení modulu ohřivače pro účely této práce za vyhovující. Počet kontrolních objemů byl nastaven na 40.



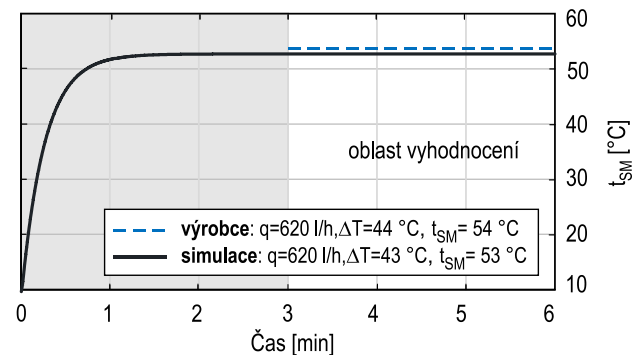
Graf 25 – Nabíjecí charakteristika IR 32-380



Graf 26 - Charakteristika trvalé dodávky pro průtok 500 l/h



Graf 27 - Charakteristika trvalé dodávky pro průtok 540 l/h



Graf 28 - Charakteristika trvalé dodávky pro průtok 620 l/h

8 Vyhodnocení provozu

Pro každý ohřívač jsou uvedeny výsledky parametrické studie optimálního nastavení, výsledky testu odběrové charakteristiky při zatížení jednorázovým souvislým odběrem, je zhodnocena hranice limitního zatížení ohřívače a jsou uvedeny výsledky testu provozní a odběrové charakteristiky při zatížení zátěžovým profilem vyhodnocené pro vybrané typické dny a následně vyhodnocené pro celoroční provoz.

8.1 Výsledky pro scénář A: ohřívač IR 12-160 v rodinném domě

Parametrická studie pro určení optimálního nastavení

Cílem parametrické studie je určení optimální nastavení spínací teploty a hystereze na termostatu. Parametrickou studii je nutné provést, protože nevhodné nastavení by mohlo negativně ovlivnit výsledky simulace. Jak bylo uvedeno v rešeršní části práce, výška umístění termostatu, nastavená spínací teplota a hystereze mohou významně ovlivňovat uživatelský komfort dodávky teplé vody.

Výška umístění termostatu je dána konstrukcí ohřívače, ale spínací teplota a hystereze je nastavitelná volitelně v rozsahu 40–85 °C, resp. 2–15 K. Z výroby je dle výrobce přednastavena hystereze 10 K a spínací teplota 65 °C. Ta je pro řešený systém zbytečně vysoká. Do parametrické studie jsou vybrány spínací teploty použitelné pro řešený systém tzn. 50 a 55 °C a hystereze 2, 10 a 15 K. Tento výběr dává celkem 6 kombinací, které jsou shrnuty v Tabulce 13 níže. Jako indikátory pro výběr optimálního řešení byly zvoleny ukazatele provozní a odběrové charakteristiky a ukazatel udržení požadované teploty v zóně. Hledaná je taková kombinace nastavení, při které bude počet startů za rok nejmenší, průměrná souvislá doba chodu ohřívače co nejdelší a zároveň budou splněny požadavky dodávky teplé vody a udržení teploty v zóně.

Pro každou z uvedených kombinací byla provedena roční simulace s časovým krokem 1 minuta. Simulace proběhla pro referenční nastavení shrnuté v kapitole 6.1. Pro simulaci byl použit referenční zátěžový profil teplé vody uvedený na straně 62 v této kapitole. Výpočet počtu startů za rok, souvislé doby chodu a ukazatelů splnění požadavků proběhl v Matlabu, použitý skript je uveden v Příloze 4 a je přiložen k práci na CD.

Předpokladem bylo, že optimální kombinace z hlediska počtu startů a průměrné doby chodu bude ta s nejvyšší nastavenou hysterezí, nicméně bylo potřeba ověřit, jestli se takto vysoká hystereze negativně nepromítne do schopnosti ohřívače splnit dodávku teplé vody nebo do schopnosti udržet požadovanou teplotu v zóně.

Z výsledků roční simulace v Tabulce 13 je patrné, že se výše uvedený předpoklad potvrdil a jako optimální možnost vychází stavy s nejvyšší možnou nastavitelnou hysterezí 15 K. Nejmenší počet startů a nejdelší průměrná souvislá doba chodu byla zjištěna pro kombinaci spínací teplota 55 °C a hystereze 15 K. Toto nastavení je použito pro všechny následující simulace.

Tabulka 13 – Výsledky parametrické studie

Termostat 0,7.H	Spínací teplota	50 °C			55 °C		
	Hystereze	2	10	15	2	10	15
Počet startů za rok		9213	5270	4191	7737	5270	3816
Maximální souvislá doba chodu [min]		41	61	86	60	61	100
Průměrná souvislá doba chodu [min]		12	21	26	14	21	30
Minimální souvislá doba chodu [min]		3	8	11	4	5	9
Stavy, kdy splněny požadavky na TV [%] ¹⁾		100	100	100	100	100	100
Stavy, kdy splněny požadavky na vytápění [%] ²⁾		100	100	100	100	100	100

1) tzn. kdy dodán požadovaný průtok o teplotě $t(45 \pm 0,5)$ °C, vztaženo k celkovému požadovanému objemu o teplotě 45 °C za rok

2) kdy teplota v zóně udržena na požadovaných $t_i(20 \pm 0,5)$ °C, vztaženo k počtu hodin otopného období

Test odběrové charakteristiky při zatížení jednorázovým odběrem, hledání limitu použití ohřivače

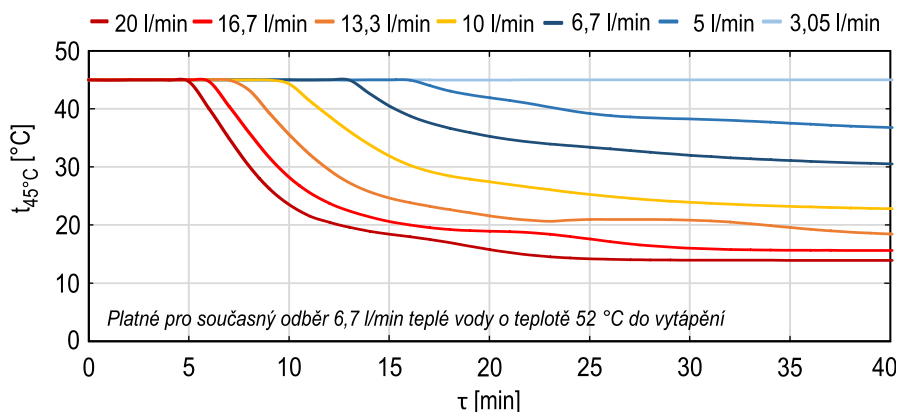
V této části jsou uvedeny výsledky testu odběrové charakteristiky a jsou zhodnoceny okrajové podmínky použití ohřivače v řešeném systému. Test odběrové charakteristiky jednorázovým nepřerušovaným odběrem spočívá v zatížení ohřivače trvalým zvoleným průtokem teplé vody, přičemž současně musí dodávat dostatek teplé vody do vytápění. Test je proveden s aktivním zdrojem tepla, tzn. ohřivač může v případě potřeby sepnout a dodávat energii. Cílem tohoto testu je zjistit:

- Jaký průtok je ohřivač zapojený v kombinovaném systému schopen dodávat trvale
- Jaká je maximální možná doba trvání vybraných odběrů

Co se týče prvního cíle, pro testování byla vybrána sada průtoků teplé vody, které se typicky vyskytují v rodinných domech. Testování probíhalo ze stavu plně nabitého ohřivače. Požadovaná teplota teplé vody dodávané na odběrná místa byla nastavena na směšovací ventilu na 45 °C, teplota přívodní studené vody byla nastavena na 5 °C. Takto nízká teplota přívodní studené vody reprezentuje zimní extrém. TRNSYS umožňuje do simulace zahrnout změnu teplot studené vody v závislosti na průběhu venkovní teploty. Nastavená teplota 5 °C je průměrná teplota studené vody určená pro 15. ledna, což je den reprezentující jmenovité venkovní výpočtové podmínky (-15 °C) pro použitá klimatická data.

Z hlediska vytápění byly v numerickém modelu nastaveny jmenovité podmínky. Ty představují nejnáročnější podmínky, které mohou z hlediska vytápění v navržené budově nastat. Jmenovitý průtok navržený pro vytápění řešené budovy je 390 kg/h tzn. 6,7 l/min, návrhová teplota přívodní vody do vytápění je 52 °C. Ohřivač musí během testu dodávat trvale průtok do vytápění současně s dodávkou trvalého průtoku teplé vody na odběrná místa. Simulace proběhla pro ohřivač zapojený v základním numerickém modelu popsaném v kapitole 5.

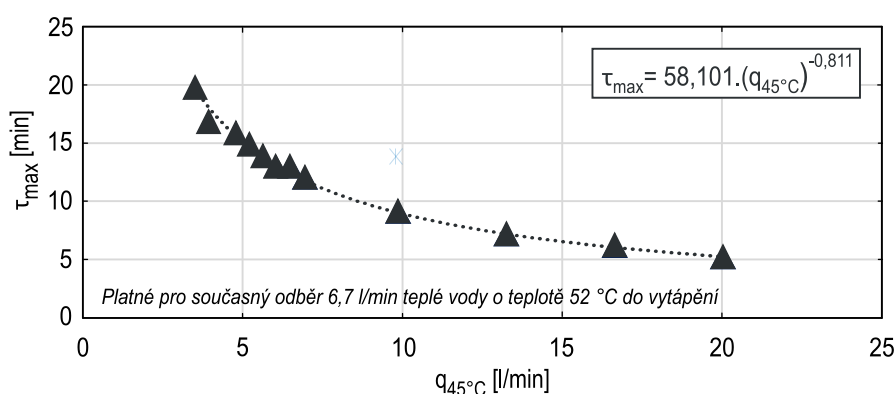
Na Grafu 29 jsou zobrazeny výsledky testu odběrové charakteristiky pro zvolené průtoky. Odběry o průtoku 10 l/min dle Tolara [52] odpovídají odběrům při sprchování, odběry o průtoku 20 l/min jsou typické pro odběry do vany nebo pro velkokapacitní sprchy. Odběry o průtoku okolo 5 l/min odpovídají odběrům pro umyvadla. Graf zobrazuje průběh poklesu teplot za směšovacím ventilem teplé vody v závislosti na odebíraném průtoku teplé vody na odběrná místa a do systému vytápění. Z grafu je patrné, že při současně dodávce jmenovitého průtoku 6,7 l/min vody o teplotě 52 °C do vytápění je ohřivač schopen na odběrná místa teplé vody **trvale** dodávat průtok 3,05 l/min vody o teplotě 45 °C. Při navýšení průtoku nad tuto hodnotu jsou z grafu patrné limity použití ohřivače. Např. průtok 6,7 l/min do vytápění současně s průtokem 10 l/min na odběrná místa bude ohřivač schopen dodávat pouze 10 minut, než dojde k trvalému poklesu teploty teplé vody za směšovacím ventilem TV pod požadovaných 45 °C. Odběrovou špičku o průtoku 20 l/min při současně dodávce teplé vody do vytápění bude ohřivač schopen pokrývat 5 minut, než dojde k poklesu teploty pod požadovaných 45 °C.



Graf 29 – Pokles teploty za směšovacím ventilem TV v závislosti na odebíraném průtoku teplé vody pro IR 12-160

Druhým cílem tohoto testu je určit závislost maximální možné doby trvání odběrové špičky na odebraném průtoku teplé vody. Maximální možná doba trvání odběru udává, jak dlouho je ohřívač schopen daným průtokem dodávat teplou vodu o požadované teplotě. Jakmile je tato doba překročena, ohřívač přestane být schopen dodávat požadovaný průtok vody o požadované teplotě a dojde k poklesu teploty dodávané vody.

Pro okrajové podmínky z předchozí strany je tato závislost zobrazena na Grafu 30 níže. Na grafu jsou zobrazeny maximální možné doby trvání odběrových špiček τ_{max} v závislosti na průtocích teplé vody q_{TV} při současné dodávce 6,7 l/min teplé vody do vytápění a požadované teplotě po smísení 45 °C. Z hlediska zatížení ohřívače jsou rozhodující průtoky teplé vody na odběrná místa TV, protože odebíraná teplá voda je nahrazovaná studenou vodou z řady, kterou je nutné dohřívát z výrazně nižších teplot než z jakých je nutné dohřívát vratnou vodu z primárního okruhu vytápění.



Graf 30 - Max. možná doba pokrytí odběrových špiček TV při současné dodávce teplé vody do vytápění

Test provozní a odběrové charakteristiky při zatížení zátěžovými profily – denní zhodnocení

V této části jsou uvedeny parametry použitých zátěžových profilů a výsledné charakteristiky ohřívače při zatížení těmito profily. Charakteristiky jsou vyhodnoceny pro vybrané typické dny. Tento test slouží ke zhodnocení chování ohřívače při zatížení přerušovanými odběry o různých průtocích a době trvání. Podává informace o tom, jakým způsobem je ohřívač schopen reagovat na změnu provozních podmínek. Je nutné zdůraznit, že dosažené výsledky jsou do značné míry závislé na kvalitě navržené regulace provozu ohřívače a připojených systémů.

Celkem byly sestaveny 4 zátěžové profily, z toho RDREF je referenční a RDEXT1, RDEXT2, RDEXT3 představují modifikaci referenčního. Pro vygenerování odběrových profilů byl využit program DHWCalc. Odběrové profily byly vygenerovány pro domácnost o 4 osobách. Bylo uvažováno, že na jednu osobu připadá spotřeba teplé vody 39 l/den při teplotě 60 °C, tzn. tomu odpovídá 56 l/den při teplotě 45 °C. Pro celou domácnost o 4 osobách je celková spotřeba za den 224 litrů vody o teplotě 45 °C. Souhrn nastavení pro generování odběrových profilů je uveden v Tabulce 14 níže, vygenerované profily jsou ve formátu .txt přiloženy k práci na CD.

Tabulka 14 - Charakteristiky odběrů TV v referenčním rodinném domě, pro teplotu dodávky 45 °C

Profil	RDREF, RDEXT1, RDEXT2, RDEXT3
Počet osob	4
Průměrná spotřeba TV (45 °C) na osobu	56 l/den
Průměrná spotřeba TV (45 °C) celkem	224 l/den
Pravděpodobnostní rozdělení	DHW Standard Distributions
Sezonní vlivy, vliv prázdnin a svátků	nezahmuty
Rozdíl mezi víkendy a pracovními dny	nezahmut

Byly uvažovány 4 kategorie odběrů podle Tabulky 15. Maximální špičkový průtok, který se může vyskytnout byl pro profil RDREF nastaven na 7 l/min, pro RDEXT1 a RDEXT2 byl nastaven na 12 l/min a pro profil RDEXT3 na 20 l/min.

Tabulka 15 - Charakteristiky použitých kategorií odběrů při generování odběrových profilů, pro teplotu dodávky 45 °C

Profil	Kategorie odběru	krátký odběr	střední odběr	sprcha	vana
RDREF	Průměrný průtok [l/min]	1	6	6	7
	Průměrná doba trvání odběru [min]	1	1	5	5
	Podíl na celkových odběrech [%]	14	36	10	40
RDEXT1	Průměrný průtok [l/min]	1	6	12	8
	Průměrná doba trvání odběru [min]	1	1	5	5
	Podíl na celkových odběrech [%]	14	36	10	40
RDEXT2	Průměrný průtok [l/min]	1	6	12	8
	Průměrná doba trvání odběru [min]	1	1	10	10
	Podíl na celkových odběrech [%]	14	36	10	40
RDEXT3	Průměrný průtok [l/min]	1	6	12	8
	Průměrná doba trvání odběru [min]	1	1	15	15
	Podíl na celkových odběrech [%]	14	36	10	40

Pro tyto profily byla v základním simulačním modelu provedena celoroční simulace s časovým krokem 1 minuta. Z celoročního souboru dat byly následně vybrány typické dny, pro které byla vyhodnocena provozní a odběrová charakteristika ohřívače. Pro referenční profil RDREF je záměrně provedeno podrobnější grafické zhodnocení provozu. Zhodnocení je doplněno komentářem. Pro zátěžové profily RDEXT1, RDEXT2 a RDEXT3 je proveden zkrácený rozbor. Typické dny je nutné volit s ohledem na to, že nejnáročnější den z hlediska vytápění nutně nemusí být nejnáročnější den z hlediska přípravy teplé vody. Pro profil RDREF byl vybrán den, který:

- Je jmenovitým dnem z hlediska vytápění
- Je běžným dnem otopného období
- Je mimo otopné období
- Je jmenovitým dnem z hlediska energetické náročnosti přípravy teplé vody
- Je běžným dnem z hlediska energetické náročnosti přípravy teplé vody
- Je nejméně náročným dnem z hlediska energetické náročnosti přípravy teplé vody

Pro profily RDEXT1, RDEXT2 a RDEXT3 byl pro zjednodušení vybrán pouze den, který:

- Je jmenovitým dnem z hlediska vytápění
- Je jmenovitým dnem z hlediska energetické náročnosti přípravy teplé vody

Cílem podrobnějšího rozboru v případě profilu RDREF je ukázat rozdíl v provozu ohřívače při jmenovitých podmínkách a při sníženém zatížení. Rozbor zároveň umožňuje zkontrolovat funkčnost rovnice pro modulaci výkonu, která byla navržena při vývoji numerického modelu.

V navazujících částech práce je uvedeno grafické zhodnocení odběrových a provozních charakteristik. Zhodnocení odběrových charakteristik proběhlo dvěma způsoby – formou zobrazení průběhu teplot teplé vody odebírané během dne a formou křivek odběru. Grafické zhodnocení provozní charakteristiky je provedeno prostřednictvím zobrazení průběhu dodávky výkonu během dne. Z tohoto zobrazení je možné odečíst jak počet sepnutí ohřívače během dne, tak dobu chodu ohřívače při jednotlivých sepnutích. Zhodnocení požadavku na udržení teploty je provedeno přes zobrazení průběhu teplot v zóně za daný den.

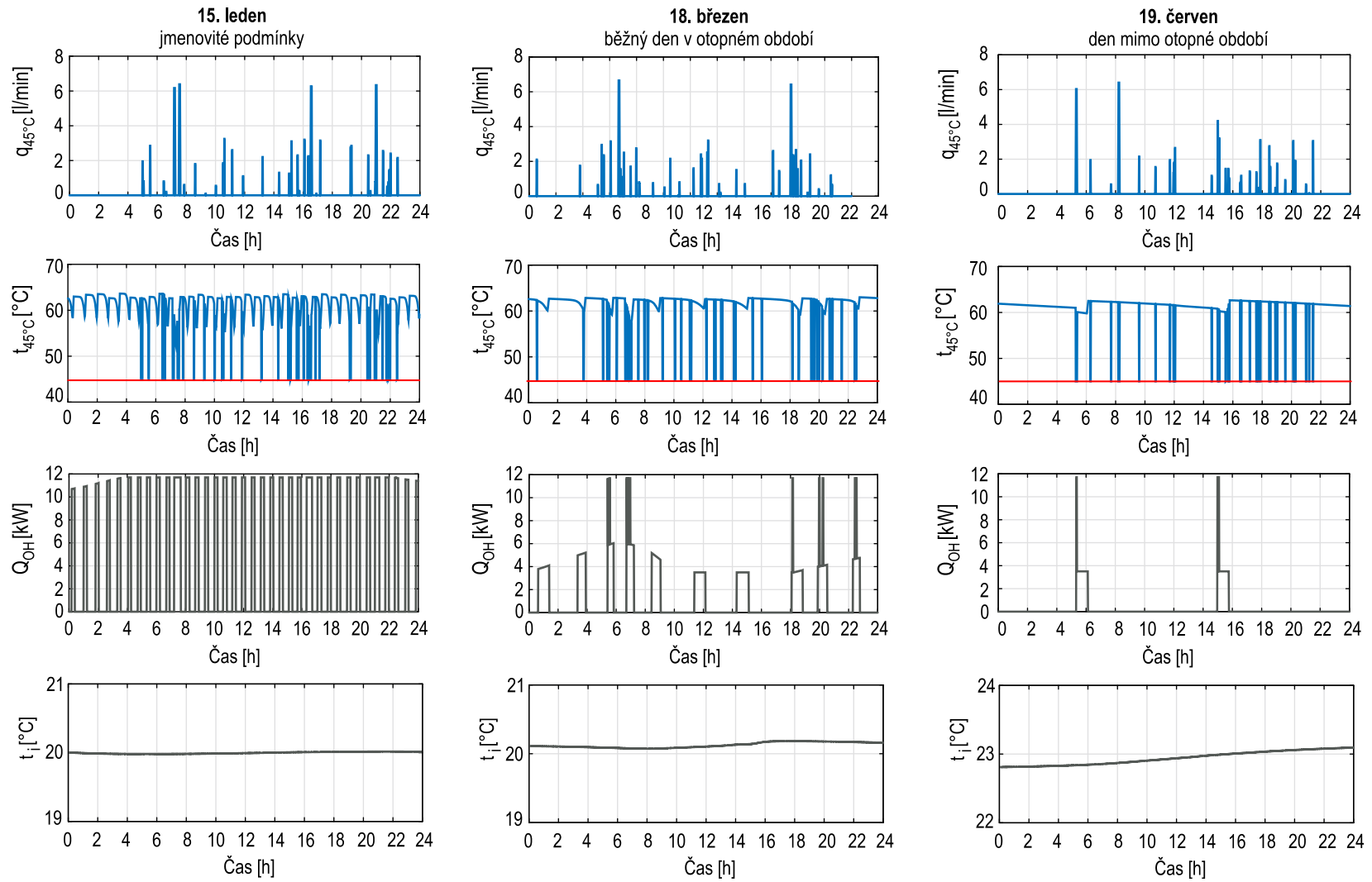
Na grafech na následujících stranách je zobrazeno vyhodnocení pro zatížení ohřivače profilem RDREF. Na Grafu 31 jsou zobrazeny charakteristiky pro typické dny z hlediska vytápění. Zobrazeny jsou průtoky a teploty teplé vody a pod nimi výkon dodaný ohřivačem a teplota v zóně. Požadovaná teplota vody po smísení je vyznačena červenou přímkou (45 °C). Jak je patrné, ohřivač byl schopen splnit požadavek na dodávku teplé vody o požadované teplotě při všech odběrech. Z porovnání vrchních grafů se spodními je patrné, která sepnutí ohřivače a dodaný výkon souvisí s odběry teplé vody a která souvisí s odběry pro vytápění. Dle nastavení regulace ohřivač spíná ve chvíli, kdy teplota na termostatu poklesne pod 55 °C mínus polovina hystereze, tzn. při 47,5 °C. Špičky v dodávce výkonu na prostředním a pravém grafu souvisí s použitou regulační strategií, která říká, že ohřivač dodá maximální výkon bez ohledu na aktuální požadavek ekvitermní regulace ve chvíli, kdy dochází k odběru teplé vody a zároveň poklesne teplota na termostatu pod 55 °C.

Tyto výsledky je možné porovnat s Grafem 32, na kterém je odběrová charakteristika dodávky teplé vody vyznačena v kumulativním vyjádření. Z kumulativního vyjádření je možné snadno odečíst, jestli byl požadavek na dodávku energie v průběhu dne splněn. Zároveň je z nich možné odečíst celkové množství odebrané energie za den. Na grafu je v kumulativním vyjádření shora dolů zobrazeno: dodaná energie v teplé vodě za daný den, požadovaná energie v teplé vodě za den a dále poměr dodané a požadované energie za den. V případě, že je poměr nižší než 1, nebyly splněny všechny požadavky na dodávku. Jak je patrné, tak i v nejchladnější a energeticky nejnáročnější den v roce z hlediska vytápění byl ohřivač schopen dodávat dostatek energie přípravu teplé vody i pro vytápění. Problém s dodávkou se nevyskytl ani v ostatní zobrazené dny. V nejchladnější den a v běžný den se vyskytl odběrový profil s ranní a večerní odběrovou špičkou a ve dni mimo otopné období odběrový profil s nevýraznou ranní odběrovou špičkou. Vzhledem k tomu, že je simulován plynový ohřivač, jehož provoz není závislý na venkovních klimatických podmínkách, není nutné věnovat času výskytu odběrových špiček větší pozornost. Naopak v případě simulací některého z obnovitelných zdrojů energie má načasování výskytu odběrových špiček na výslednou provozní charakteristiku zásadní vliv, může značně ovlivnit dosažené výsledky a je nutné jej řešit podrobněji.

Na Grafu 33 jsou zobrazeny charakteristiky pro typické dny z hlediska přípravy teplé vody. Z grafu je patrné, že i v těchto dnech ohřivač bez problému splnil požadavek na dodávku teplé vody o požadované teplotě 45 °C, vyznačeno červenou přímkou. Ze spodních grafů je dobře patrný přínos použití modulačních hořáků. Za jmenovitých podmínek jsou ohřivače během otopného období provozovány minimální dobu a většinu času pracují pouze pod částečným zatížením. Při sníženém zatížení je vyžadována dodávka výrazně nižšího výkonu, než při jmenovitém zatížení. Ohřivač má možnost modulovat a přizpůsobovat svůj výkon aktuálním provozním podmínkám, což je patrné z tvaru křivky dodávky výkonu na grafech. V případě, že by byl využit pouze ohřivač s ON/OFF hořákem, byl by při provozu za sníženého zatížení nucen cyklovat, což by se negativně projevilo na jeho životnosti a hospodárnosti provozu. Z grafu je také dobře patrný výrazně nižší počet startů ve dnech mimo otopné období, kdy není nutné dodávat energii do vytápění.

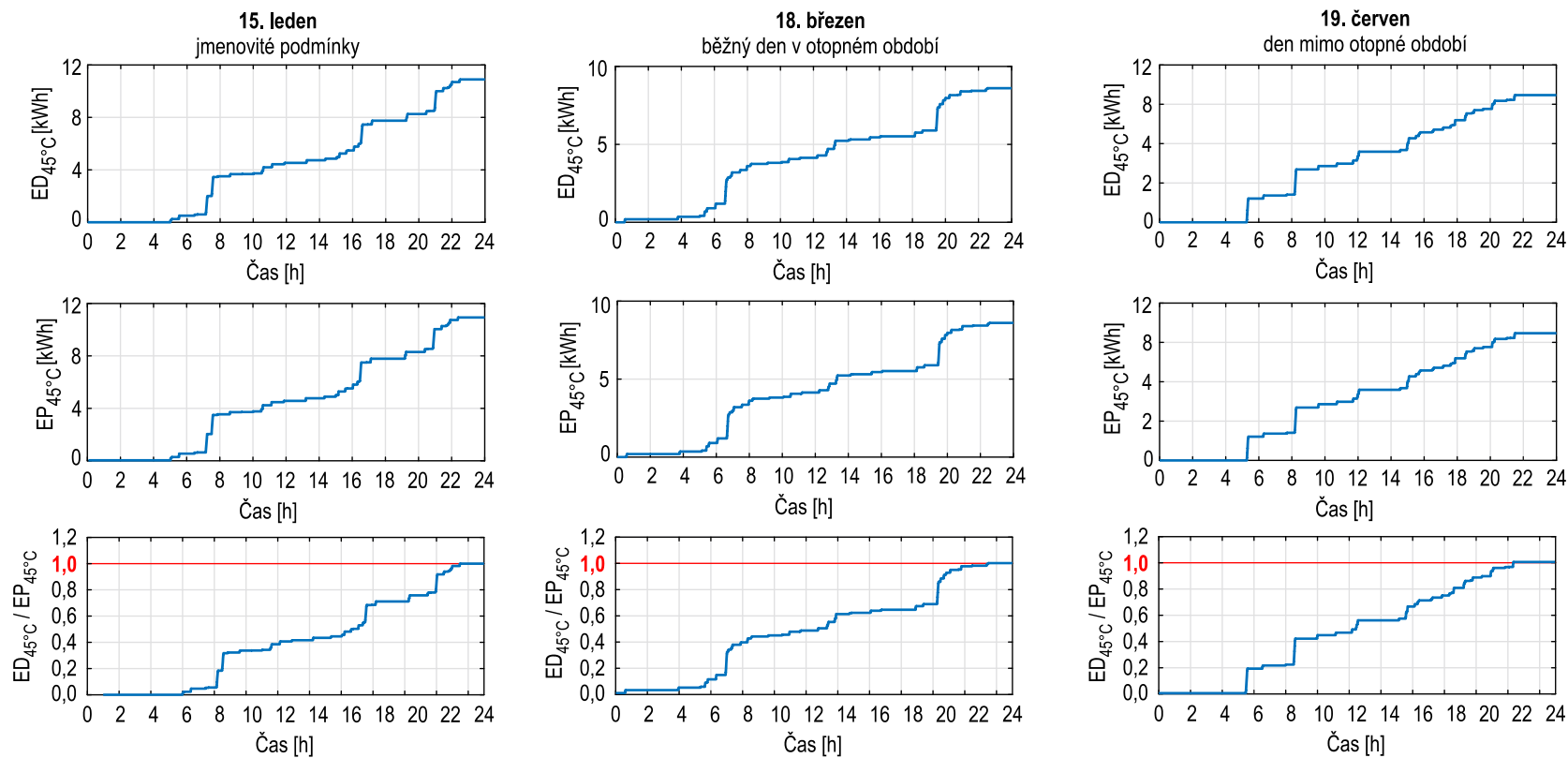
Tyto výsledky je možné porovnat s odběrovými charakteristikami teplé vody na Grafu 34. Na rozdíl od předchozího grafu v kumulativním vyjádření zobrazuje tento graf charakteristiku odběrových profilů ve dnech, kdy se vyskytly energeticky nejnáročnější, běžné a energeticky nejméně náročné odběry teplé vody. Jak je patrné z grafu, při výskytu energeticky nejnáročnějšího odběrového profilu bylo za den v teplé vodě celkem odebráno 20 kWh energie. Ohřivač dodávku splnil ve všech případech.

RDREF – ODBĚROVÉ A PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA VYTÁPĚNÍ



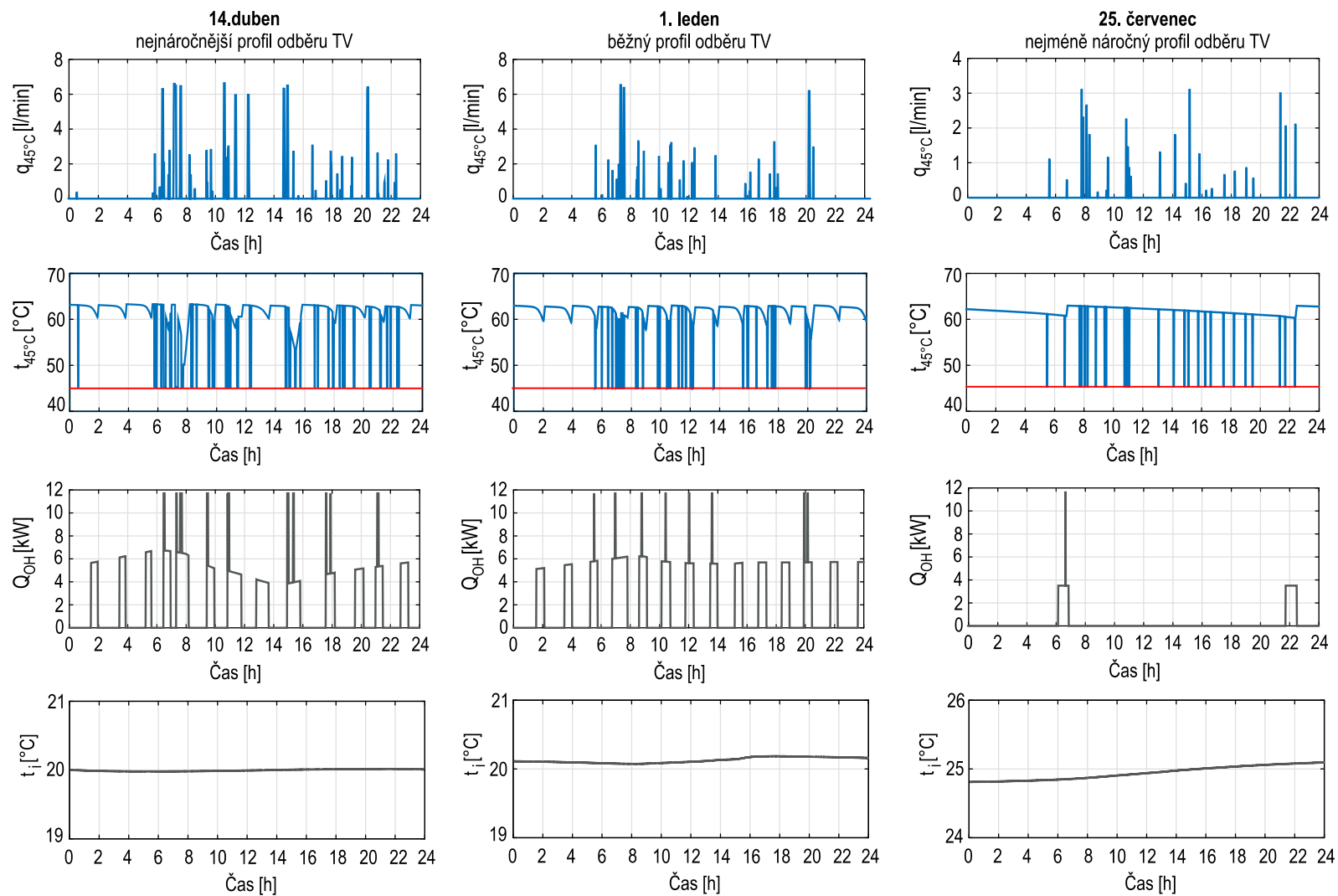
Graf 31 – Charakteristiky teploty v zóně a dodávky TV a výkonu pro IR 12-160 v typických dnech z hlediska vytápění

RDREF – ODBĚROVÉ KUMULATIVNÍ CHARAKTERISTIKY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA VYTÁPĚNÍ



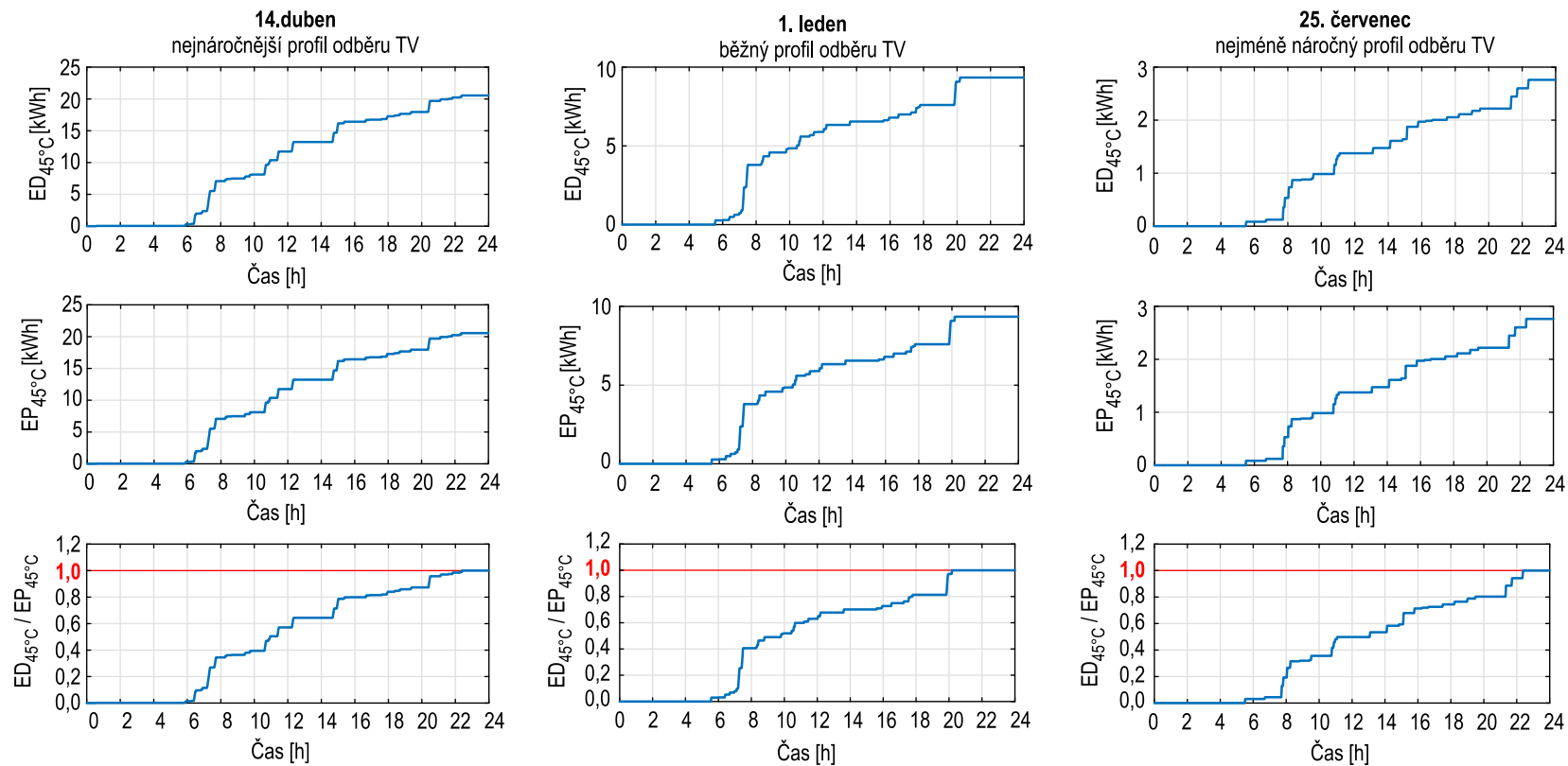
Graf 32 – Kumulativní charakteristiky dodávky TV pro IR 12-160 v typických dnech z hlediska vytápění, ED-skutečně dodaná energie v teplé vodě, EP – požadovaná energie v teplé vodě

RDREF – ODBĚROVÉ A PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA PŘÍPRAVY TV



Graf 33 – Charakteristiky teploty v zóně a dodávky TV a výkonu pro IR 12-160 v typických dnech z hlediska přípravy TV

RDREF – ODBĚROVÉ KUMULATIVNÍ CHARAKTERISTIKY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA PŘÍPRAVY TV

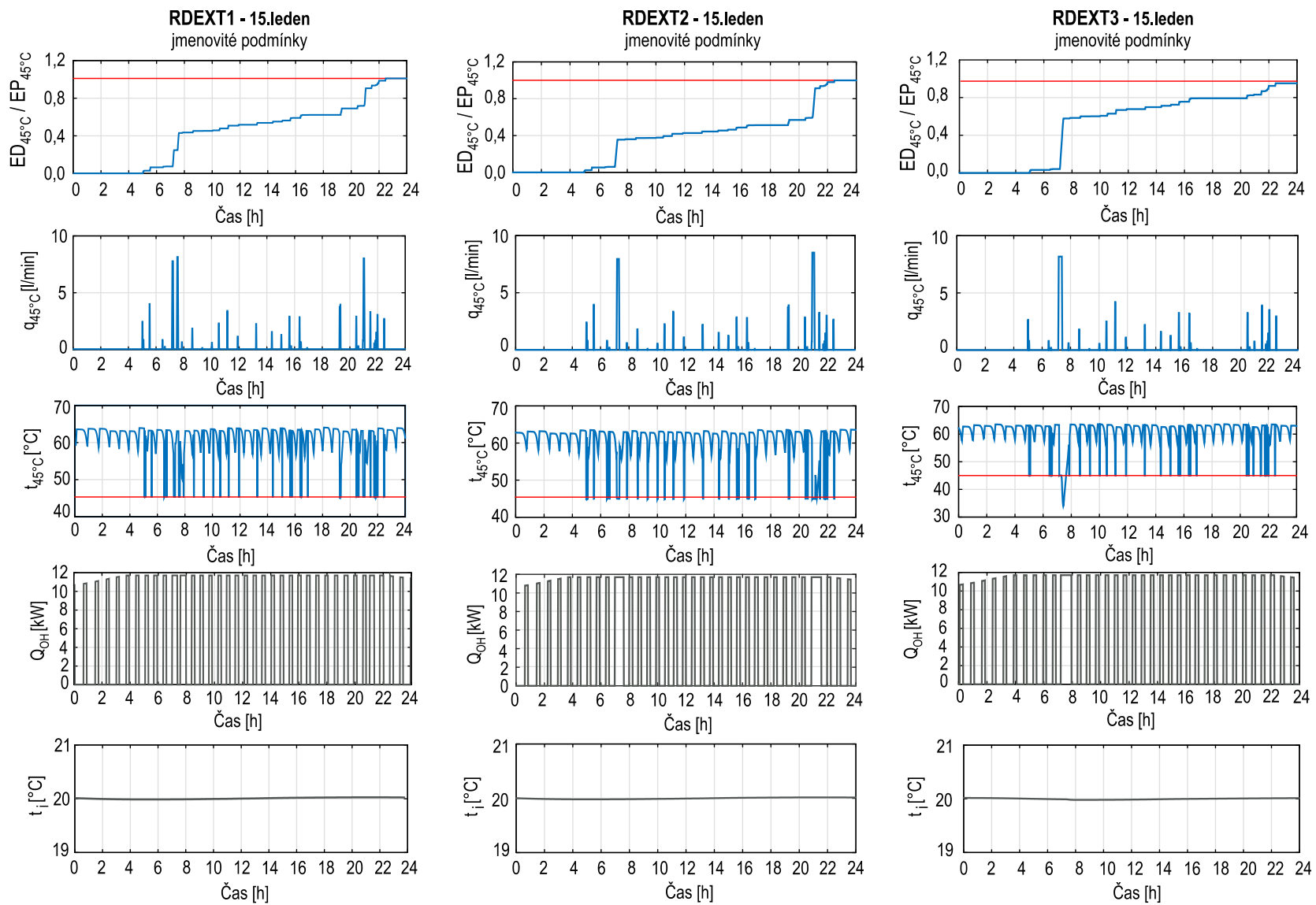


Graf 34 – Kumulativní charakteristiky dodávky pro IR 12-160 v typické dny z hlediska přípravy TV, ED – skutečně dodaná energie v teplé vodě, EP–požadovaná energie v teplé vodě

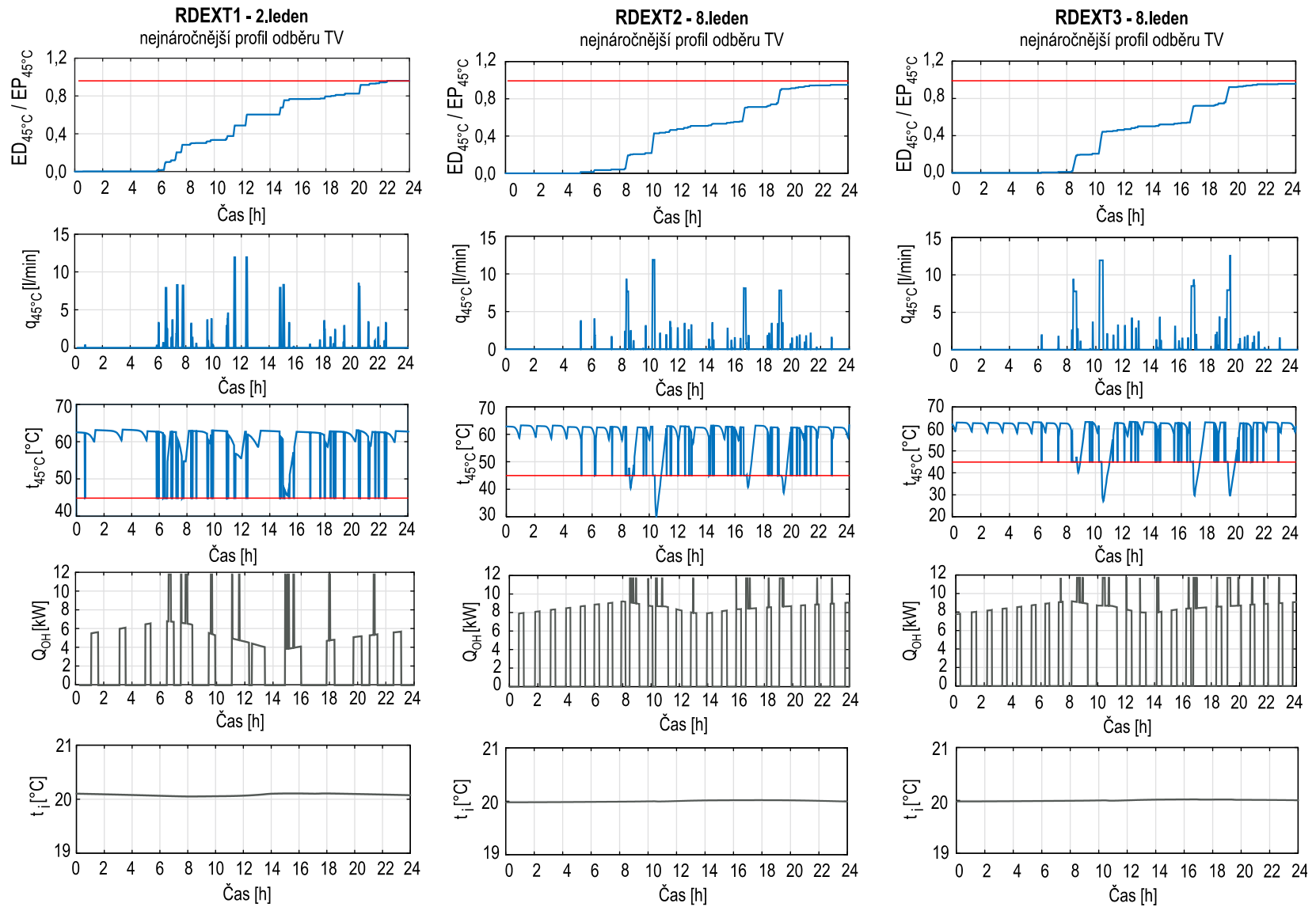
Na grafech na následujících stranách je zobrazeno vyhodnocení pro zatížení ohřivače profily RDEXT1, RDEXT2 a RDEXT3.

Na Grafu 35 jsou zobrazeny provozní a odběrové charakteristiky ohřivače ze dne, kdy nastaly jmenovité podmínky z hlediska vytápění. Na grafu je shora dolů zobrazen: poměr dodané a požadované energie v teplé vodě v kumulativním vyjádření, použitý odběrový profil vyjádřený ve formě průtoků teplé vody, teplota dodávané teplé vody, dodávka výkonu v průběhu dne a průběh teploty v zóně během dne. V zobrazených dnech se v případě profilu RDEXT1 a RDEXT2 nevyskytl problém s dodávkou teplé vody. Ohřivač byl schopen dodat teplou vodu o požadované teplotě 45 °C při všech odběrech, které se během dne vyskytly. V případě profilu RDEX3 se vyskytl problém s dodávkou vody o požadované teplotě během ranní odběrové špičky, která trvala celkem 15 minut při průtoku 8,2 l/min při současně dodávce 6,7 l/min o teplotě 52 °C do vytápění, přičemž k poklesu teploty pod 45 °C došlo až po 11 minutách doby trvání odběrové špičky. Z rozlišení grafu to není patrné, na straně 71 je graf uveden ve větším rozlišení se zaměřením pouze na úsek odběrové špičky. Z grafů je zároveň patrné, že vyčerpání kapacity ohřivače se projevilo pouze na teplotě dodávané teplé vody, ale na teplotě v zóně se vzhledem k tepelné kapacitě budovy projevit nestačilo. Vliv nedostatečné teploty dodávané teplé vody na křivku kumulativního vyjádření je zanedbatelný, protože všechny ostatní odběry ohřivač splnil. Objem dodaný o nižší než požadované teplotě se na poměrové kumulativní křivce dodané a požadované energie za den téměř neprojevil. To ukazuje nevýhodu využití kumulativního vyjádření pro případy, kdy je nutné řešit detailně kvalitu každé dílčí dodávky teplé vody. Kumulativní vyjádření není schopné tyto dílčí energeticky málo významné případy v grafickém vyjádření viditelně rozlišit.

Na Grafu 36 jsou zobrazeny provozní a odběrové charakteristiky ohřivače ze dní, kdy nastaly energeticky nejnáročnější odběry teplé vody. Při zatížení ohřivače profilem RDEXT1 byly požadavky na dodávku teplé vody a udržení teploty v zóně splněny v průběhu celého dne. Při zatížení profilem RDEXT2 a RDEXT3 nastal problém s dodávkou vody o dostatečné teplotě při výskytu odběrových špiček. Například v případě profilu RDEXT3 se jednalo o odběrovou špičku, která trvala 13 minut při průtoku 12 l/min, přičemž ohřivač přestal být schopen splnit požadavek na dodávku teplé vody po 11 minutách trvání této odběrové špičky. Protože v tento den nenastaly z hlediska vytápění jmenovité podmínky, ohřivač byl schopen splnit odběrovou špičku po delší dobu, než jaká by vycházela z Grafu 30 z předchozí kapitoly, který byl sestaven pro jmenovité podmínky z hlediska vytápění. V případě této odběrové špičky teplé vody se vyskytl současný požadavek na dodávku 6,7 l/min o teplotě pouze 42 °C do vytápění. Jmenovité podmínky předpokládají průtok 6,7 l/min při teplotě 52 °C, pro ohřivač se tedy jednalo z hlediska vytápění o méně náročnou situaci, než pro kterou byl sestaven Graf 30 a proto byl ohřivač schopen odběrovou špičku splnit po delší dobu, než jaká by vycházela z Grafu 30. Příklad podrobné analýzy průběhu této odběrové špičky je uveden na straně 72.

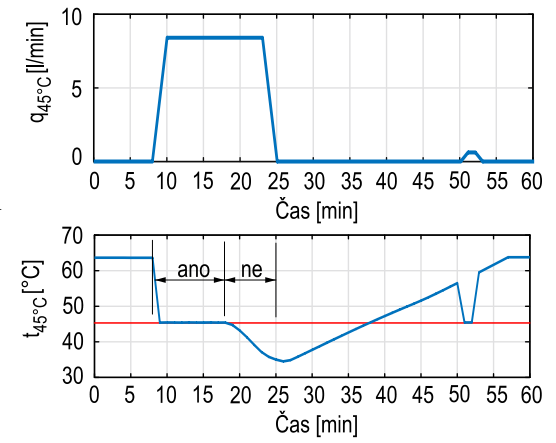
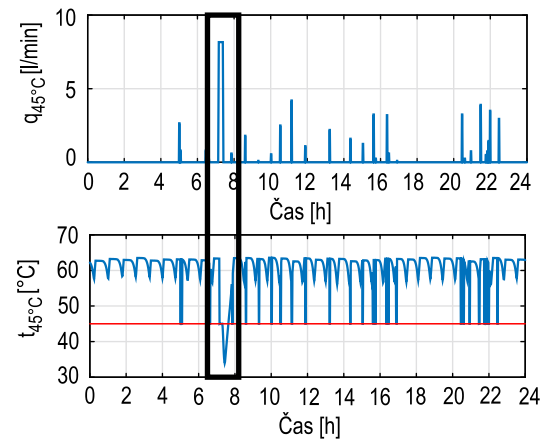


Graf 35 - Charakteristiky provozu ohřivače IR 12-160 při jmenovitých podmínkách z hlediska vytápění

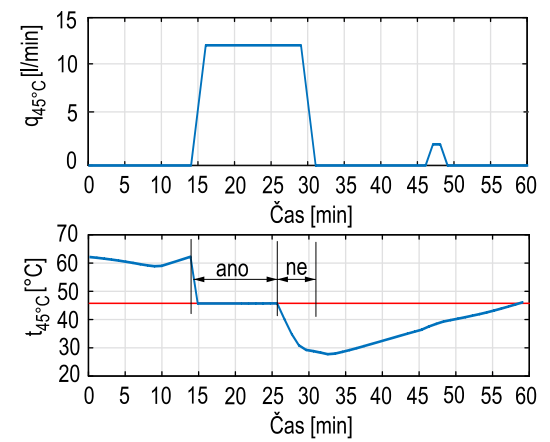
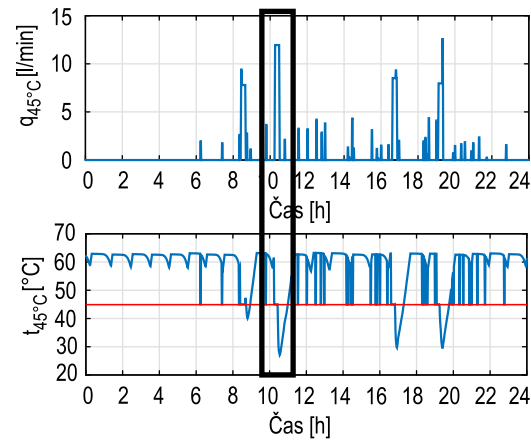


Graf 36 – Charakteristiky provozu ohřivače IR 12-160 při výskytu energeticky nejnáročnějších odběrů TV

PŘÍKLAD PODROBNÉ
ANALÝZY ODBĚROVÉ
ŠPIČKY Z GRAFU 38
PRO RDEXT3



PŘÍKLAD PODROBNÉ
ANALÝZY ODBĚROVÉ
ŠPIČKY Z GRAFU 39
PRO RDEXT3



Graf 37 - Analýza odběrové špičky pro RDEXT3

Test provozní a odběrové charakteristiky při zatížení zátěžovým profilem – roční zhodnocení

Roční zhodnocení je provedeno vyhodnocením úrovně nabití, na kterém se ohřívač během odběrů teplé vody nacházel. Vyhodnocení proběhlo pro čtyři úrovně. Úroveň přebito obsahuje všechny situace, kdy byla teplota na termostatu ohřívače vyšší než 55 °C, tzn. přestože docházelo k odběru teplé vody, ohřívač byl schopen udržovat teplotu vysoko nad teplotou požadovanou na odběrném místě. Tento stav je typický pro energeticky nenáročné odběry, při kterých ohřívač vždy splnil požadavek na dodávku teplé vody. Stav nabito zahrnuje všechny situace, kdy během byla teplota na termostatu ohřívače v rozmezí 45 až 55 °C. Tato kategorie představuje situace, kdy docházelo k energeticky náročnějším odběrům než v případě přebito, ale voda v ohřívači stále měla dostatečnou teplotu, aby bylo možné na odběrná místa dodat vodu o požadované teplotě 45 °C. Stav nedostatečně nabito představuje všechny situace, při kterých byla teplota vody na termostatu ohřívače 35 až 45 °C, tzn. na odběrné místo nemohla být dodána teplá voda o požadované teplotě. Stav vybito představuje situace, kdy teplota na termostatu poklesla pod 35 °C, tzn. jednalo se o dodávky, při kterých nemohly být splněny požadavky na uživatelský komfort. Okrajové podmínky vyhodnocení jsou uvedeny níže. Část skriptu pro vyhodnocení úrovně nabití je uvedena v Příloze 4.

Okrajové podmínky

Spínací teplota na termostatu t_{SET} : 55 °C

Požadovaná teplota teplé vody t_{TV} : 45 °C

Intervaly

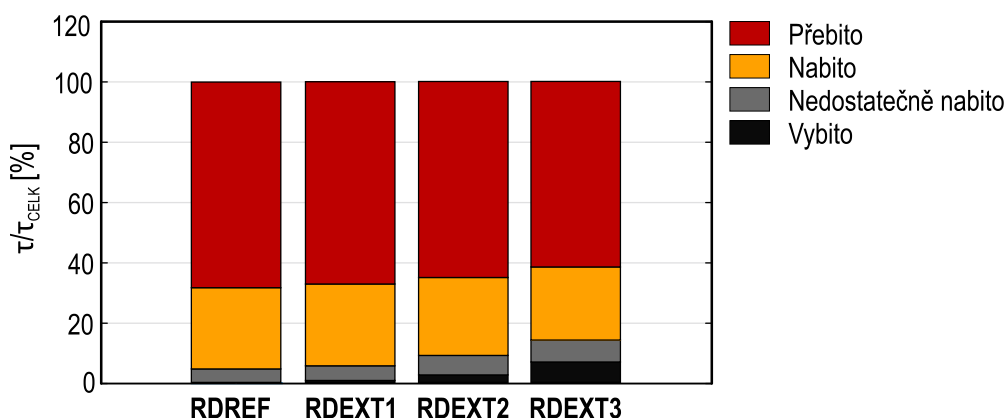
Přebito $t_{SET} \geq 55$ °C

Nabito 45 °C $\leq t_{SET} < 55$ °C

Nedostatečně nabito 35 °C $\leq t_{SET} < 45$ °C

Vybito $t_{SET} < 35$ °C

Dosažené výsledky jsou zobrazeny na Grafu 38 níže v procentuálním vyjádření. Poměr τ ku τ_{celk} v procentuálním vyjádření představuje celkovou dobu strávenou v daném stavu vydělenou celkovou dobou, po kterou byla teplá voda odebírána. Například v případě profilu RDREF zůstal ohřívač během většiny odběrů teplé vody na odběrná místa ve stavu přebito. Z grafu je patrné, že v případě odběrů teplé vody podle profilu RDREF nenastala během roku žádná situace, při které by došlo k vybití kapacity ohřívače. Čas, kdy byl ohřívač nedostatečně nabit tvoří 4,7 % z celkového času, kdy byla teplá voda během roku odebírána. V případě zatížení profilem RDEXT1, RDEXT2 a RDEXT3 došlo během roku k situacím, kdy byla kapacita ohřívače vybita. Nejnáročnějším profilem je profil RDEXT3. V něm tvoří čas ve stavu vybito 6,8 % z celkového času, kdy byla teplá voda odebírána. U všech profilů převažuje doba ve stavu přebito, tzn. při většině odběrů teplé vody byla teplota na termostatu ohřívače vyšší než 55 °C.



Graf 38 - Rozložení úrovně nabití ohřívače IR 12-160 během všech odběrů teplé vody za rok

8.2 Výsledky pro scénář B: ohřívač IR 20-200 v bytovém domě

Parametrická studie optimálního nastavení

Cílem parametrické studie je určení optimálního nastavení spínací teploty a hystereze na termostatu. Výška umístění termostatu je dána konstrukcí ohřívače, ale spínací teplota a hystereze je nastavitelná volitelně v rozsahu 40–85 °C, resp. 2–15 K. Do parametrické studie jsou vzhledem k vysokému zatížení ohřívače vybrány vyšší spínací teploty tzn. 60 a 65 °C a hystereze 2, 10 a 15 K. Použité kombinace jsou shrnuty v Tabulce 16 níže.

Pro každou z uvedených kombinací byla provedena roční simulace provozu s krokem 1 minuta. Simulace proběhla pro referenční nastavení shrnuté v kapitole 6.2. Pro simulaci byl použit referenční zátěžový profil teplé vody uvedený na straně 75 v této kapitole. Vzhledem k tomu, že tento scénář simuluje nevhodný návrh, došlo během roku ve všech případech ke stavům, kdy nebyl splněn požadavek na dodávku teplé vody o požadované teplotě a průtoku.

Na základě výsledků roční simulace v Tabulce 16 byla pro všechny navazující simulace zvolena varianta nastavení spínací teploty na 65 °C s hysterezí 10 K. Varianta nastavení spínací teploty 65 °C a hystereze 2 K dává sice mírně vyšší procento případů, kdy byly splněny požadavky na dodávku teplé vody, ale také výrazně vyšší počet startů za rok, proto nebyla zvolena.

Tabulka 16 – Výsledky parametrické studie

Termostat 0,7.H	Spínací teplota	60 °C			65 °C		
	Hystereze	2	10	15	2	10	15
Počet startů za rok		4402	3037	2520	3665	2520	2207
Maximální souvislá doba chodu [min]		927	946	1066	1060	1264	1232
Průměrná souvislá doba chodu [min]		75	109	133	91	134	155
Minimální souvislá doba chodu [min]		16	26	32	19	30	36
Stavy, kdy splněny požadavky na TV [%] ¹⁾		69	69	69	77	75	73
Stavy, kdy splněny požadavky na vytápění [%] ²⁾		100	100	100	100	100	100

1) tzn. kdy dodán požadovaný průtok o teplotě $t (45 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$, vztaheno k celkovému požadovanému objemu o teplotě 45 °C za rok

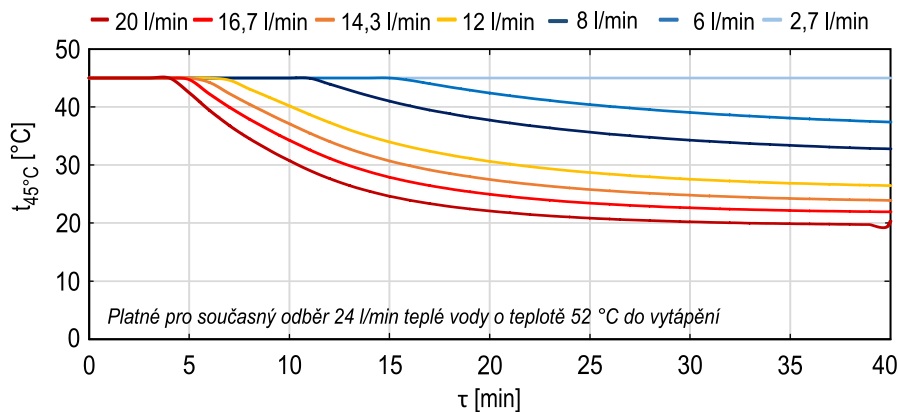
2) kdy teplota v zóně udržena na požadovaných $t_i (20 \pm 0,5) \text{ }^\circ\text{C}$, vztaheno k počtu hodin otopného období

Test odběrové charakteristiky při zatížení jednorázovým odběrem, hledání limitu použití ohřívače

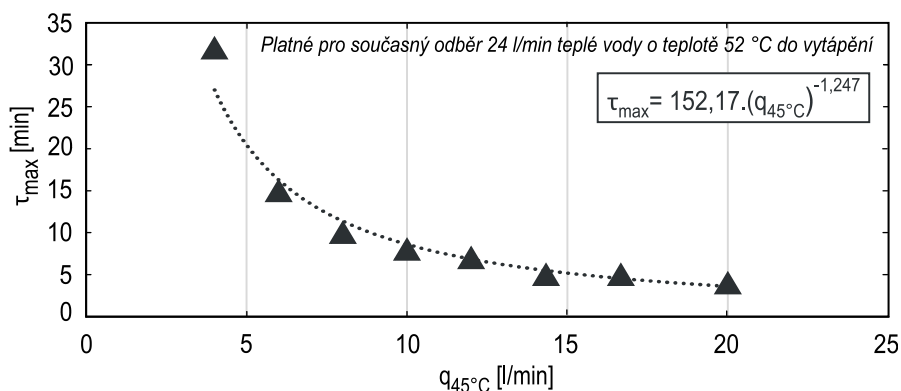
Test odběrové charakteristiky proběhl shodným způsobem jako u předchozího scénáře, tzn. nepřerušovaným odběrem a s aktivním zdrojem tepla. Testování probíhalo ze stavu plně nabitého ohřívače. Požadovaná teplota teplé vody dodávané na odběrná místa byla nastavena na 45 °C, teplota přívodní studené vody byla nastavena na 5 °C.

Jmenovitý průtok pro vytápění bytového domu je 1425 kg/h, tzn. 24 l/min, návrhová teplota přívodní vody do vytápění je 52 °C. Ohřívač musí během testu dodávat trvale průtok do vytápění současně s dodávkou trvalého průtoku teplé vody na odběrná místa. Simulace proběhla pro ohřívač zapojený v základním numerickém modelu popsaném v kapitole 5. Na Grafu 39 jsou zobrazeny výsledky testu odběrové charakteristiky pro zvolené průtoky.

Z grafu je patrné, že při současné dodávce průtoku 24 l/min vody o teplotě 52 °C do vytápění je ohřívač schopen na odběrná místa teplé vody **trvale** dodávat průtok 2,7 l/min vody o teplotě 45 °C. Odběrová špička o průtoku 20 l/min může dle výsledků trvat maximálně 4 minuty, než dojde k poklesu teplé vody pod požadovaných 45 °C. Závislost maximální možné délky trvání odběrové špičky na trvalém průtoku je zobrazena na Grafu 40.



Graf 39 - Pokles teploty za směšovací ventil TV v závislosti na odebíraném průtoku teplé vody pro IR 20-200



Graf 40 Max. možné doby trvání odběrových špiček TV při současně dodávce 24 l/min teplé vody do vytápění

Test provozní a odběrové charakteristiky při zatížení zátěžovými profily – denní zhodnocení

V této části jsou uvedeny parametry použitých zátěžových profilů a výsledné charakteristiky ohřívače při zatížení těmito profily. Charakteristiky jsou vyhodnoceny pro vybrané typické dny.

Pro vygenerování celoročního odběrového profilu BDREF v minutovém kroku byl využit program DHWcalc. Charakteristiky odběrů teplé vody jsou uvedeny v Tabulce 17. Bylo uvažováno, že na jednu osobu připadá průměrná denní spotřeba teplé vody 50 l/den při teplotě 45 °C. V navrženém bytovém domě je celkem uvažováno s 30 obyvateli. Tomu odpovídá celková průměrná denní spotřeba teplé vody 1500 l/den při teplotě 45 °C. Zátěžový profil BDEXT1 byl sestaven pro stejné celkové množství odebrané teplé vody a stejný průtok jako v referenčním profilu, ale byla navýšena průměrná doba trvání odběru. V zátěžových profilech BDEXT2 a BDEXT3 bylo navýšeno celkové odebrané množství za den, ale byl snížen průměrný požadovaný průtok.

Charakteristické rozdělení odběrů bylo zadáno uživatelsky, přičemž byly rozlišeny pracovní dny a víkendy. V pracovních dnech je uvažováno s ranní a večerní odběrovou špičkou, o víkendech s výraznější ranní špičkou. Charakteristiky rozdělení jsou uvedeny v Tabulce 18. Dle Matušky [37] je v případě bytových domů nutné uvažovat snížení spotřeby teplé vody během letního období. Snížení je způsobeno prázdninami a dovolenými a spotřeby vody jsou zpravidla o 25 % menší než v ostatních částech roku. Z tohoto důvodu bylo do generování odběrového profilu zadáno pravidlo pro snížení spotřeby teplé vody na 75 % jmenovité spotřeby. Snížení bylo nastaveno pro období od 1.7 do 1.9.

Tabulka 17 - Charakteristiky odběrů, pro teplotu TV 45 °C

Zátěžový profil	BDREF	BDEXT1	BDEXT2	BDEXT3
Průměrná spotřeba TV (45 °C) celkem	1500 l/den	1500 l/den	2000 l/den	2000 l/den
Průměrný průtok [l/min]	8	8	5	5
Průměrná doba trvání odběru [min]	8	10	8	10
Max. možný průtok [l/min]	12	12	8	8

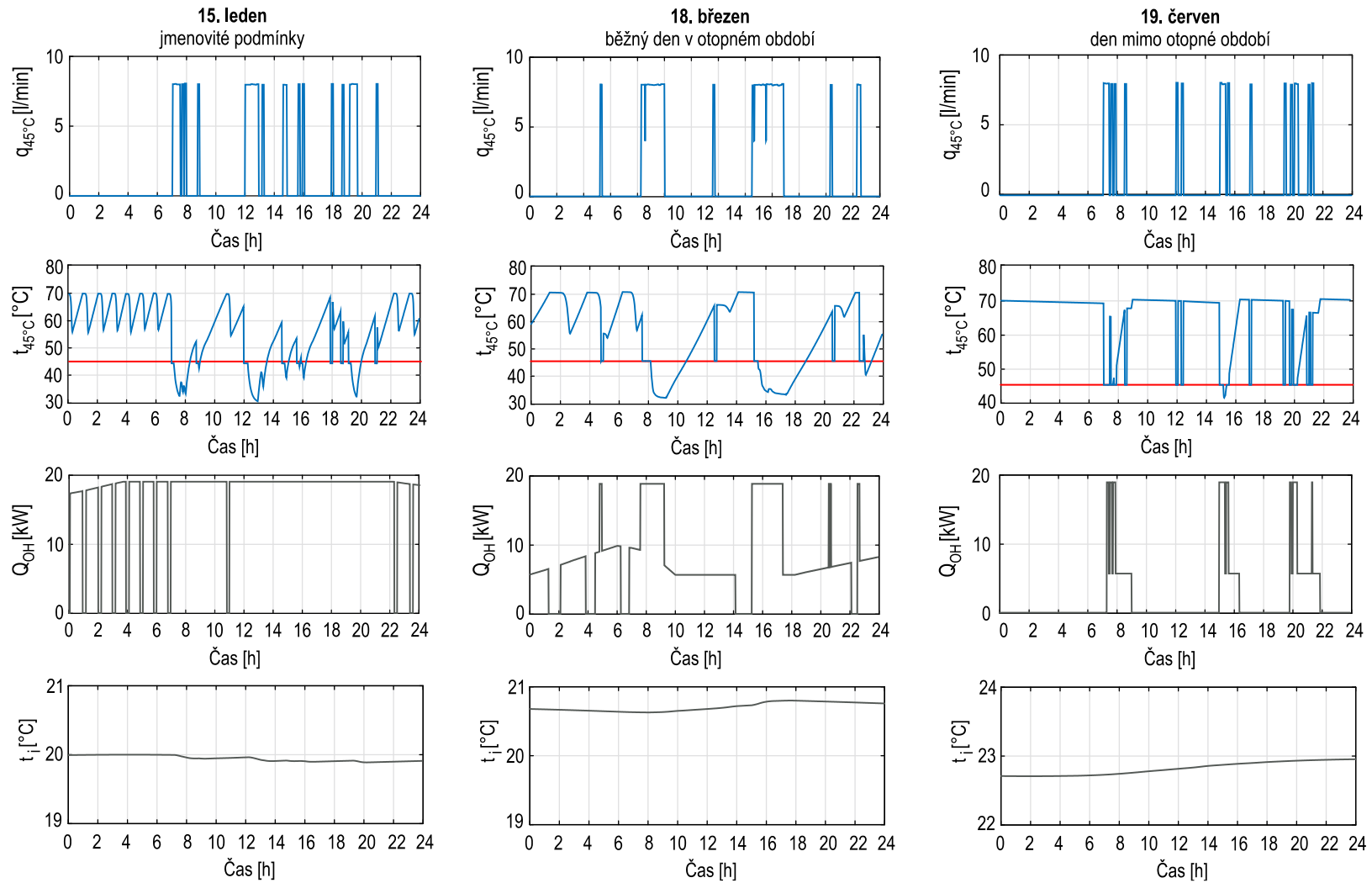
Tabulka 18 – Charakteristiky rozdělení odběrů, pro teplotu 45 °C

Profil	BDREF, BDEXT1, BDEXT2, BDEXT3
Pracovní dny	Odebráno z celkové denní spotřeby
22:00-06:30	0 %
06:30-07:30	22 %
07:30-12:00	9,8 %
12:00-13:00	22 %
13:00-18:00	11 %
18.00-22:00	35,2 %
Víkendy	Odebráno z celkové denní spotřeby
23:00-07:00	5 %
07:00-09:00	31,6 %
09:00-15:00	9,3 %
15:00-17:00	31 %
17:00-20:00	4,6 %
20:00-23:00	18,6 %

Na grafech na následujících stranách je zobrazeno vyhodnocení pro zatížení ohřívače profilem BDREF. Z odběrových charakteristik a z kumulativního vyjádření je patrné, že ohřívač má problém splnit dodávku teplé vody ve chvíli, kdy zároveň dochází k odběrům do vytápění. Problematické jsou dlouhodobé odběry energie a krátkodobé několikanásobné odběry v rychlém sledu za sebou, mezi kterými nemá ohřívač dostatek času na dohřev vody na požadovanou teplotu. Oproti provozní charakteristice ohřívače simulovaného v předchozím případě je z grafů dodávky výkonu patrná podstatně delší souvislá doba chodu. Prodloužení doby chodu je dané skutečností, že odběry energie pro vytápění i přípravu teplé vody způsobují trvalý pokles teploty na termostatu pod spínací teplotu a regulace trvale dostává požadavek na dohřev.

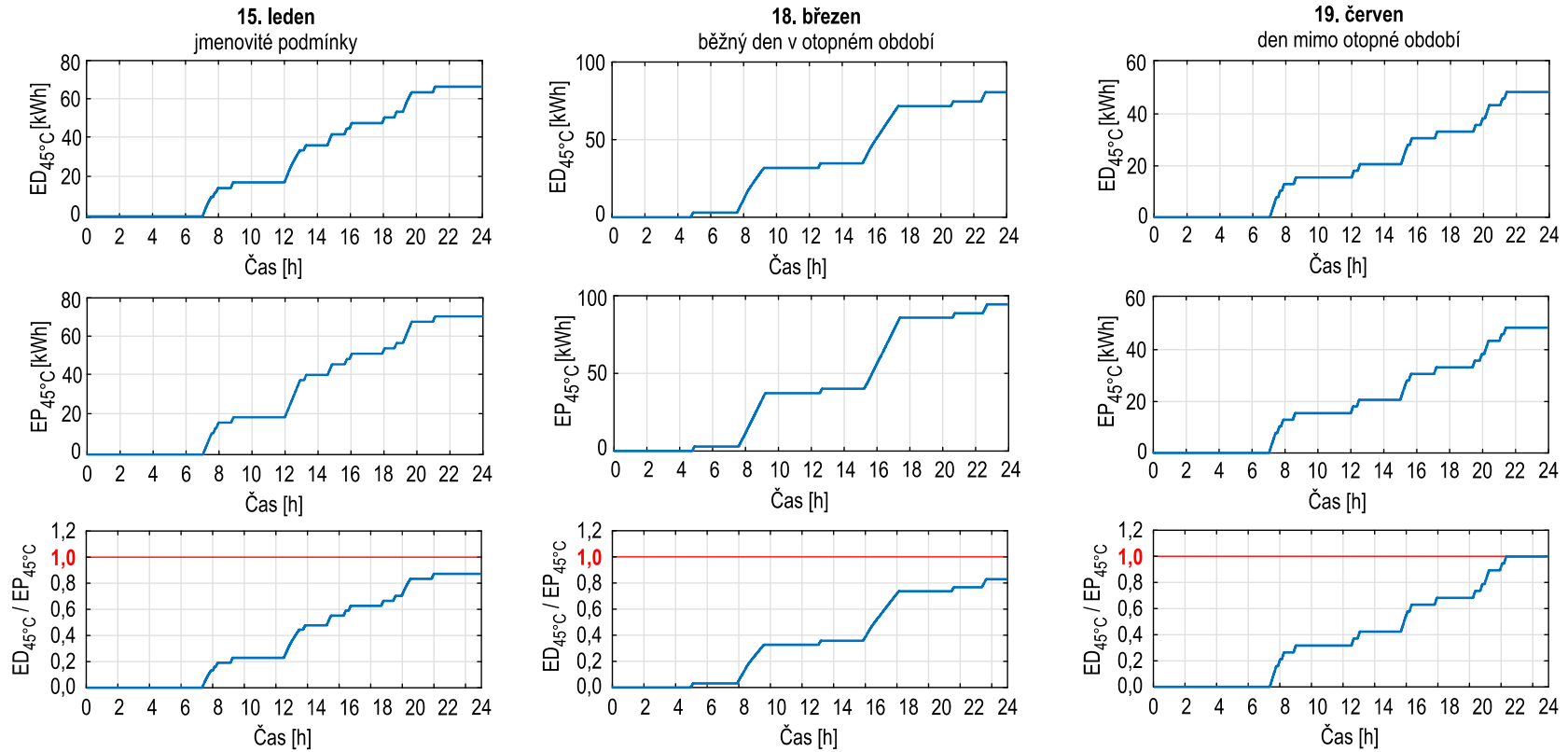
Při použití odběrových profilů BDEXT1, BDEXT2 a BDEXT3 ohřívač také nesplnil požadavky na dodávku teplé vody, poddimenzování se v případě provozu za jmenovitých podmínek projevuje i na teplotě ve vytápěném prostoru, i když pouze minimálně. Ohřívač nesplnil dodávku ani v případě odběrového profilu BDEXT1, který obsahuje méně výrazné odběrové špičky než ostatní profily.

BDREF – ODBĚROVÉ A PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA VYTÁPĚNÍ



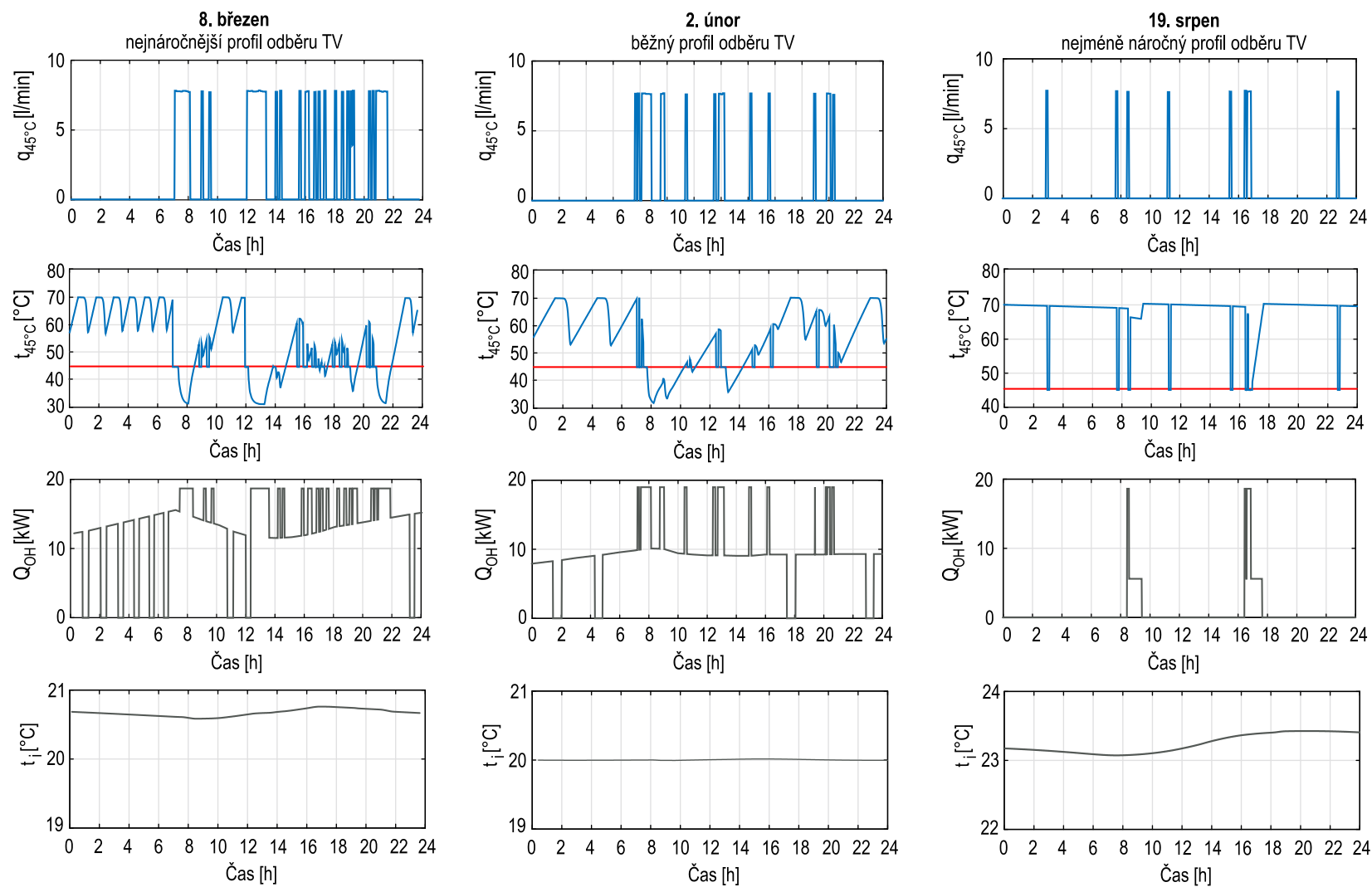
Graf 41 - Charakteristiky teploty v zóně a dodávky TV a výkonu pro ohřivač IR 20-200

BDREF – ODBĚROVÉ KUMULATIVNÍ CHARAKTERISTIKY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA VYTÁPĚNÍ



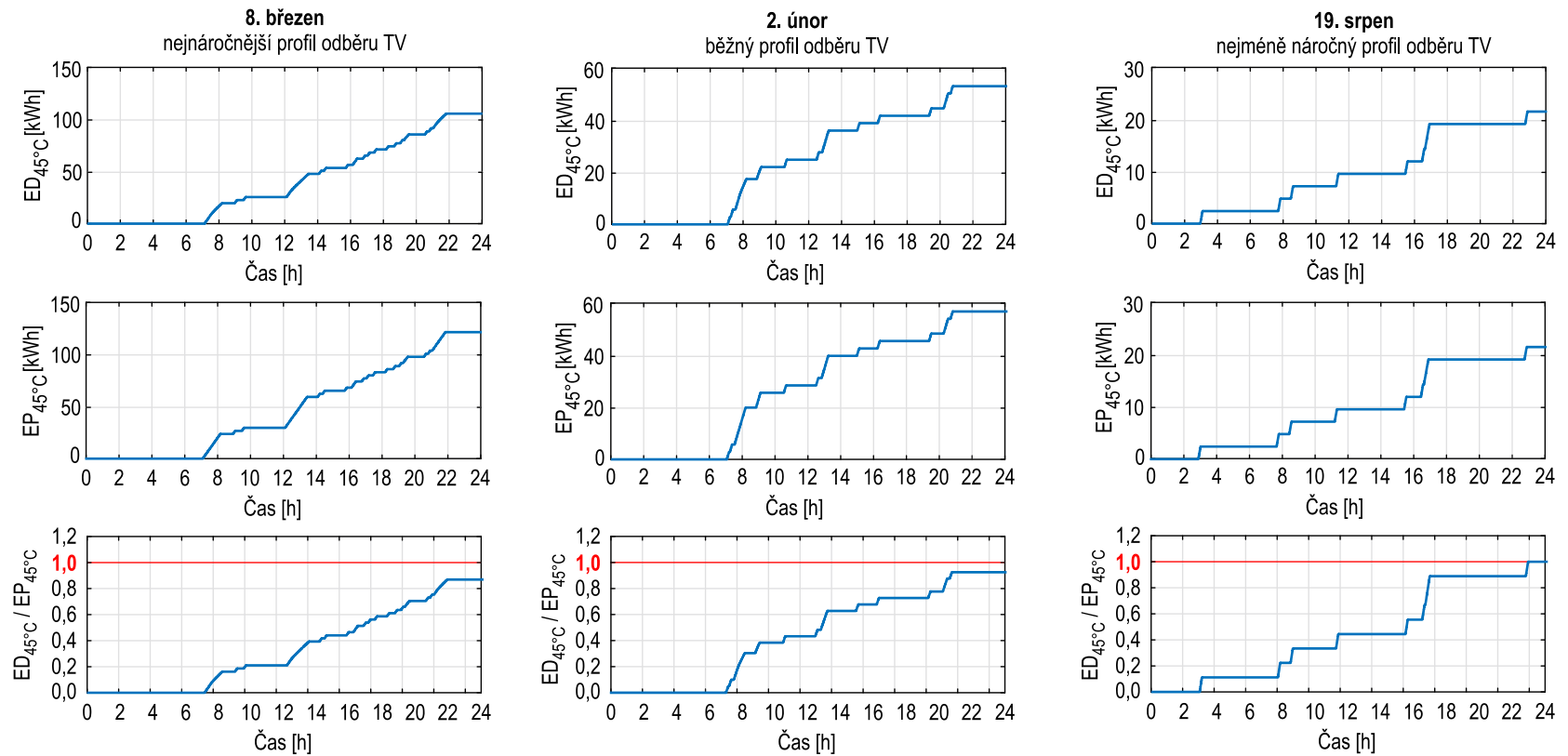
Graf 42 - Kumulativní charakteristiky dodávky TV pro IR 20-200 v typických dnech z hlediska vytápění, ED-sktečně dodaná energie v teplé vodě, EP – požadovaná energie v teplé vodě

BDREF – ODBĚROVÉ A PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA PŘÍPRAVY TEPLÉ VODY

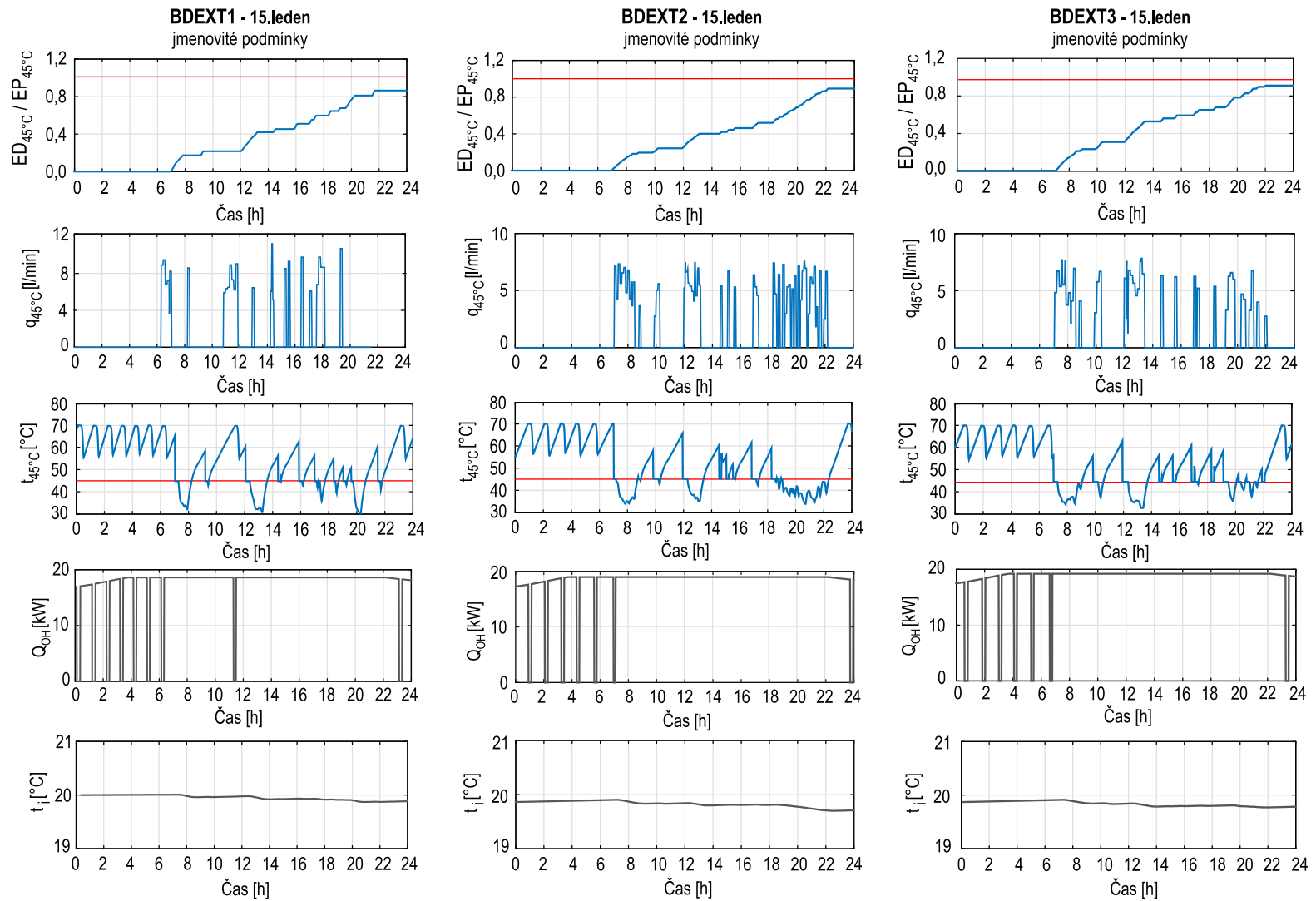


Graf 43 - Charakteristiky teploty v zóně a dodávky TV a výkonu pro IR 20-200 v typických dnech z hlediska přípravy TV

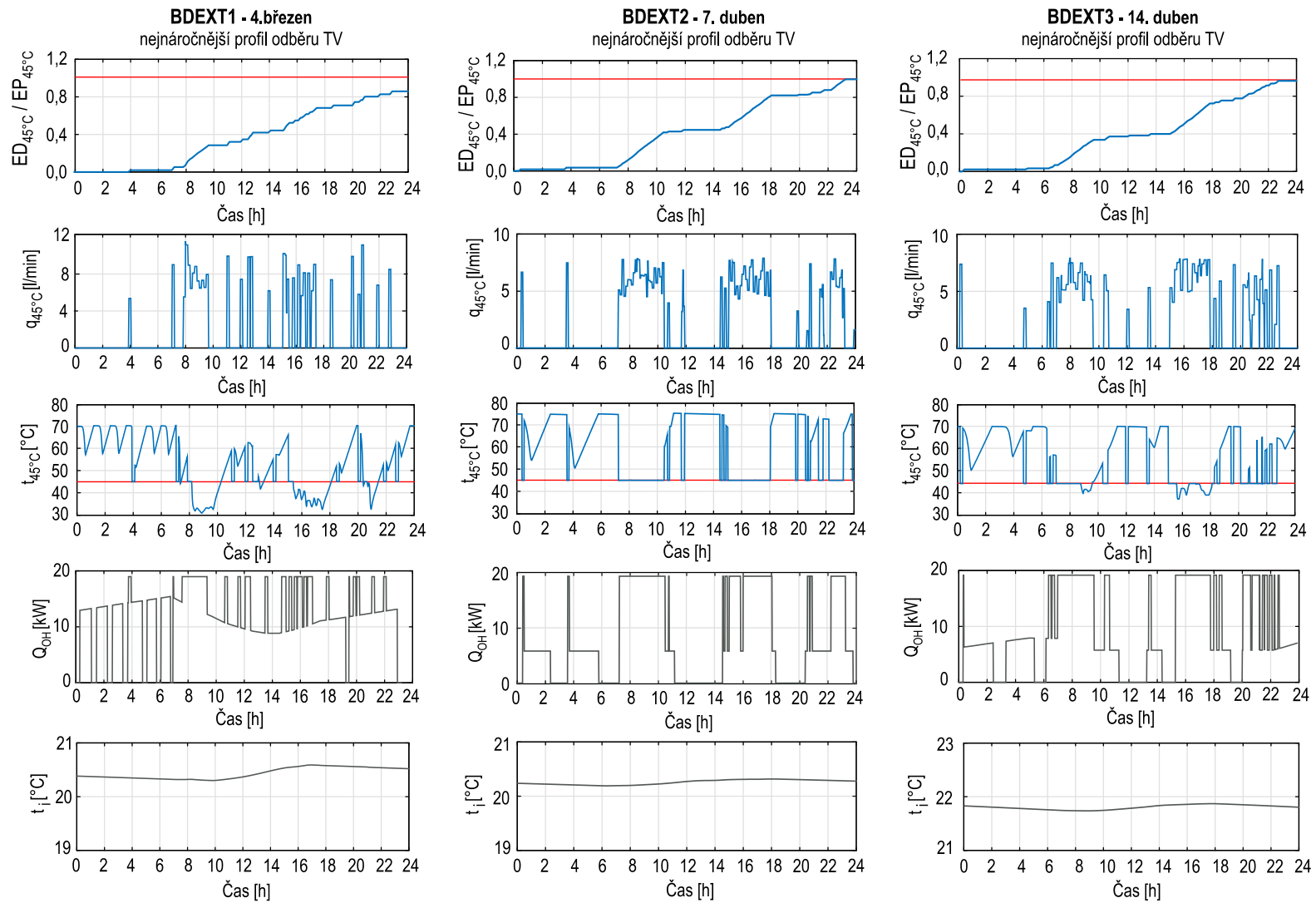
BDREF – ODBĚROVÉ KUMULATIVNÍ CHARAKTERISTIKY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA PŘÍPRAVY TEPLÉ VODY



Graf 44 - Kumulativní charakteristiky dodávky pro IR 20-200 v typické dny z hlediska přípravy TV, ED – skutečně dodaná energie v teplé vodě, EP-požadovaná energie v teplé vodě



Graf 45 - Charakteristiky provozu ohřivače IR 20-200 při jmenovitých podmínkách z hlediska vytápění



Graf 46 - Charakteristiky provozu ohříváče IR 20-200 při výskytu energeticky nejnáročnějších odběrů TV

Test provozní a odběrové charakteristiky při zatížení zátěžovým profilem – roční zhodnocení

Roční zhodnocení je provedeno vyhodnocením úrovně nabití. Okrajové podmínky pro vyhodnocení úrovně nabití jsou uvedeny níže.

Okrajové podmínky

Spínací teplota na termostatu t_{SET} : 65 °C

Požadovaná teplota teplé vody t_{TV} : 45 °C

Intervaly

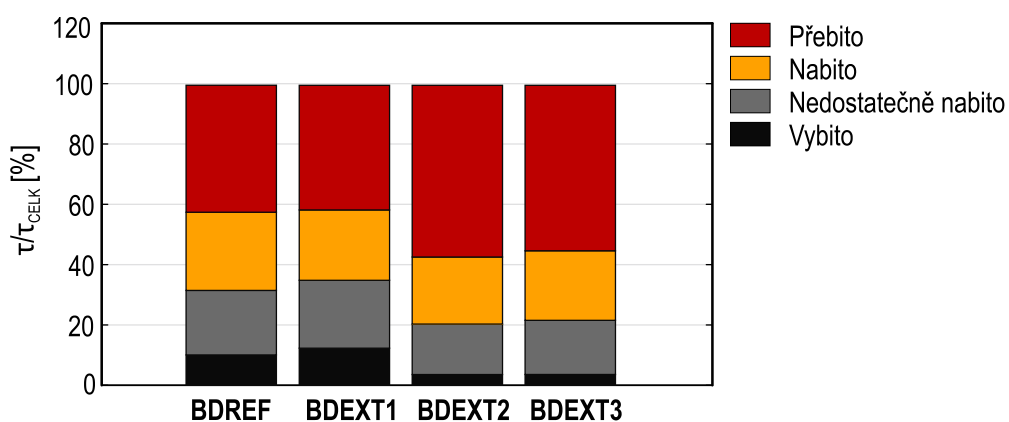
Přebito $t_{SET} \geq 55$ °C

Nabito 45 °C $\leq t_{SET} < 55$ °C

Nedostatečně nabito 35 °C $\leq t_{SET} < 45$ °C

Vybito $t_{SET} < 35$ °C

Dosažené výsledky jsou zobrazeny na Grafu 47 níže v procentuálním vyjádření. Procentuální vyjádření představuje dobu trvání daného stavu (přebito, nabito, nedostatečně nabito, vybito) během odběrů teplé vody v roce vztaženou k celkové době, kdy byla teplá voda během roku z ohříváče odebírána. Z grafu je patrné, že profil s největší četností výskytu stavu vybito je profil BDEXT1, pro který jsou charakteristické časově náročné odběry s průměrnou délkou trvání 10 minut. Profily BDEXT2 a BDEXT3 mají nejnižší četnost výskytu stavu vybito i přes skutečnost, že při nich bylo v celkovém součtu odebráno větší množství vody než při zbylých profilech. To ukazuje na fakt, že z hlediska hodnocení odběrů teplé vody není rozhodující pouze celkové množství odebrané teplé vody, ale také časové rozložení odběrů, jejich délka a odebíraný průtok.



Graf 47 - Rozložení úrovně nabití ohříváče IR 20-200 během všech odběrů teplé vody

8.3 Výsledky pro scénář C: ohřivač IR 32-380 v mycím centru

Parametrická studie optimálního nastavení

Použité kombinace pro parametrickou studii jsou shrnuty v Tabulce 19 níže. Pro každou z uvedených kombinací byla provedena roční simulace provozu s krokem 1 minuta. Simulace proběhla pro referenční nastavení shrnuté v kapitole 6.3. Pro simulaci byl použit referenční zátěžový profil teplé vody uvedený na straně 84 v této kapitole. Výpočet počtu startů za rok, souvislé doby chodu a ukazatelů splnění požadavků viz Příloha 4. Na základě výsledků roční simulace v Tabulce 19 byla jako optimální varianta zvolena kombinace 65 °C a 2 K hystereze, protože při ní byly splněny jak požadavky na dodávku teplé vody, tak na vytápění.

Tabulka 19 – Výsledky parametrické studie

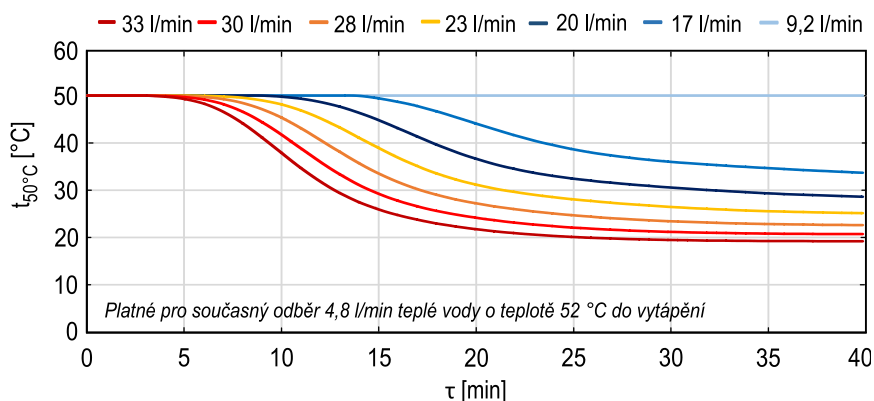
Termostat 0,7.H	Spínací teplota	60 °C			65 °C		
	Hystereze	2	10	15	2	10	15
Počet startů za rok		4743	3694	3301	4367	3404	3092
Maximální souvislá doba chodu [min]		60	77	84	68	87	96
Průměrná souvislá doba chodu [min]		26	34	38	27	38	41
Minimální souvislá doba chodu [min]		7	10	13	10	15	17
Stavy, kdy splněny požadavky na TV [%] ¹⁾		99	97	96	100	99	99
Stavy, kdy splněny požadavky na vytápění [%] ²⁾		100	100	100	100	100	100

1) tzn. kdy dodán požadovaný průtok o teplotě t_{sm} ($45 \pm 0,5$) °C, vztaženo k celkovému požadovanému objemu o teplotě 45 °C za rok

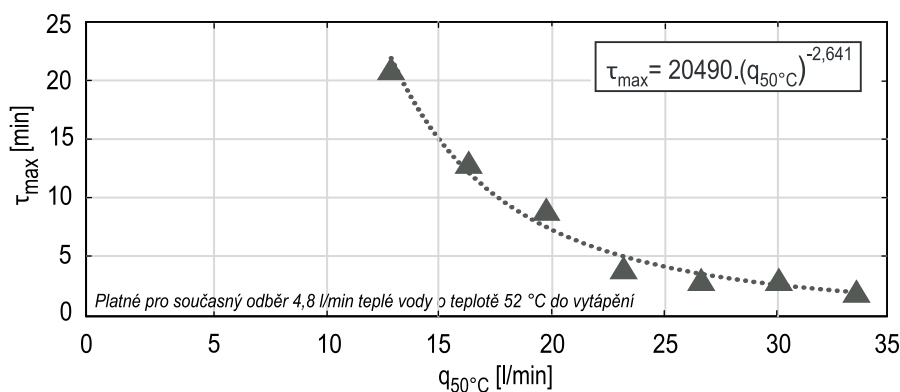
2) kdy teplota v zóně udržena na požadovaných t_i ($20 \pm 0,5$) °C, vztaženo k počtu hodin otopného období

Test odběrové charakteristiky při zatížení jednorázovým odběrem, hledání limitu použití ohřivače

Test odběrové charakteristiky proběhl shodným způsobem jako u předchozího scénáře, tzn. nepřerušovaným odběrem a s aktivním zdrojem tepla. Ohřivač musí během testu dodávat trvale průtok do vytápění současně s dodávkou trvalého průtoku teplé vody na odběrná místa. Simulace proběhla pro ohřivač zapojený v základním numerickém modelu popsaném v kapitole 5. Testování probíhalo ze stavu plně nabitého ohřivače. Požadovaná teplota teplé vody dodávané na odběrná místa byla 50 °C, teplota přívodní studené vody byla nastavena na 5 °C. Jmenovitý průtok pro vytápění buňky pro zaměstnance je 285 kg/h, tzn. 4,8 l/min, návrhová teplota přívodní vody do vytápění je 52 °C. Na Grafu 48 jsou zobrazeny výsledky testu odběrové charakteristiky pro zvolené průtoky. Při současné dodávce průtoku 4,8 l/min vody o teplotě 52 °C do vytápění je ohřivač schopen na odběrná místa teplé vody **trvale** dodávat průtok 9,2 l/min vody o teplotě 50 °C. Odběrová špička o průtoku 33 l/min může dle výsledků trvat maximálně 5 minut, než dojde k poklesu teplé vody pod požadovaných 50 °C. Závislost maximální možné délky trvání odběrové špičky na trvalém průtoku je zobrazena na Grafu 49.



Graf 48 – Test odběrové charakteristiky ohřivače IR 32-380



Graf 49 - Maximální možná doba trvání odběrových špiček v závislosti na odebíraném průtoku

Parametry systému přípravy teplé vody a referenční odběrový profil teplé vody

Referenční odběrový profil teplé vody AMREF byl vygenerován programem DHWcalc. Uvažovaná propustnost mycích boxů je 60 vozidel za den celkem, přičemž referenční spotřeba teplé vody je stanovena na 55 l / vozidlo. Z toho vychází celková spotřeba teplé vody v hodnotě 3 300 l/den. Pro účely této práce byla požadovaná teplota po smísení stanovena na 50 °C pro celý mycí cyklus. Pro víkendy bylo uvažováno s 20 % navýšením celkového odebraného množství teplé vody oproti pracovnímu týdnu. Je uvažováno, že je myčka v provozu nepřetržitě během celého dne. Rozložení odběrů je rovnoměrné bez odběrových špiček podle Tabulky 21. Vygenerované odběrové profily jsou k práci přiloženy ve formátu .txt na CD. Zátěžové profily AMEXT1, AMEXT2 a AMEXT3 byly generovány pro stejné rozložení odběrů jako AMREF, změnily se pouze charakteristiky průměrného průtoku, doby trvání odběru nebo průměrné spotřeby teplé vody podle Tabulky 20.

Tabulka 20 - Charakteristiky zátěžových profilů AMREF, AMEXT1, AMEXT2, AMEXT3

Zátěžový profil	AMREF	AMEXT1	AMEXT2	AMEXT3
Průměrná spotřeba TV (50 °C) celkem	3300 l/den	3300 l/den	3300 l/den	5300 l/den
Průměrný průtok [l/min]	6,7	6,7	10	10
Průměrná doba trvání odběru [min]	8	10	10	20
Max. možný průtok [l/min]	6,7	6,7	20	20

Tabulka 21 – Charakteristiky rozdělení odběrů v profilu AMREFTV, pro teplotu 50 °C

Pracovní dny	Odebráno z celkové denní spotřeby
22:00-06:30	17 %
06:30-07:30	17 %
07:30-12:00	17 %
12:00-13:00	17 %
13:00-18:00	17 %
18:00-22:00	15 %
Víkendy	Odebráno z celkové denní spotřeby
23:00-07:00	17 %
07:00-09:00	17 %
09:00-15:00	17 %
15:00-17:00	17 %
17:00-20:00	17 %
20:00-23:00	15 %

Na Grafu 50 jsou zobrazeny provozní a odběrové charakteristiky ohřívače IR 32-380 při zatížení profilem AMREF. Charakteristiky jsou zobrazeny pro vybrané typické dny z hlediska vytápění, tzn. pro den, kdy se z hlediska vytápění vyskytly jmenovité podmínky, pro běžný den z hlediska vytápění a pro den mimo otopné období. Vzhledem k předpokladu trvale vysokého zatížení i přes letní období nebyla pro ohřívač navržena modulace výkonu, takže je z grafů dodávky výkonu patrné, že v případě potřeby je vždy dodán jmenovitý výkon. Ohřívač požadavek na dodávku splnil ve všech případech. Požadavek na teplotu v zóně v otopném období byl dodržen. Z kumulativního vyjádření dodávky energie v teplé vodě na Grafu 51 je patrné, že sestavený odběrový profil je rovnoměrný bez odběrových špiček, což je zásadní rozdíl oproti charakteru odběrů v rodinném nebo bytovém domě.

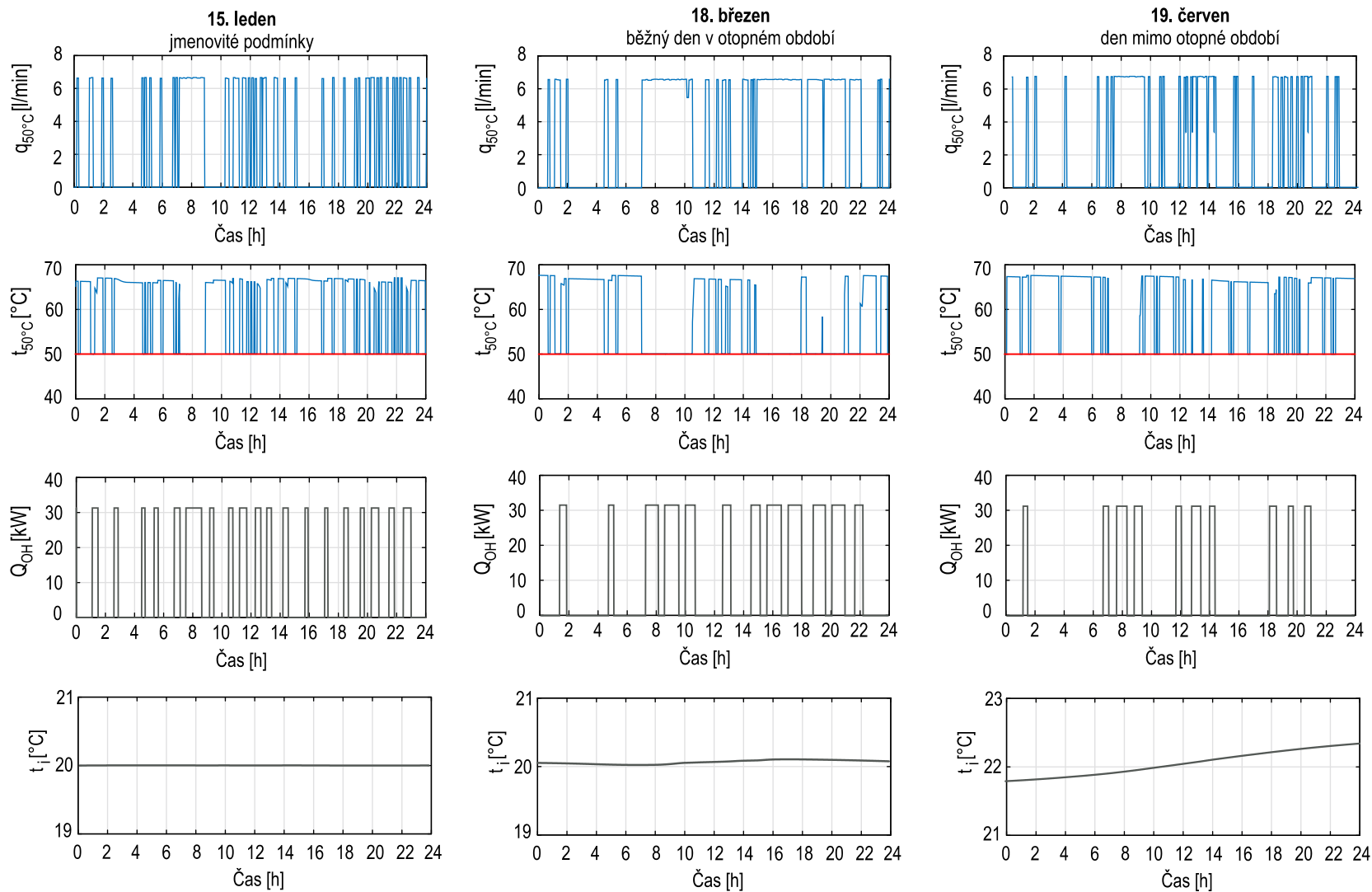
Na Grafu 51 jsou zobrazeny provozní a odběrové charakteristiky ohřívače pro vybrané typické dny z hlediska přípravy teplé vody, tzn. dny kdy se vyskytl energeticky nejnáročnější, běžný a nejlehčí profil odběru. Opět je patrné, že se nevyskytl problém s dodávkou teplé vody o požadované teplotě nebo udržení požadované teploty v zóně. Ohřívač spíná méně často než v případě ohřívače v rodinném domě a to i přes vyšší četnost odběrů. Menší potřeba spínání může být způsobena větším objemem ohřívače udržovaným na vyšší teplotě, který je schopen méně náročné odběry teplé vody pokrýt bez nutnosti spínat. Z kumulativního vyjádření na Grafu 53 je patrné, že ohřívač byl schopen splnit požadavek na dodávku energie ve všech vybraných typických dnech.

Na Grafu 54 jsou zobrazeny provozní a odběrové charakteristiky ohřívače při zatížení profily AMEXT1, AMEXT2 a AMEXT3, které byly záměrně navrženy náročnější než profil AMREF. Ohřívač nemá problém se splněním požadavku na dodávku při zatížení profilem AMEXT1. Profil AMEXT1 je shodný s profilem AMREF co se týče průměrného odebíraného průtoku, ale liší se v průměrných dobách trvání odběrů. Průměrná doba trvání odběrů byla v případě profilu AMEXT1 navýšena o 2 minuty oproti profilu AMREF. Toto navýšení se na změně provozní a odběrové charakteristiky neprojevovalo.

V profilu AMEXT2 byl kromě průměrné doby trvání odběru navýšen také průměrný odebíraný průtok teplé vody, což už se negativně projevilo na schopnosti ohřívače splnit dodávku teplé vody. Kritické jsou zejména odběry teplé vody s dobou trvání přes 30 minut a s průtokem teplé vody nad 10 l/min. Na teplotě v zóně se snížení teploty dodávané teplé vody žádným způsobem neprojevovalo ani v případě jmenovitých podmínek z hlediska vytápění.

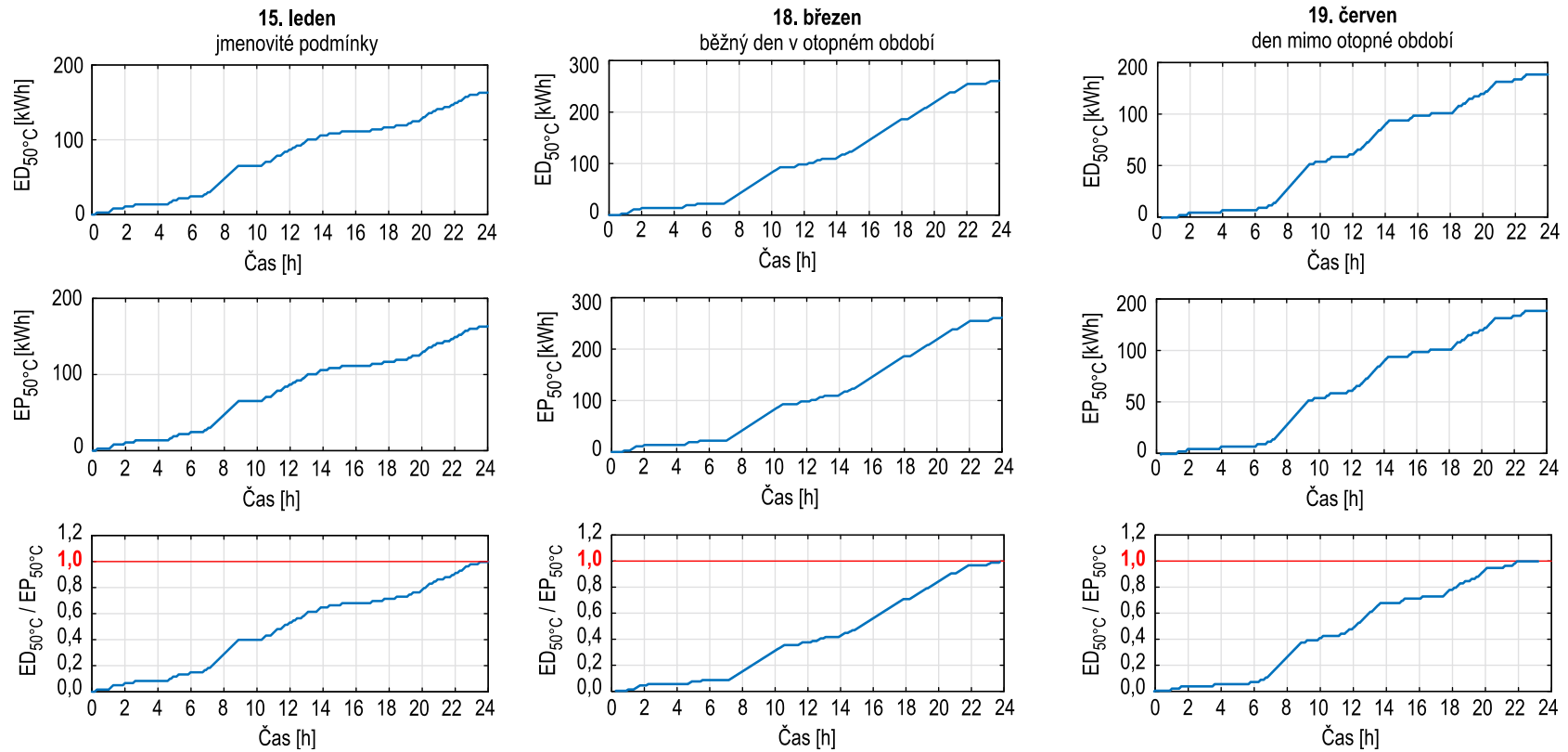
V profilu AMEXT3 došlo k navýšení průměrného odebíraného množství teplé vody za den, k navýšení odebíraného průtoku a doby trvání odběrů, tudíž představuje nejnáročnější profil odběru teplé vody z celé sady.

AMREF – ODBĚROVÉ A PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA VYTÁPĚNÍ



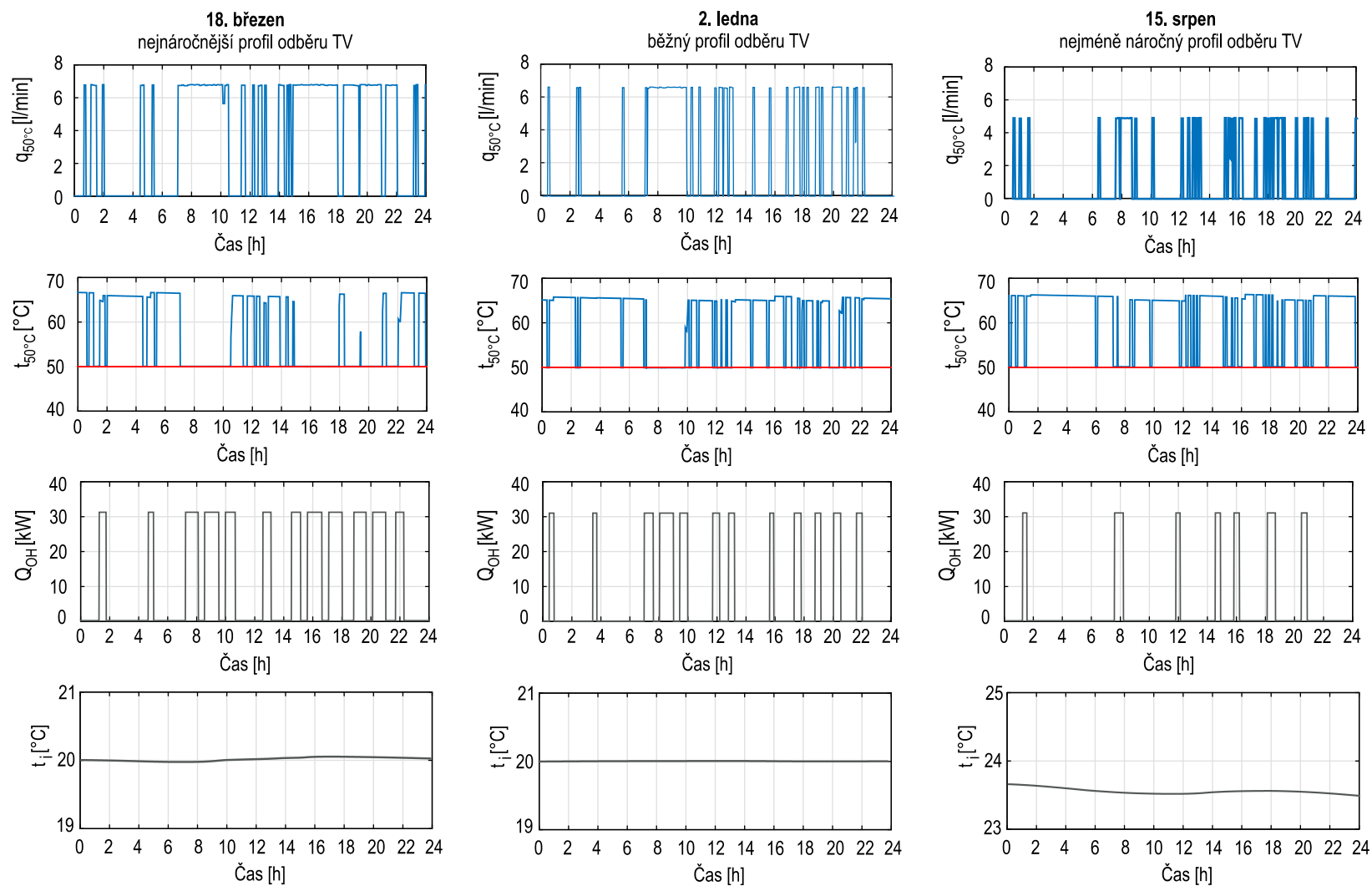
Graf 50 - Charakteristiky teploty v zóně a dodávky TV a výkonu pro ohříváč IR 32-380

AMREF – ODBĚROVÉ KUMULATIVNÍ CHARAKTERISTIKY TEPLÉ VODY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA VYTÁPĚNÍ



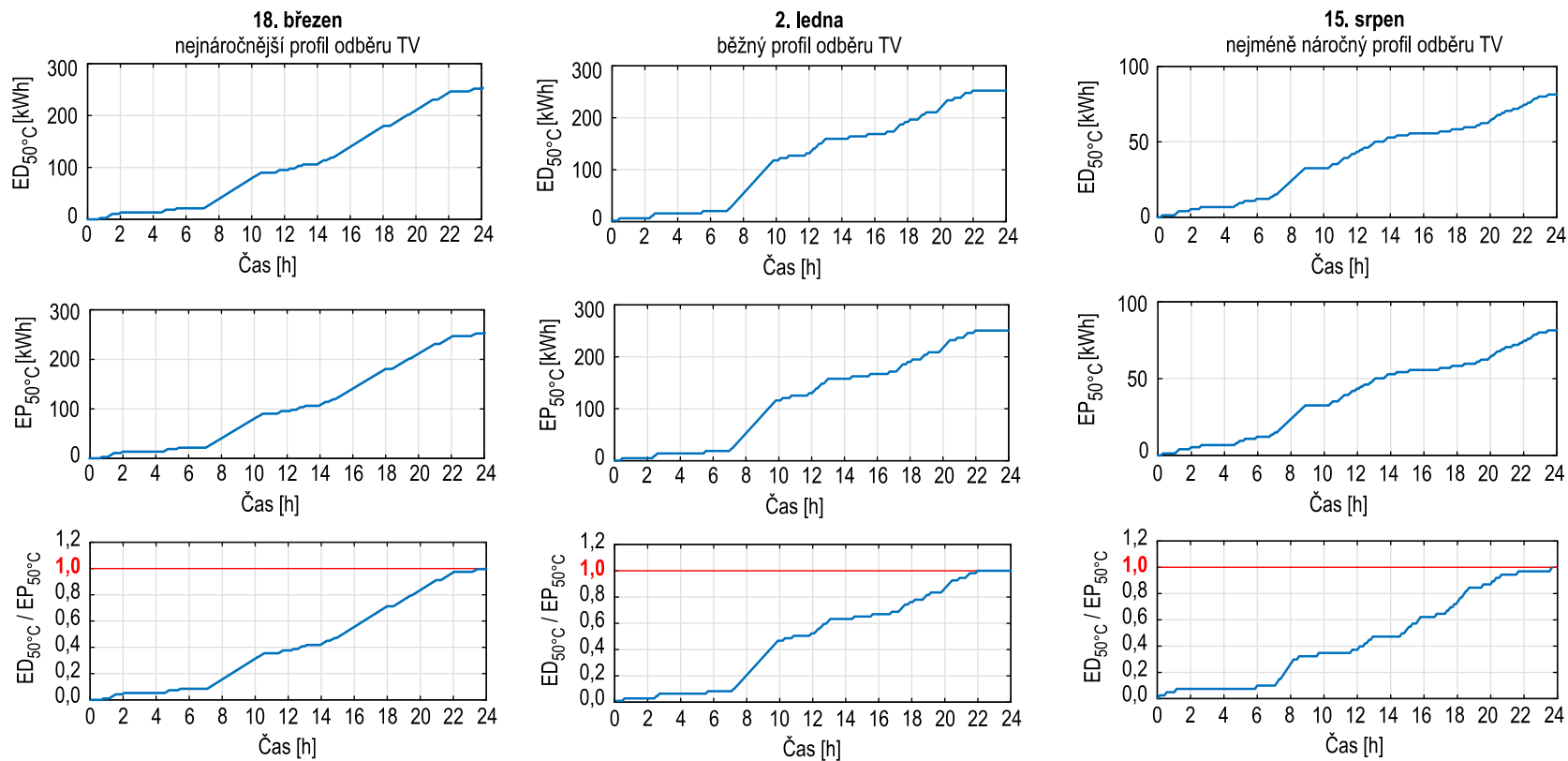
Graf 51 - Kumulativní charakteristiky dodávky TV pro IR 32-380 v typických dnech z hlediska vytápění, ED-skutečně dodaná energie v teplé vodě, EP – požadovaná energie v teplé vodě

AMREF – ODBĚROVÉ A PROVOZNÍ CHARAKTERISTIKY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA PŘÍPRAVY TV

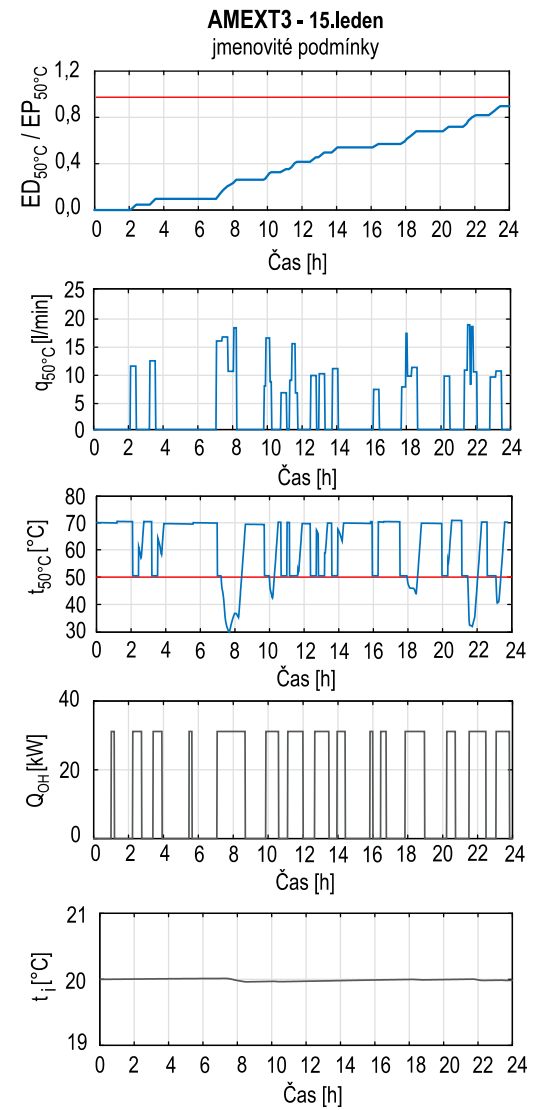
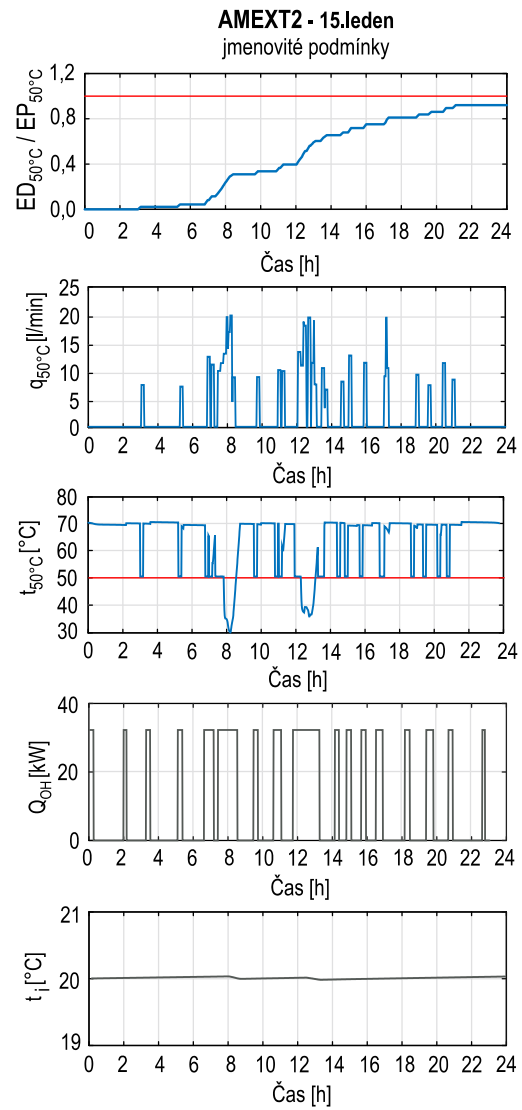
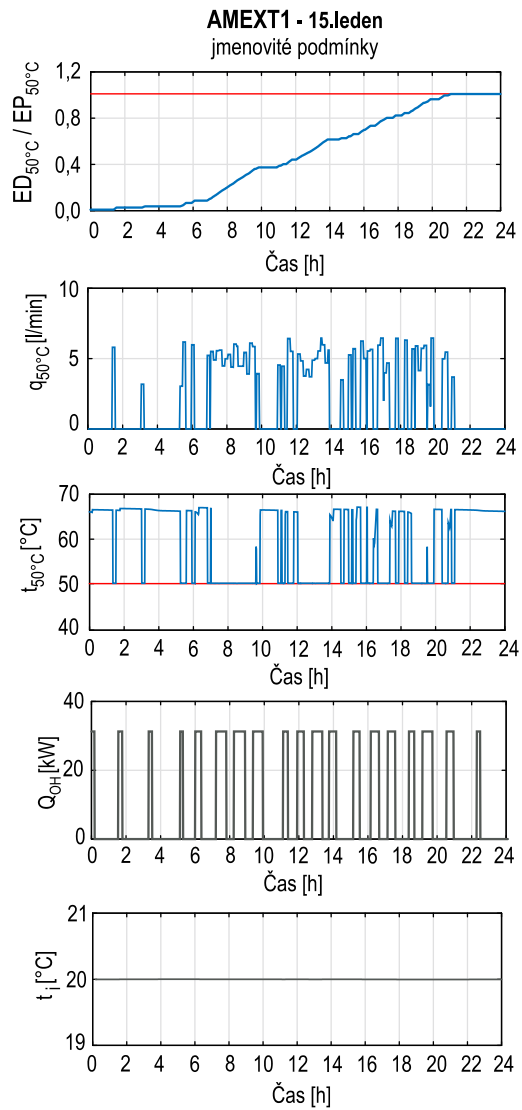


Graf 52 - Charakteristiky teploty v zóně a dodávky TV a výkonu pro IR 32-380 v typických dnech z hlediska přípravy TV

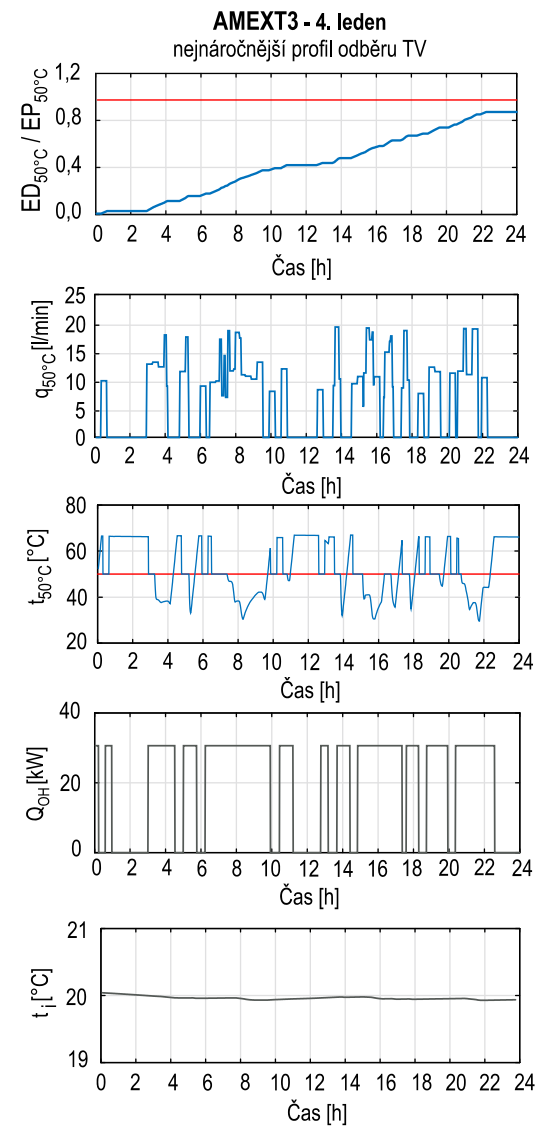
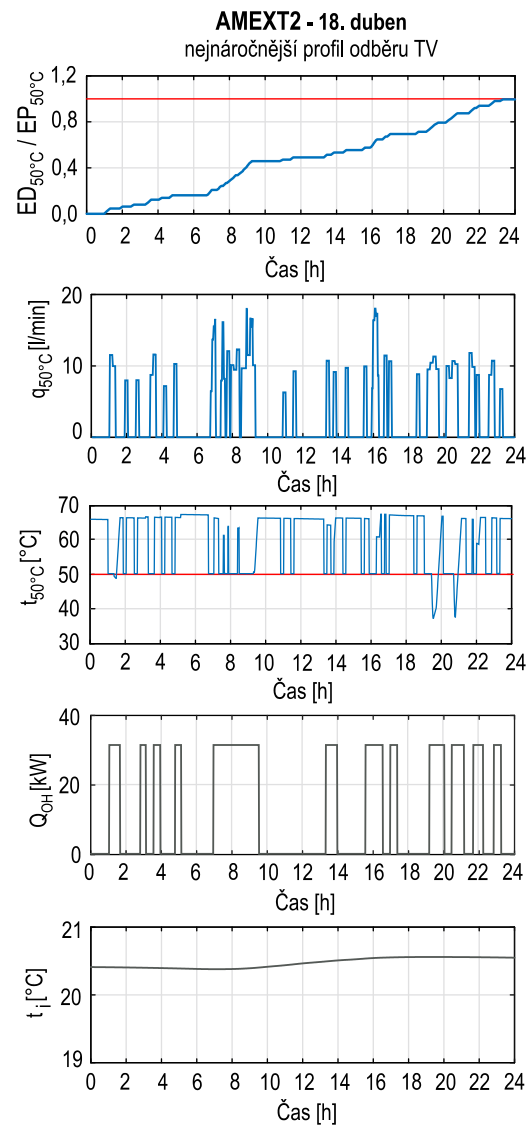
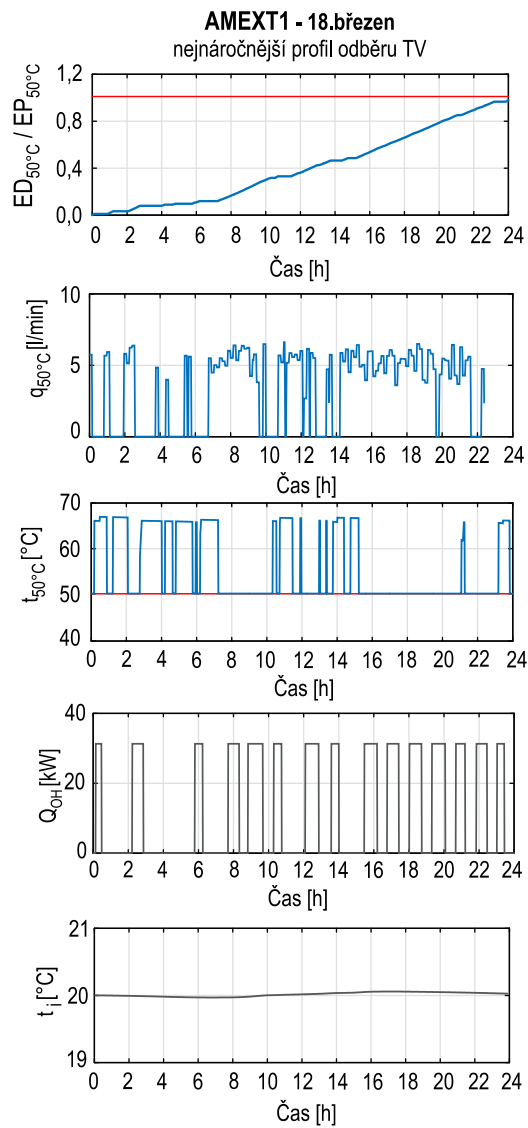
AMREF – ODBĚROVÉ KUMULATIVNÍ CHARAKTERISTIKY PRO TYPICKÉ DNY Z HLEDISKA PŘÍPRAVY TEPLÉ VODY



Graf 53 - Kumulativní charakteristiky dodávky pro IR 32-380 v typické dny z hlediska přípravy TV, ED – skutečně dodaná energie v teplé vodě, EP-požadovaná energie v teplé vodě



Graf 54 - Charakteristiky provozu ohřivače IR 32-380 při jmenovitých podmínkách z hlediska vytápění



Graf 55 - Charakteristiky provozu ohřivače IR 32-380 při výskytu energeticky nejnáročnějších odběrů TV

Test provozní a odběrové charakteristiky při zatížení zátěžovým profilem – roční zhodnocení

Roční zhodnocení je provedeno vyhodnocením úrovně nabití. Okrajové podmínky pro vyhodnocení úrovně nabití se od předchozích případů vzhledem k vyšší požadované teplotě na odběrných místech liší.

Okrajové podmínky

Spínací teplota na termostatu t_{SET} : 65 °C

Požadovaná teplota teplé vody t_{TV} : 50 °C

Intervaly

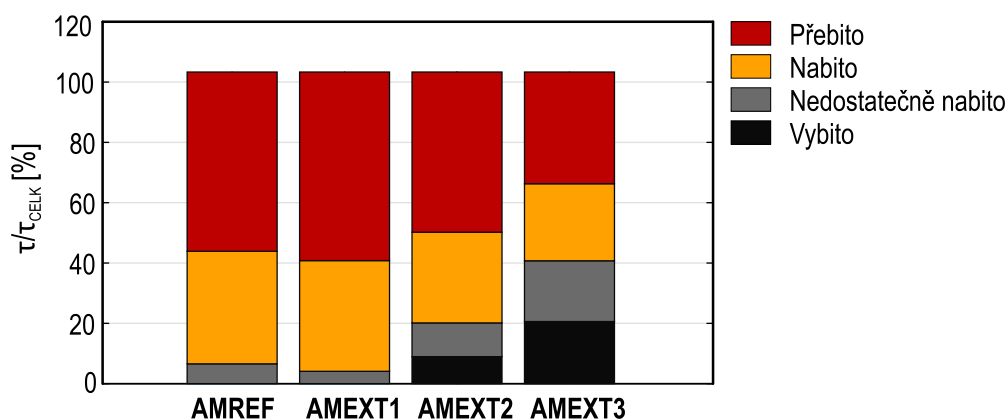
Přebito $t_{SET} \geq 65$ °C

Nabito 50 °C $\leq t_{SET} < 65$ °C

Nedostatečně nabito 40 °C $\leq t_{SET} < 50$ °C

Vybíto $t_{SET} < 40$ °C

Dosažené výsledky jsou zobrazeny na Grafu 56 níže v procentuálním vyjádření. Jak je patrné z grafu, ohřivač nemá problém splnit dodávku teplé vody v případě zatížení odběrovým profilem AMREF a AMEXT1, ve kterých se vyskytují odběry o průměrné době trvání 8, resp. 10 minut a průměrném průtoku 6,7 l/min. V těchto profilech nikdy nedošlo k úplnému vybití kapacity ohřivače a ve stavu nedostatečně nabito se ohřivač nacházel pouze ve velmi malém procentu odběrů. Odběry o průměrném průtoku 10 l/min a průměrné délce trvání 10, resp. 20 minut, které se vyskytují v zátěžových profilech AMEXT2 a AMEXT3 představují pro ohřivač vyšší zatížení. Vysoká četnost výskytu stavu vybití ohřivače během odběru teplé vody je patrná zejména u profilu AMEXT3, ve kterém se vyskytují odběry o průměrné době trvání 20 minut.



Graf 56 - Rozložení úrovně nabití ohřivače IR 32-380 během všech odběrů teplé vody

9 Diskuse

Za účelem analýzy provozních a odběrových charakteristik přímo ohřivaných zásobníků instalovaných v kombinovaných systémech přípravy teplé vody a vytápění byly sestaveny a simulovány tři scénáře. Scénář A představoval správně navržený ohřivač provozovaný v rodinném domě, scénář B byl modelovým příkladem chybně navrženého ohřivače pro bytový dům a scénář C představoval správně navržený ohřivač používaný v modulárních mycích boxech.

Ve scénáři A byl simulován ohřivač IR 12-160 jmenovitým výkonu 11,7 kW a o užitém objemu 160 litrů provozovaný v rodinném domě o jmenovité tepelné ztrátě 4,6 kW. Poměr potřebného výkonu pro přípravu teplé vody a pro vytápění za jmenovitých podmínek byl 1,4. Pro ohřivač byla provedena parametrická studie optimálního nastavení. Bylo zjištěno, že nejmenšího množství startů za rok a nejdelší průměrné souvislé doby chodu se dosáhne, pokud je nastavena nejvyšší možná nastavitelná hodnota hystereze, tzn. 15 K. Z hlediska spínací teploty bylo zjištěno, že nastavení vyšší spínací teploty vede ke snížení počtu startů za rok a k prodloužení průměrné souvislé doby chodu ohřivače. Udržování vyšší teploty v ohřivači ke zvýšení pohotovostní kapacity a k lepší schopnosti pokrytí náročnějších odběrů. Zároveň ale vede k navýšení tepelných ztrát z ohřivače do okolí. Dále byl proveden test jednorázového zatížení ohřivače a byly hledány limity jeho použití. Pro test byly použity průtoky teplé vody typické pro rodinné domy, z hlediska vytápění byly uvažovány jmenovité podmínky, tzn. dodávka 6,7 l/min vody o teplotě 52 °C do primárního okruhu vytápění. Z testu bylo zjištěno, že s požadavkem na dodávku vyššího průtoku teplé vody na odběrná místa klesá doba, po kterou je ohřivač schopen tuto dodávku splnit. Výslednou závislost maximální možné doby trvání průtoku do poklesu teploty teplé vody pod požadovanou hodnotu lze aproximovat klesající mocninnou funkcí. Z testu odběrovým profilem teplé vody vyplynulo, že z hlediska zatížení ohřivače nejsou rozhodující krátké odběry (do 5 minut) o malých průtocích (do 5 l/min) a to ani v případě, že probíhají v rychlém sledu za sebou. Problémy s dodávkou teplé vody o požadované teplotě nastávaly výhradně v případě dlouhotrvajících odběrů o vysokém průtoku (nad 10 minut o průtoku nad 10 l/min).

Ve scénáři B byl simulován ohřivač IR 20-200 o jmenovitým výkonu 19,7 kW a užitém objemu 200 litrů provozovaný v bytovém domě o jmenovité tepelné ztrátě 16,7 kW. Poměr potřebného výkonu pro přípravu teplé vody a vytápění byl 0,85, tzn. náročnějším systémem byl systém vytápění. Scénář B byl sestaven jako modelový případ projekční chyby, což se výrazným způsobem projevilo na provozní charakteristice simulovaného ohřivače. Požadavek na pokrytí vysoké tepelné ztráty připojeného objektu způsobil, že ohřivač neměl kapacitu na splnění dodávky energie pro přípravu teplé vody. Z testu jednorázového zatížení trvalým průtokem vyplývá, že ohřivač by byl schopen splnit pouze dodávku teplé vody ekvivalentní k dodávce v případě scénáře A v rodinném domě. Například odběrová špička o průtoku 20 l/min by za daných podmínek z hlediska vytápění nesměla být delší než 10 minut. Po uplynutí této doby by ohřivač dále nebyl schopen tímto průtokem teplou vodu o požadované teplotě dodávat. Přestože se jedná o ohřivač s vyšším výkonem a objemem než v případě scénáře A, vysoké zatížení od systému vytápění způsobilo, že z hlediska kapacity pro dodávku teplé vody není mezi ohřivači z obou scénářů v podstatě rozdíl. Z testu odběrovým profilem je zároveň patrné, že ohřivač má problém nejen s dlouhotrvajícími odběry o vysokém průtoku, ale i s krátkodobými odběry o výrazně menším průtoku, které nastávají v rychlém sledu za sebou. Zajímavým zjištěním je, že neschopnost ohřivače splnit požadavek na dodávku dostatečného množství energie se negativně projevila pouze na systému přípravy teplé vody. Zatímco zde došlo k poklesu teploty dodávané teplé vody pod požadovanou hodnotu, v případě vytápění se krátkodobé snížení teploty dodávané teplé vody výraznějším způsobem neprojevilo na teplotě ve vytápěném prostoru. To je dáno zejména vysokou tepelnou kapacitou budovy. Závěrem pro praktická řešení je skutečnost, že na případné projekční chyby bude více citlivý systém přípravy teplé vody. Pouze v případě budov s velmi malou tepelnou

kapacitou nebo v případě dlouhodobé neschopnosti ohřívače dodat dostatečné množství energie (v řádu hodin) by mohl nastat problém také s udržení požadované teploty ve vytápěném prostoru.

Ve scénáři C byl simulován ohřívač IR 32-380 o jmenovitém výkonu 31,3 kW a užitém objemu 380 litrů provozovaný v modulárních mycích boxech. Připojená buňka pro zaměstnance měla jmenovitou tepelnou ztrátu 3 kW. Poměr potřebného výkonu pro přípravu teplé vody a pro vytápění za jmenovitých podmínek byl 7,7. Scénář C je modelovým případem instalace s extrémními nároky na přípravu teplé vody v porovnání s nároky na vytápění. Charakter odběrového profilu je výrazně odlišný od charakteru odběrů v předchozích dvou scénářích. Pro rodinné domy jsou obecně typické velmi výrazné odběrové špičky, pro bytové domy méně výrazné, ale přesto stále patrné. Pro objekty mycích boxů se jako návrhový stav uvažují odběry bez výraznějších odběrových špiček. Zatížení je dáno počtem mycích boxů a nastavením průtoku v boxech. Z testu jednorázového odběru a z testu zatížení odběrovými profily byly zjištěny podobné trendy v provozních a odběrových charakteristikách jako v případě rodinného domu. Pro ohřívač je možné za daných okrajových podmínek definovat průtok, který je schopen dodávat trvale a dále maximální možnou délku trvání vyšších průtoků. Závislost maximální možné délky trvání odběru na odebíraném průtoku je možné aproximovat mocninnou funkcí stejně jako v případě rodinného a bytového domu. Pro ohřívač nejsou problematické krátké odběry o malém průtoku (do 10 l/min) a to ani v případě, že nastávají rychle po sobě. Stejně jako v případě rodinného domu jsou při hodnocení limitního zatížení rozhodující dlouhotrvající odběry o vysokých průtocích (zde nad 10 l/min s délkou trvání nad 10 minut). Krátkodobé snížení dodávané teploty teplé vody se na teplotě ve vytápěném prostoru neprojevovalo.

10 Závěr

Předmětem diplomové práce byl rozbor charakteristik ohřivačů určených pro instalaci do kombinovaných systémů přípravy teplé vody a vytápění. Zapojení ohřivače v řešeném kombinovaném systému bylo provedeno tak, aby teplou vodu na odběrná místa dodával přímo a teplou vodu pro vytápění nepřímo. Protože se nejedná o tradiční způsob zapojení a nejsou k dispozici podrobná data z laboratorních a provozních měření, bylo hlavním cílem práce provést simulační analýzu provozních a odběrových charakteristik takto zapojených ohřivačů. Pro provedení analýzy byl v simulačním nástroji TRNSYS sestaven numerický model řešeného systému. Kvalita sestavených modelů ohřivačů byla ověřena proti datům z technické dokumentace výrobce.

Simulační analýza byla provedena pro tři scénáře. Scénář A představoval správně navržený ohřivač provozovaný v rodinném domě, scénář B byl modelovým příkladem chybně navrženého ohřivače pro bytový dům a scénář C představoval správně navržený ohřivač používaný v modulárních mycích boxech. Cílem simulační analýzy bylo získat obecnou představu o charakteristikách ohřivačů zapojených do kombinovaného systému a zhodnotit jejich provoz pod různým zatížením. Dále bylo cílem získat odpovědi na následující otázky:

- Jaký charakter zatížení je pro ohřivač kritický a co by mělo být zohledněno při návrhu?
- Jaké faktory mají vliv na provozní a odběrové charakteristiky ?

Z analýzy vyplynulo, že pro všechny ohřivače bez ohledu na simulovaný scénář je z pohledu zatížení kritická doba trvání odběru, odebíraný průtok a požadovaná teplota teplé vody. Pro každé okrajové podmínky zatížení ohřivače je možné definovat průtok, který je ohřivač schopen dodávat trvale. Dále lze určit závislost maximální možné doby trvání odběrových špiček, které je ohřivač schopen splnit, na odebíraném průtoku. Tuto závislost je možné aproximovat mocninnou funkcí. Toto zjištění je přínosem pro případné laboratorní nebo provozní testování ohřivačů. Testování by se mělo zaměřit zatěžování ohřivače různými kombinacemi odebíraných průtoků teplé vody o různé délce trvání a sestavit z nich podrobnější doporučení pro projekční praxi.

Výsledky získané v rámci této práce ukazují, že pro návrh ohřivače není rozhodující celkové množství odebrané teplé vody za den, ale charakter jednotlivých odběrů. Při návrhu by měl být kladen důraz na správný odhad možných provozních stavů na místě instalace a to zejména z pohledu maximálního možného odebíraného průtoku a doby trvání tohoto odběru. Výsledky ukázaly, že využití vybraných ohřivačů v kombinovaném způsobu zapojení s velkou pravděpodobností nebude vhodné pro objekty s vysokou potřebou tepla na vytápění. Řešený způsob zapojení a provozování ohřivače má potenciál pro instalaci v objektech s nízkou potřebou tepla na vytápění. Tento předběžný závěr je nutné potvrdit laboratorním měřením.

Na výsledcích je patrné, že na případnou projekční chybu je více citlivý systém přípravy teplé vody. Zatímco v případě vytápění se krátkodobé snížení teploty dodávané teplé vody díky tepelné kapacitě budovy výrazněji neprojeví na teplotě ve vytápěném prostoru, v případě teplé vody dodávané na odběrná místa bude uživatel pociťovat diskomfort. Je nutné zmínit, že v numerickém modelu nebyla zahrnuta setrvačnost chladnutí otopných ploch v systému vytápění. Vyhodnocování setrvačnosti chladnutí otopných ploch se věnoval například Vavříčka [71], který pro systém teplovodního podlahového vytápění s mokrou pokládkou udává setrvačnost chladnutí v řádu hodin. Při využití tohoto způsobu vytápění by bylo v reálné aplikaci možné po dobu trvání odběrové špičky teplé vody dočasně přestat dodávat tepelnou energii do systému vytápění, orientačně například na 30 až 40 minut, aniž by se toto projevilo na poklesu teploty ve vytápěném prostoru. Stejně tak v případě použití např. trubkových nebo článkových litinových otopných těles, kde by se výpadek dodávky tepelné energie po dobu přibližně 10 až 20 minut zřejmě neprojevilo na poklesu teploty

ve vytápěném prostoru. V případě deskových otopných těles by se jednalo o možnost odstavení systému vytápění na řádově jednotky minut, a sice například od 5 do 10 minut. I toto krátkodobé odstavení dodávky tepelné energie do vytápění by mohlo pomoci zvýšit kapacitu ohřivače pokrýt probíhající odběrovou špičku teplé vody.

Z hlediska faktorů ovlivňujících provozní charakteristiku je zajímavý vliv nastavené spínací teploty a hystereze na spínacím termostatu. Z provedených parametrických studií bylo zjištěno, že v případě rodinného domu ze scénáře A byla optimálním řešením volba vysoké hystereze. Ta neměla vliv na uživatelský komfort dodávky teplé vody. Naopak v případě scénáře C musela být zvolena nejmenší možná nastavitelná hystereze z rozsahu udávaného výrobcem. V případě volby vyšší hystereze došlo v případě scénáře C v několika případech k dodávce vody o nižší než požadované teplotě. Scénář A byl modelovým případem odběrových profilů rodinného domu, tedy krátkých odběrů přes den a zpravidla dvou odběrových špiček ráno a večer, scénář C byl modelovým případem odběrových profilů nebytového objektu s dlouhotrvajícími odběry a bez odběrových špiček. Ze získaných výsledků v rámci provedených simulací je patrné, že s narůstající náročností odběrového profilu bude zřejmě nutné snižovat nastavenou hysterezi a zvyšovat nastavenou spínací teplotu. Výrobce v manuálu uvádí pouze rozsah nastavení hystereze a spínací teploty termostatu bez doporučení, jaké kombinace je v jakých případech vhodné volit. Případná navazující laboratorní měření by se mohla podrobněji věnovat vlivu nastavení hystereze a spínací teploty na skutečnou provozní a odběrovou charakteristiku a sestavit z nich doporučení pro praxi. Mohla by například doporučit vhodný rozsah nastavení v závislosti na odběrovém profilu na dané instalaci – například vhodná nastavení pro typické odběry v rodinném a bytovém domě nebo v administrativní budově.

Co se týče vlivu nastavení spínací teploty na termostatu na provozní a odběrovou charakteristiku, byly v rámci simulačních řešení záměrně voleny relativně nízké teploty. Vyšší nastavení spínací teploty na termostatu by sice vedlo ke zvýšení kapacity ohřivače splnit odběrový profil teplé vody, ale vybrané ohřivače jsou kondenzační a měly by mít možnost pracovat v kondenzačním režimu. Ze stejného důvodu bylo pro všechny tři objekty navrženo podlahové vytápění, u kterého se předpokládá dostatečně nízká teplota vratné vody do ohřivače. Charakteristiky spojené s prací v kondenzačním režimu nebylo v rámci simulací možné vyhodnocovat a bylo by přínosné se jim podrobněji věnovat v rámci laboratorních měření.

Zásadním faktorem, který se promítá do provozních a odběrových charakteristik a je nutné jej na závěr zmínit, je regulační strategie zvolená pro regulaci výkonu ohřivače a tepelného příkonu do připojené budovy. Nevhodně zvolená regulační strategie negativně ovlivní provozní a odběrové charakteristiky. Co se týče optimalizace přípravy teplé vody z hlediska regulace, přínosem by mohlo být využití prediktivní regulace a řízení spínání zdroje tepla ve vazbě na očekávanou velikost odebíraného průtoku a dobu trvání odběru teplé vody

Diplomová práce rozšiřuje současný stav poznání o zapojení a provozu přímo ohříváných zásobníků teplé vody v kombinovaných systémech o nové souvislosti. Poznatky shrnuté v rešeršní části práce a simulační analýza provedená v praktické části práce budou využity jako podkladová studie pro navazující laboratorní měření. Jednou z nejdůležitějších informací, která vyplynula z provedených simulací je skutečnost, že na provozní i odběrovou charakteristiku ohřivače má zásadní vliv charakter odběrového profilu teplé vody. Toto by v budoucích laboratorních měřeních mělo být zohledněno a volba odběrového profilu teplé vody použitého pro měření by měla být podrobně zdůvodněna. Jak bylo ukázáno v praktické části práce, složení odběrového profilu z hlediska použitého průtoku a doby trvání dílčích odběrů má zásadní vliv na dosažené výsledky. Numerický model sestavený v rámci praktické části práce je přínosem pro budoucí výzkum. Model je možné kalibrovat podle laboratorních měření a následně využívat k dalším simulacím. S využitím kalibrovaného modelu a laboratorních měření bude možné sestavit konkrétní doporučení pro projekční praxi a provoz ohřivačů na reálných instalacích.

Bibliografie

- [1] M. Pomianowski, H. Johra, A. Marszal-Pomianowska a Z. Zhang, „Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review,“ ScienceDirect, 2020. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109900>
- [2] N. Bertelsen a B. Vad Mathiesen, „EU-28 Residential Heat Supply and Consumption,“ 2020. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en13081894>
- [3] D. Ivanko, H. T. Walnum a N. Nord, „Development and analysis of hourly DHW heat use profiles in nursing homes in Norway,“ 2020. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110070>
- [4] Alberta Municipal Affairs – Safety Services, „STANDATA : P/G-08-02-PLBG/GAS Requirements for combination heating systems: dual purpose water (potable) heater (combo unit),“ 2012. [Online]. Dostupné z: <https://open.alberta.ca/dataset/42295e2f-cf70-44e4-bac9-7a027c4a0c5e/resource/7a4e0113-ec12-41b3-bd31-86160c7a350c/download/2012-p-g-08-02-rev3.pdf>
- [5] R. Prybysh, B. Fleck, M. Al-Hussein a S. Flemming, „Experimental study of the performance of residential buildings utilizing potable water as a hydronic medium,“ 2017. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.12.016>
- [6] Ministerstvo průmyslu a obchodu, „Vnitrostátní plán České republiky v oblasti energetiky a klimatu,“ 2020. [Online]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/2020/1/Vnitrostani-plan-CR-v-oblasti-energetiky-a-klimatu_final.docx
- [7] Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, „Hydrogen Roadmap Europe,“ 2019. [Online]. Dostupné z: <https://op.europa.eu/s/pjJ7>
- [8] B. Qiu, D. Bi, L. Dou, X. Zeng a C. Yang, „Storage gas water heater“. USA Patent US 9,568,213 B2, 2017.
- [9] A. Abdel-Rehim, Y. Cheng a L. N. Chanasyk, „Water heater and method of operating“. USA Patent US 8,763,564 B2, 1 2014, červen.
- [10] R. O. Knoepfel, J. Yin a C. Edington, „Dual input water heater“. USA Patent US 2019 / 0242620 A1, 8. srpen 2019.
- [11] P. Pescatore, „Development of a Market Optimized Condensing Gas Water Heater,“ Office of Scientific and Technical Information, 2006. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.2172/885431>
- [12] F. Schiro a A. Stoppato, „Experimental investigation of emissions and flame stability for steel and metal fiber cylindrical premixed burners,“ 2019. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1500556>
- [13] W. F. Raleigh, „Premix Burners – Technology Advancement and Engineering Challenge,“ National Technical Conference, 2008. [Online]. Dostupné z: https://www.asge-national.org/wp-content/uploads/2017/09/Premix_Burners.pdf

- [14] G. Berthold, „Gas Burner Technology & Gas Burner Design for Application,“ 2011. [Online]. Dostupné: https://www.asge-national.org/wp-content/uploads/2017/09/7BurnerTechnology-ASGE2011-Worgas-G_Berthold.pdf
- [15] Firemní materiály Quantum a.s, „Technická specifikace ohřivače řady IR,“ 2021. [Online]. Dostupné z: https://www.quantumas.cz/files/ckeditor/ohrivace/Q7-IR/IR_bez_Q7/Innovo_specifikace_IR_5-17pdf.pdf
- [16] R. K. Cheng, „Ultralean Low Swirl Burner“. USA Patent 5735681, 7 březen 1998.
- [17] A. Huber a W. Polifke, „Dynamics of practical premixed flames, part II: identification and interpretation of CFD data,“ Sage Journal, 2008. [Online]. Dostupné z: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1260/175682709788707440>
- [18] D. T. Yegian a R. K. Cheng, „Development of a Lean Premixed Low-Swirl Burner for Low NOx Practical Applications,“ 2007. [Online]. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1080/00102209808952088>
- [19] V. H. Rapp, R. K. Cheng a P. L. Therkels, „A high turndown, ultra low emission low swirl burner for natural gas, on-demand water heaters,“ Energy Storage and Distributed Resources Division, 2017. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.2172/1363643>
- [20] D. A. George, „Combustion and Burner Systems Technology,“ 2013. [Online]. Dostupné z: https://ashraesn.com/images/meeting/010813/Power_Point/ashrae_southern_nevada_presentation_2013.pdf
- [21] D. R. Maiello, D. S. Gambiana a B. L. Blankenship, „Apparatus and method for modulating burner controller“. USA Patent US 2010/0112500 A1, 6 duben 2010.
- [22] J. C. Smelcer, „Modulating burner“. USA Patent US 10208953 B2, 19 leden 2019.
- [23] Fotis BC – Firemní materiály, „Dual Function Hot Water Tank,“ 2019. [Online]. Dostupné z: https://www.cdn.fortisbc.com/libraries/docs/default-source/build-renoventate/salesheets_dual_function_hot_water_tank.pdf
- [24] AO Smith – Firemní materiály, „Theta Dual Service,“ 2015. [Online]. Dostupné z: https://aosmithinternational.com/downloads/en/Instruction-manual_Theta-Dual-Service_NL_BENL_UK.pdf
- [25] I. Verhaert, „Design methodology for combined production and distribution for domestic hot water and space heating,“ Clima 2019, 2019. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911101089>
- [26] ASHRAE, Chapter 50 – Service water heating, Atlanta: Heating, Ventilating and Air Conditioning Applications, 2015. ISBN: 978-1-936504-93-0
- [27] ČSN 06 0320, Tepelné soustavy v budovách - Příprava teplé vody - Navrhování a projektování, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [28] ČSN EN 12831-3, „Energetická náročnost budov-Výpočet tepelného výkonu-Část 3:Tepelný výkon pro soustavy teplé vody a charakteristika potřeb, Modul M8-2,M8-3.1.vyd.,“ Praha, 2018.
- [29] R. Vavříčka, J. Vrána a Z. Pospíchal, Příprava teplé vody, Praha: STP - odborná sekce Vytápění, 2017. ISBN: 978-80-02-02713-3

- [30] CELEX, „Commission Delegated Regulation (EU) No 811/2013,“ 2013. [Online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013R0811>
- [31] CELEX, „Commission Delegated Regulation (EU) No 812/2013,“ 2013. [Online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013R0812>
- [32] CELEX, „Commission Regulation (EU) No 813/2013,“ 2013. [Online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013R0813>
- [33] CELEX, „Commission Regulation (EU) No 814/2013,“ 2013. [Online]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32013R0814>
- [34] U. Jordan a K. Vajen, „DHWcalc: Program to generate domestic hot water profiles with statistical means for user defined conditions,“ 2005. [Online]. Dostupné z: citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.560.350
- [35] I. Verhaert, B. Bleys, S. Binnemans a E. Janssen, „A Methodology to Design Domestic Hot Water Production Systems Based on Tap Patterns,“ Clima Conference 2016, 2019. [Online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/337261109_A_Methodology_to_Design_Domestic_Hot_Water_Production_Systems_Based_on_Tap_Patterns
- [36] S. Werner, „Ecoheatcool Work Package 1– The European Heat market.,“ 2006. [Online]. Dostupné z: https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2016/02/Ecoheatcool_WP1_Web.pdf
- [37] T. Matuška, Solární soustavy pro bytové domy, Praha: Grada, 2010. ISBN: 978-80-247-3503-0
- [38] L. Bárta, „Modelling of Domestic Hot Water Tank Size for Apartment Buildings II,“ 2007. [Online]. Dostupné z: https://site.cibworld.nl/db/publication/recordlist_pre_commnr.php?&commission_no=W062
- [39] B. Schoenbauer, „Simple Retrofit High-Efficiency Natural Gas Water Heater Field Test,“ U.S. Department of Energy, 2017. [Online]. Dostupné z: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/building_america/65444.pdf
- [40] T. Kingston a S. Scott, „Laboratory Evaluation of Gas-Fired Tankless and Storage Water Heater: Approaches to Combination Water and Space Heating,“ The National Renewable Energy Laboratory, 2013. [Online]. Dostupné z: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/building_america/eval_gasfired_tankless_storagewh.pdf
- [41] J. Siegenthaler, Modern Hydronic Heating for Residential and Light Commercial Buildings, Delmar: Cengage Learning, 2012. ISBN: 978-1-4283-3515-8
- [42] J. Bašta, Hydraulika a řízení otopných soustav, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN: 80-01-02808-9
- [43] L. Arena a O. Faakye, „Optimizing Hydronic System Performance in Residential Applications,“ The National Renewable Energy Laboratory, 2013. [Online]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60200.pdf>
- [44] G. Brundrett, Legionella and Building Services, Oxford: Butterworth-Heinemann, 1992. ISBN: 0750615281

- [45] H. C. Flemming, S. L. Percival a J. T. Walker, „Contamination potential of biofilms in water distribution systems,“ 2002. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.2166/WS.2002.0032>
- [46] G. W. Brundrett, „Legionnaires' disease,“ The Journal of CIB, 1989. [Online]. Dostupné z: https://www.aivc.org/sites/default/files/airbase_4251_A3.pdf
- [47] E. Van Kenhove, L. De Backer, A. Janssens a J. Laverge, „Simulation of Legionella concentration in domestic hot water: comparison of pipe and boiler models,“ 2019. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/19401493.2019.1583286>
- [48] W. Rhoads, P. Ji, A. Pruden a M. Edwards, „Water heater temperature set point and water use patterns influence Legionella pneumophila and associated microorganisms at the tap,“ 2015. [Online]. Dostupné z: [10.1186/s40168-015-0134-1](https://doi.org/10.1186/s40168-015-0134-1)
- [49] G. Bennet a C. Elwell, „Effect of boiler oversizing on efficiency: a dynamic simulation study,“ 2020. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0143624420927352>
- [50] J. Soukup, „Zkušební s kondenzačním kotlem v rodinném domě,“ 2015. [Online]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/zkusenosti-s-kondenzacnim-kotlem-v-rodinnem-dome-detail-3631>
- [51] G. Bennett, C. Elwell a T. Oreszczyn, „Space heating operation of combination boilers in the UK: The case for addressing real-world boiler performance,“ 2019. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/0143624418794552>
- [52] J. Tolar, „Odběrové charakteristiky přípravy teplé vody,“ 2008. [Online]. Dostupné z: www.techtranspt.com/DE/wp-content/uploads/mereni_de.pdf
- [53] DIN 4708, *Zentrale Wassererwärmungsanlagen, Part 3 – Regeln zur Leistungsprüfung von Wassererwärmern für Wohngeb.*, 1994.
- [54] O. Dumont, C. Carmo, R. Dickes a E. Georges, „Hot water tanks : How to select the optimal modelling approach?,“ ResearchGate, 2016. [Online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/304336068_Hot_water_tanks_How_to_select_the_optimal_modelling_approach
- [55] A. A. Soomro, A. A. Mokhtar, A. Akbar a A. Abbasi, „Modelling Techniques Used in The Analysis of Stratified Thermal Energy Storage: A Review,“ UTP-Ump-VIT Symposium on Energy Systems, 2018. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822501015>
- [56] R. Dickes, N. Weber, S. Quoin a V. Lemort, „Impact of model reduction on the dynamic simulation of a micro-scale concentrated solar power system integrated with a thermal storage,“ 2015. [Online]. Dostupné z: proceedings.ises.org/paper/swc2015/swc2015-0077-Dickes.pdf
- [57] E. Kleinbach, W. Beckman a S. Klein, „Performance study of one-dimensional models for stratified thermal storage tanks,“ ScienceDirect, 1993. [Online]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(93\)90087-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(93)90087-5)
- [58] S. Klein, W. Beckman, J. Mitchell, J. Duffie, N. Duffie a T. Freeman, „TRNSYS 15 A transient system simulation and program,“ Madison., 2000
- [59] T. Matuška, „Aktivní solární tepelné systémy – 3. část – počítačové modelování,“ Společnost pro techniku prostředí, 2003. [Online]. Dostupné z: https://www.stpcr.cz/?download=articles/vvi-2003-04_s173.pdf

- [60] R. Shrivastava, V. Kumar a S. Untawale, „Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective,“ [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.005>
- [61] J. W. Xiwang Li, „Review of building energy modeling for control and operation,“ 2014. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.056>
- [62] J. Thornton, „HVAC Library Mathematical Reference,“ Madison, WI 53703 – U.S.A., 2014.
- [63] National Fenestration Rating Council, 2021. [Online]. Dostupné z: https://www.nfrc.org/wp-content/uploads/2020/04/Energy_Performance_Label_Zone_Official.pdf
- [64] L. Bárta, „Experimental Monitoring of Hot Water Supply Systems,“ 2003. [Online]. Dostupné z: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB21736.pdf>
- [65] R. Vavříčka a M. Mazur, „Příprava teplé vody v obytných budovách,“ 2016. [Online]. Dostupné z: <https://voda.tzb-info.cz/priprava-teple-vody/14864-priprava-teple-vody-v-obytnych-budovach>
- [66] R. Spur, D. Fiala, D. Nevrala a D. Probert, „Influence of the domestic hot-water daily draw-off profile on the performance of a hot-water store,“ ScienceDirect, 2006. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.07.001>
- [67] Solar Energy Laboratory, „TRNSYS 18, Volume 4 - Mathematical Reference,“ 2018. [Online]. Dostupné z: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>
- [68] K. J. Åström a T. Hägglund, PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, NC: International Society for Measurement and Control, 1995. ISBN 978-1556175169
- [69] T. Matuška, „Zkoušení tepelné ztráty zásobníku,“ 2017. [Online]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/16177-zkouseni-tepelne-ztraty-zasobniku>
- [70] Firemní materiály AO Smith, „Technická specifikace ohřivače řady IR,“ 2021. [Online]. Dostupné z: https://aosmithinternational.com/downloads/en/Spec-sheet_Innovo_UK.pdf
- [71] R. Vavříčka, „Tepelné čerpadlo a příprava teplé vody,“ 2015. [Online]. Dostupné z: <https://www.topin.cz/clanky/tepelne-cerpadlo-a-priprava-teple-vody-detail-3481>
- [72] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, „VDI Heat Atlas,“ Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. [Online]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77877-6>

Přílohy

SEZNAM TIŠTĚNÝCH PŘÍLOH

Označení	Název
Příloha 1	Pomocné výpočty a nastavení pro simulaci IR 12-160
Příloha 2	Pomocné výpočty a nastavení pro simulaci IR 20-200
Příloha 3	Pomocné výpočty a nastavení pro simulaci IR 32-380
Příloha 4	Výňatky ze skriptu z Matlabu

SEZNAM PŘÍLOH NA CD

Soubory mimo složky

Název	Přípona	Obsah souboru
DP_Langerova	.pdf	Diplomová práce
PV_Langerova	.xls	Pomocné výpočty
PV_jednorazove_zatizeni	.xls	Vyhodnocení jednorázového zatížení trvalým průtokem teplé vody
TD_ohrivace	.pdf	Technická data ohřivačů
Vyhodnoceni_M_v_1_5	.m	Skript pro Matlab pro vyhodnocení

Soubory ve složce _OUT_RD

Název	Přípona	Obsah souboru
IR 12-160_RD_v1.20	.tpf	Numerický model pro simulaci IR 12-160 v rodinném domě
IR 12-160_Zkouska_nabijeni	.tpf	Numerický model pro zkoušku nabíjecí charakteristiky IR 12-160
IR 12-160_Staticka_ztrata	.tpf	Numerický model pro zkoušku statické ztráty IR 12-160
IR 12-160_Zkouska_odbereu	.tpf	Numerický model pro zkoušku odběru IR 12-160
SKP_RD	.skp	3D sketchup model budovy rodinného domu
RDREF_DHW	.txt	Odběrový profil RDREF – vstupní data pro TRNSYS
RDREF_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu RDREF
RDREF_55_15_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře RDREF
RDEXT1_DHW	.txt	Odběrový profil RDEXT1 – vstupní data pro TRNSYS
RDEXT1_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu RDEXT1
RDEXT1_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře RDEXT1
RDEXT2_DHW	.txt	Odběrový profil RDEXT2 – vstupní data pro TRNSYS
RDEXT2_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu RDEXT2
RDEXT2_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře RDEXT2
RDEXT3_DHW	.txt	Odběrový profil RDEXT3 – vstupní data pro TRNSYS
RDEXT3_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu RDEXT3
RDEXT3_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře RDEXT3
RDREF_50_2_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 50 °C, 2 K hystereze
RDREF_50_10_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 50 °C, 10 K hystereze
RDREF_50_15_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 50 °C, 15 K hystereze
RDREF_55_2_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 55 °C, 2 K hystereze
RDREF_55_10_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 55 °C, 10 K hystereze
RDREF_55_15_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 55 °C, 15 K hystereze

Soubory ve složce _OUT_BD

Název	Přípona	Obsah souboru
IR 20-200_BD_v1.1	.tpf	Numerický model pro simulaci IR 20-200 v bytovém domě
IR 20-200_Zkouska_nabijeni	.tpf	Numerický model pro zkoušku nabíjecí charakteristiky IR 20-200
IR 20-200_Staticka_ztrata	.tpf	Numerický model pro zkoušku statické ztráty IR 20-200
IR 20-200_Zkouska_odberu	.tpf	Numerický model pro zkoušku odběru IR 20-200
SKP_BD	.skp	3D sketchup model budovy bytového domu
BDREF_DHW	.txt	Odběrový profil BDREF – vstupní data pro TRNSYS
BDREF_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu BDREF
BDREF_65_10_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře BDREF
BDEXT1_DHW	.txt	Odběrový profil BDEXT1 – vstupní data pro TRNSYS
BDEXT1_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu BDEXT1
BDEXT1_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře BDEXT1
BDEXT2_DHW	.txt	Odběrový profil BDEXT2 – vstupní data pro TRNSYS
BDEXT2_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu BDEXT2
BDEXT2_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře BDEXT2
BDEXT3_DHW	.txt	Odběrový profil BDEXT3 – vstupní data pro TRNSYS
BDEXT3_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu BDEXT3
BDEXT3_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře BDEXT3
BDREF_60_2_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 60 °C, 2 K hystereze
BDREF_60_10_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 60 °C, 10 K hystereze
BDREF_60_15_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 60 °C, 15 K hystereze
BDREF_65_2_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 65 °C, 2 K hystereze
BDREF_65_10_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 65 °C, 10 K hystereze
BDREF_65_15_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 65 °C, 15 K hystereze

Soubory ve složce _OUT_AM

Název	Přípona	Obsah souboru
IR 32-380_AM_v1.1	.tpf	Numerický model pro simulaci IR 32-380 v mycím centru
IR 32-380_Zkouska_nabijeni	.tpf	Numerický model pro zkoušku nabíjecí charakteristiky IR 32-380
IR 32-380_Staticka_ztrata	.tpf	Numerický model pro zkoušku statické ztráty IR 32-380
IR 32-380_Zkouska_odberu	.tpf	Numerický model pro zkoušku odběru IR 32-380
SKP_AM	.skp	3D sketchup model budovy mycího centra
AMREF_DHW	.txt	Odběrový profil AMREF – vstupní data pro TRNSYS
AMREF_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu AMREF
AMREF_65_2_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře AMREF
AMEXT1_DHW	.txt	Odběrový profil AMEXT1 – vstupní data pro TRNSYS
AMEXT1_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu AMEXT1
AMEXT1_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře AMEXT1
AMEXT2_DHW	.txt	Odběrový profil AMEXT2 – vstupní data pro TRNSYS
AMEXT2_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu AMEXT2
AMEXT2_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře AMEXT2
AMEXT3_DHW	.txt	Odběrový profil AMEXT3 – vstupní data pro TRNSYS
AMEXT3_log	.txt	Vstupní data pro DHWCalc pro generování profilu AMEXT3
AMEXT3_out	.txt	Výstupy ze simulace scénáře AMEXT3
AMREF_60_2_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 60 °C, 2 K hystereze
AMREF_60_10_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 60 °C, 10 K hystereze
AMREF_60_15_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 60 °C, 15 K hystereze
AMREF_65_2_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 65 °C, 2 K hystereze
AMREF_65_10_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 65 °C, 10 K hystereze
AMREF_65_15_out	.txt	Výstupy ze simulace pro parametrickou studii 65 °C, 15 K hystereze

Příloha 1 – Pomocné výpočty a nastavení pro simulaci IR 12-160

Pomocné výpočty pro nastavení modulu budovy

Pro nastavení modulu budovy a výpočty systému vytápění je nutné znát součinitel prostupu tepla budovy. Tepelně – technické vlastnosti konstrukcí řešené budovy potřebné pro výpočet jsou uvedeny v Tabulce 22 níže. Pro výpočet součinitele prostupu tepla platí vzorec (19):

$$H_T = \sum_{i=1}^n U_i \cdot A_i \quad (19)$$

Tabulka 22-Vlastnosti konstrukcí modelu rodinného domu

Konstrukce	Složení	δ	λ	U	A _{celkem}	HT _i
		[m]	[W/mK]			
Obvodová stěna	Sádrová omítka	0,010	0,570	0,23	195	46
	Cihelné zdivo	0,200	1,580			
	Izolace Isover Orsil	0,150	0,038			
	Fasádní omítka	0,005	0,870			
Podlaha	Streier Parket	0,014	0,139	0,17	85	14
	Ethafoam	0,003	0,041			
	Anhyment	0,043	1,200			
	Ethafoam	0,010	0,041			
	Isover Izolace	0,030	0,045			
	Železobeton	0,250	1,580			
	Ytong Multipor	0,200	0,045			
Strop	Streier Parket	0,014	0,139	0,18	85	15
	Ethafoam	0,003	0,041			
	Anhyment	0,043	1,200			
	Ethafoam	0,010	0,041			
	Isover Izolace	0,210	0,045			
	Železobeton	0,200	1,580			
Střecha	Omítka	0,010	0,990	0,18	85	16
	Železobeton	0,200	1,580			
	Poriment PS	0,050	0,114			
	Glastek AL 40	0,004	0,210			
	Pěnový polystyren	0,180	0,037			
	Glastek 30 Sti	0,003	0,210			
	Elastek 50 Spe	0,005	0,210			
Okna	–	–	–	1,1	36	39,6
CELKEM H_T [W/K]						130

Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce byl uvažován: 8 W/m²K

Součinitel přestupu tepla na vnější straně konstrukce byl uvažován: 23 W/m²K

Pomocný výpočet pro určení jmenovitého průtoku vytápění

Výpočet návrhového hmotnostního průtoku vychází z potřeby pokrýt jmenovitou tepelnou ztrátu budovy:

$$\dot{m}_w = \frac{H_T \cdot (t_{i,N} - t_{e,N})}{c_w \cdot (t_{w1,sek} - t_{w2,sek})} = \frac{130 \cdot (20 - (-15))}{4220 \cdot (45 - 35)} = 0,108 \text{ kg / s} \quad (20)$$

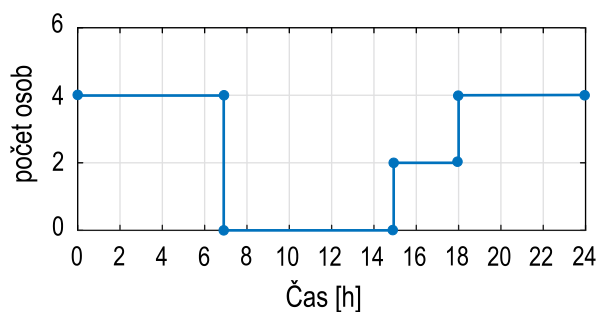
Tepelná kapacita modulu budovy se určí jako:

$$C = \sum_{i=1}^n \delta_i \cdot c_{p,i} \cdot \rho_i \cdot A_i \quad (21)$$

Tabulka 23 -Vlastnosti konstrukcí pro určení tepelné kapacity modulu budovy

Konstrukce	Složení	δ	c_p	ρ	A_{celkem} [m ²]	C [kJ/K]
		[m]	[J/kgK]	[kg/m ³]		
Obvodová stěna	Sádrová omítka	0,010	1000	1300	195	83903
	Cihelné zdivo	0,200	1020	2000		
	Izolace Isover Orsil	0,150	1140	10		
	Fasádní omítka	0,005	840	1800		
Podlaha	Streier Parket	0,014	700	500	85	52799
	Ethafoam	0,003	1000	10		
	Anhyment	0,043	840	2100		
	Ethafoam	0,010	1000	10		
	Isover Izolace	0,030	1270	10		
	Železobeton	0,250	1020	2000		
	Ytong Multipor	0,200	1300	115		
Strop	Streier Parket	0,014	700	500	85	41803
	Ethafoam	0,003	1000	10		
	Anhyment	0,043	840	2100		
	Ethafoam	0,010	1000	35		
	Isover Izolace	0,210	1270	10		
	Železobeton	0,200	1020	2000		
Střecha	Omítka	0,010	790	2000	85	39782
	Železobeton	0,200	1020	2000		
	Poriment PS	0,050	840	500		
	Glastek AL 40	0,004	1470	1100		
	Pěnový polystyren	0,180	1270	10		
	Glastek 30 Sti	0,003	1470	1200		
	Elastek 50 Spe	0,005	1470	1200		
Okna	-	-	-	-	36	-
CELKEM C [kJ/K]						218286

Profil obsazenosti budovy rodinného domu



Graf 57 - Profil obsazenosti RD

Pomocné výpočty pro nastavení modulu výměníku

TRNSYS vyžaduje zadání součinu UA. Návrhový výpočet byl proveden s využitím metody středního logaritmického teplotního spádu LMTD. Střední logaritmický teplotní spád se určí ze základního vzorce:

$$LMTD = \frac{\Delta 1 - \Delta 2}{\ln\left(\frac{\Delta 1}{\Delta 2}\right)} = \frac{7,1 - 7}{\ln\left(\frac{7,1}{7}\right)} = 7,05 \quad (22)$$

A součin UA se určí ze vztahu níže, kde Q_N je jmenovitá tepelná ztráta budovy:

$$UA = \frac{Q_N}{LMTD} = \frac{4565}{7,05} = 648 \text{ W / K} \quad (23)$$

Tabulka 24 - Vstupní hodnoty a výsledky z výpočtu parametrů modulu výměníku

Popis	Značení	Hodnota
Návrhová teplota přívodní vody (primární strana)	$t_{w1,prim}$	52 °C
Návrhová teplota vratné vody (primární strana)	$t_{w2,prim}$	42 °C
Návrhová teplota přívodní vody (sekundární strana)	$t_{w1,sek}$	45 °C
Návrhová teplota vratné vody (sekundární strana)	$t_{w2,sek}$	35 °C

Například pokud by byl součinitel prostupu tepla roven 2500 Wm²/K – dle hodnot doporučených v Heat Atlasu [72], potom by potřebná teplosměnná plocha výměníku byla 0,26 m².

Kontrolní výpočet výkonu ohřivače a poměru výkonu pro přípravu teplé vody a vytápění

$$\text{Potřebný výkon pro vytápění: } Q_{VYT} = H_T \cdot (t_{i,N} - t_{e,N}) = 130 \cdot (20 - (-15)) = 4,6 \text{ kW} \quad (24)$$

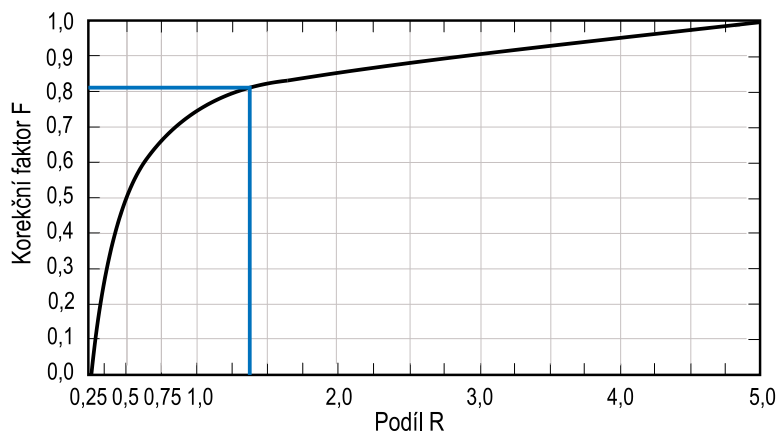
$$\text{Potřebný výkon pro přípravu TV: } Q_{TV} = 6,2 \text{ kW}^{1)}$$

$$\text{Potřebný výkon ohřivače: } Q_{OH} = Q_{VYT} + F \cdot Q_{TV} = 4,6 + 0,81 \cdot 6,2 = 9,6 \text{ kW} \quad (25)$$

Tabulka 25 - Kontrolní výpočet ohřivače pro RD

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon pro vytápění	Q_{vyt}	4,6	kW
Jmenovitý výkon pro přípravu TV	Q_{TV}	6,2	kW
Poměr	R	1,4	–
Korekční faktor (odečet z grafu)	F	0,81	–
Potřebný výkon ohřivače	Q_{OH}	9,6	kW
Zvolený výkon ohřivače	Q_{OH}	11,7	kW

1) výpočet viz přiložený excel PV_Langerova.xls na listu RD_OH



Graf 58 - Odečet korekčního faktoru pro návrh ohřivače do RD

Příloha 2 – Pomocné výpočty pro simulaci IR 20-200

Pomocné výpočty pro nastavení modulu budovy

Byly využity shodné vzorce jako v předchozím případě rodinného domu.

Tabulka 26 - Vlastnosti konstrukcí modelu rodinného domu

Konstrukce	Složení	δ	λ	U	A _{celkem}	HT _i
		[m]	[W/mK]			
Obvodová stěna	Sádrová omítka	0,010	0,570	0,24	443	105
	Cihelné zdivo	0,150	1,580			
	Izolace Isover Orsil	0,150	0,038			
	Fasádní omítka	0,005	0,870			
Podlaha	Streier Parket	0,014	0,139	0,16	450	72
	Ethafoam	0,003	0,041			
	Anhyment	0,043	1,200			
	Ethafoam	0,010	0,041			
	Isover Izolace	0,150	0,045			
	Železobeton	0,150	1,580			
	Ytong Multipor	0,100	0,045			
Strop	Streier Parket	0,014	0,139	0,25	450	112
	Ethafoam	0,003	0,041			
	Anhyment	0,043	1,200			
	Ethafoam	0,010	0,041			
	Isover Izolace	0,150	0,045			
	Železobeton	0,100	1,580			
Střecha	Omítka	0,010	0,990	0,21	85	93
	Železobeton	0,150	1,580			
	Poriment PS	0,050	0,114			
	Glastek AL 40	0,004	0,210			
	Pěnový polystyren	0,150	0,037			
	Glastek 30 Sti	0,003	0,210			
	Elastek 50 Spe	0,005	0,210			
Okna	-	-	-	1,1	86	95
CELKEM H_T [W/K]						477

Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce byl uvažován: 8 W/m²K

Součinitel přestupu tepla na vnější straně konstrukce byl uvažován: 23 W/m²K

Pomocný výpočet pro určení jmenovitého průtoku

Výpočet návrhového hmotnostního průtoku vychází z potřeby pokrýt jmenovitou tepelnou ztrátu budovy:

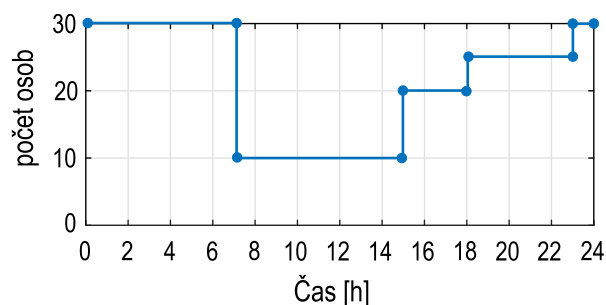
$$\dot{m}_w = \frac{H_T \cdot (t_{i,N} - t_{e,N})}{c_w \cdot (t_{w1,sek} - t_{w2,sek})} = \frac{477 \cdot (20 - (-15))}{4220 \cdot (45 - 35)} = 0,396 \text{ kg / s} \quad (26)$$

Tepelná kapacita modulu budovy se určí podle stejného vzorce jako v předchozím případě rodinného domu.

Tabulka 27 -Vlastnosti konstrukcí pro určení tepelné kapacity modulu budovy

Konstrukce	Složení	δ	c_p	ρ	A_{celkem} [m ²]	C [kJ/K]
		[m]	[J/kgK]	[kg/m ³]		
Obvodová stěna	Sádrová omítka	0,010	1000	1300	443	145358
	Cihelné zdivo	0,150	1020	2000		
	Izolace Isover Orsil	0,150	1140	10		
	Fasádní omítka	0,005	840	1800		
Podlaha	Streier Parket	0,014	700	500	450	181682
	Ethafoam	0,003	1000	10		
	Anhyment	0,043	840	2100		
	Ethafoam	0,010	1000	10		
	Isover Izolace	0,150	1270	10		
	Železobeton	0,150	1020	2000		
	Ytong Multipor	0,100	1300	115		
Strop	Streier Parket	0,014	700	500	450	129167
	Ethafoam	0,003	1000	10		
	Anhyment	0,043	840	2100		
	Ethafoam	0,010	1000	35		
	Isover Izolace	0,150	1270	10		
	Železobeton	0,100	1020	2000		
Střecha	Omítka	0,010	790	2000	450	164537
	Železobeton	0,150	1020	2000		
	Poriment PS	0,050	840	500		
	Glastek AL 40	0,004	1470	1100		
	Pěnový polystyren	0,150	1270	10		
	Glastek 30 Sti	0,003	1470	1200		
	Elastek 50 Spe	0,005	1470	1200		
Okna	-	-	-	-	36	-
CELKEM C [kJ/K]						620743

Profil obsazenosti budovy bytového domu



Graf 59 - Profil obsazenosti BD

Pomocné výpočty pro nastavení modulu výměníku

Střední logaritmický teplotní spád se určí ze základního vzorce:

$$LMTD = \frac{\Delta 1 - \Delta 2}{\ln\left(\frac{\Delta 1}{\Delta 2}\right)} = \frac{7,1 - 7}{\ln\left(\frac{7,1}{7}\right)} = 7,05 \quad (27)$$

A součin UA se určí ze vztahu níže:

$$UA = \frac{Q_N}{LMTD} = \frac{16695}{7,05} = 2366 \text{ W / K} \quad (28)$$

Tabulka 28 - Vstupní hodnoty a výsledky z výpočtu parametrů modulu výměníku

Popis	Značení	Hodnota
Návrhová teplota přívodní vody (primární strana)	$t_{w1,prim}$	52 °C
Návrhová teplota vratné vody (primární strana)	$t_{w2,prim}$	42 °C
Návrhová teplota přívodní vody (sekundární strana)	$t_{w1,sek}$	45 °C
Návrhová teplota vratné vody (sekundární strana)	$t_{w2,sek}$	35 °C

Například pokud by byl součinitel prostupu tepla roven 2500 Wm²/K – dle hodnot doporučených v Heat Atlasu [72], potom by potřebná teplosměnná plocha výměníku byla 0,95 m².

Kontrolní výpočet výkonu ohřivače a poměru výkonu pro přípravu teplé vody a vytápění

$$\text{Potřebný výkon pro vytápění: } Q_{VYT} = H_T \cdot (t_{i,N} - t_{e,N}) = 477 \cdot (20 - (-15)) = 16,7 \text{ kW} \quad (29)$$

$$\text{Potřebný výkon pro přípravu TV: } Q_{TV} = 14,2 \text{ kW}^1)$$

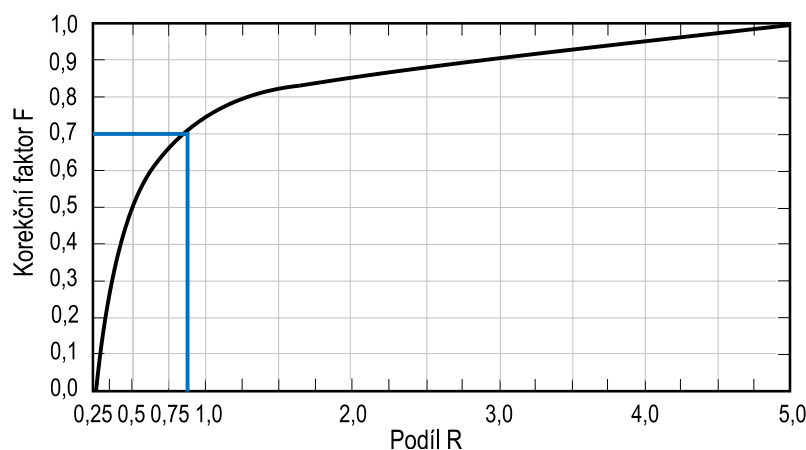
$$\text{Potřebný výkon ohřivače: } Q_{OH} = Q_{VYT} + F \cdot Q_{TV} = 16,7 + 0,7 \cdot 14,2 = 26,6 \text{ kW} \quad (30)$$

Tabulka 29 – Kontrolní výpočet ohřivače pro BD

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon pro vytápění	Q_{vyt}	16,7	kW
Jmenovitý výkon pro přípravu TV	Q_{TV}	14,2	kW
Poměr	R	0,85	–
Korekční faktor (odečet z grafu)	F	0,7	–
Potřebný výkon ohřivače	Q_{OH}	26,6	kW
Zvolený výkon ohřivače ²⁾	Q_{OH}	19,1	kW

1) výpočet viz příložený excel PV_Langerova.xls na listu BD_OH

2) projekční chyba = záměrně



Graf 60 -Odečet korekčního faktoru pro návrh ohřivače do BD

Příloha 3 – Pomocné výpočty pro simulaci IR 32-380

Pomocné výpočty pro nastavení modulu budovy

Byly využity shodné vzorce jako v předchozím případě rodinného domu.

Tabulka 30 - Vlastnosti konstrukcí modelu rodinného domu

Konstrukce	Složení	δ	λ	U	A _{celkem}	HT _i
		[m]	[W/mK]			
Obvodová stěna	Sádrová omítka	0,010	0,570	0,41	84	35
	Cihelné zdivo	0,200	1,580			
	Izolace Isover Orsil	0,080	0,038			
	Fasádní omítka	0,005	0,870			
Podlaha	Streier Parket	0,014	0,139	0,39	67	26
	Ethafoam	0,003	0,041			
	Anhymant	0,080	1,200			
	Ethafoam	0,010	0,041			
	Isover Izolace	0,030	0,045			
	Železobeton	0,200	1,580			
	Ytong Multipor	0,050	0,045			
Střecha	Omítka	0,010	0,990	0,41	67	28
	Železobeton	0,200	1,580			
	Poriment PS	0,050	0,114			
	Glastek AL 40	0,004	0,210			
	Pěnový polystyren	0,060	0,037			
	Glastek 30 Sti	0,003	0,210			
	Elastek 50 Spe	0,005	0,210			
Okna	–	–	–	1,1	6	7
CELKEM H_T [W/K]						95

Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně konstrukce byl uvažován: 8 W/m²K

Součinitel přestupu tepla na vnější straně konstrukce byl uvažován: 23 W/m²K

Pomocný výpočet pro určení jmenovitého průtoku

Výpočet návrhového hmotnostního průtoku vychází z potřeby pokrýt jmenovitou tepelnou ztrátu budovy:

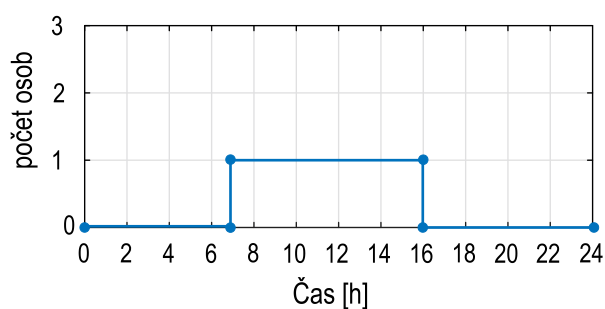
$$\dot{m}_w = \frac{H_T \cdot (t_{i,N} - t_{e,N})}{c_w \cdot (t_{w1,sek} - t_{w2,sek})} = \frac{95 \cdot (20 - (-15))}{4220 \cdot (45 - 35)} = 0,079 \text{ kg/s} \quad (31)$$

Tepelná kapacita modulu budovy se určí podle stejného vzorce jako v předchozím případě rodinného domu.

Tabulka 31 -Vlastnosti konstrukcí pro určení tepelné kapacity modulu budovy

Konstrukce	Složení	δ	c_p	ρ	A_{celkem} [m ²]	C [kJ/K]
		[m]	[J/kgK]	[kg/m ³]		
Obvodová stěna	Sádrová omítka	0,010	1000	1300	84	36153
	Cihelné zdivo	0,200	1020	2000		
	Izolace Isover Orsil	0,080	1140	10		
	Fasádní omítka	0,005	840	1800		
Podlaha	Streier Parket	0,014	700	500	67	37654
	Ethafoam	0,003	1000	10		
	Anhyment	0,080	840	2100		
	Ethafoam	0,010	1000	10		
	Isover Izolace	0,030	1270	10		
	Železobeton	0,200	1020	2000		
	Ytong Multipor	0,050	1300	115		
Střecha	Omítka	0,010	790	2000	67	31255
	Železobeton	0,200	1020	2000		
	Poriment PS	0,050	840	500		
	Glastek AL 40	0,004	1470	1100		
	Pénový polystyren	0,060	1270	10		
	Glastek 30 Sti	0,003	1470	1200		
	Elastek 50 Spe	0,005	1470	1200		
Okna	-	-	-	-	6	-
CELKEM C [kJ/K]						105063

Profil obsazenosti buňky pro zaměstnance



Graf 61 - Profil obsazenosti AM

Pomocné výpočty pro nastavení modulu výměníku

Střední logaritmický teplotní spád se určí ze základního vzorce:

$$LMTD = \frac{\Delta 1 - \Delta 2}{\ln\left(\frac{\Delta 1}{\Delta 2}\right)} = \frac{7,1 - 7}{\ln\left(\frac{7,1}{7}\right)} = 7,05 \quad (32)$$

A součin UA se určí ze vztahu níže:

$$UA = \frac{Q_N}{LMTD} = \frac{3331}{7,05} = 473 \text{ W / K} \quad (33)$$

Tabulka 32 - Vstupní hodnoty a výsledky z výpočtu parametrů modulu výměníku

Popis	Značení	Hodnota
Návrhová teplota přívodní vody (primární strana)	$t_{w1,prim}$	52 °C
Návrhová teplota vratné vody (primární strana)	$t_{w2,prim}$	42 °C
Návrhová teplota přívodní vody (sekundární strana)	$t_{w1,sek}$	45 °C
Návrhová teplota vratné vody (sekundární strana)	$t_{w2,sek}$	35 °C

Například pokud by byl součinitel prostupu tepla roven 2500 Wm²/K – dle hodnot doporučených v Heat Atlasu [72], potom by potřebná teplosměnná plocha výměníku byla 0,19 m².

Kontrolní výpočet výkonu ohřivače a poměru výkonu pro přípravu teplé vody a vytápění

$$\text{Potřebný výkon pro vytápění: } Q_{VYT} = H_T \cdot (t_{i,N} - t_{e,N}) = 95 \cdot (20 - (-15)) = 3,3 \text{ kW} \quad (34)$$

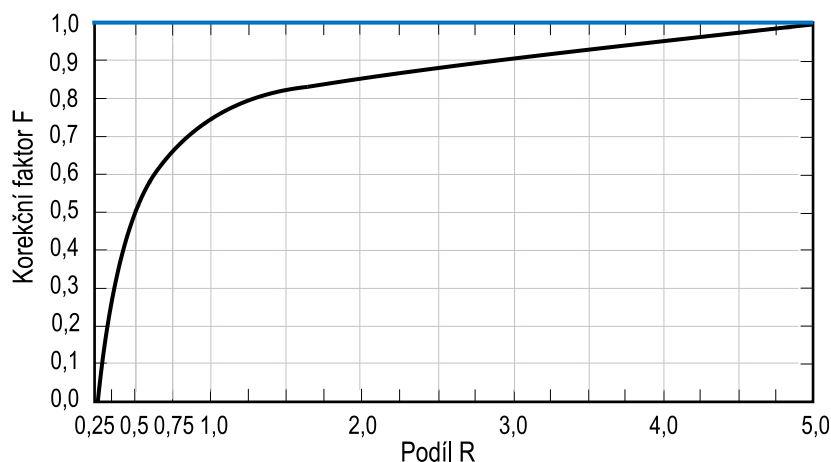
$$\text{Potřebný výkon pro přípravu TV: } Q_{TV} = 25,8 \text{ kW} \quad 1)$$

$$\text{Potřebný výkon ohřivače: } Q_{OH} = Q_{VYT} + F \cdot Q_{TV} = 3,3 + 1,25 \cdot 25,8 = 29 \text{ kW} \quad (35)$$

Tabulka 33 - Kontrolní výpočet ohřivače pro AM

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Jmenovitý výkon pro vytápění	Q_{vyt}	3,3	kW
Jmenovitý výkon pro přípravu TV	Q_{TV}	25,8	kW
Poměr	R	7,7	–
Korekční faktor (odečet z grafu)	F	1	–
Potřebný výkon ohřivače	Q_{OH}	29,1	kW
Zvolený výkon ohřivače	Q_{OH}	31,3	kW

1) výpočet viz příložený excel PV_Langerova.xls na listu AM_OH



Graf 62 - Odečet korekčního faktoru pro návrh ohřivače do AM

Příloha 4 – Výňatky hlavních částí skriptu z Matlabu

%% Latkové vlastnosti

```
% stredni teplota na termostatu za rok
tset_mean=mean(tset);
% hustota
rho=1000-(tset_mean-4)*(0.097+0.0036*(tset_mean-4));
% tepelna vodivost
lambdaw=0.55+2.63e-03*tset_mean-15.7e-06*(tset_mean)^2+27.3e-09*(tset_mean)^3;
% soucinitel teplotni vodivosti
aw=(0.131+0.58e-03*tset_mean-2e-06*(tset_mean)^2)/(1e+06);
% tepelna kapacita
cw=lambdaw/(rho*aw);
```

%% Pocet startu horaku a doba provozu

```
for n=1:length(tau)
    if (QOH(n)>0)
        QOH_s(n)=1;
    else
        QOH_s(n)=0;
    end
end
% useky, kde rozdil mezi elementy bude mit tvar [0,1,0], napr. rada 1 1 0 0
fOH = find(diff([0,QOH_s,0]==1));
pOH = fOH(1:2:end-1);
yOH= fOH(2:2:end)-pOH;
% celkovy pocet startu za rok
QOH_ssum=sum(yOH>0);
% min souvisla doba chodu za rok
QOH_tamin=min(yOH);
% max souvisla doba chodu za rok
QOH_tamax=max(yOH);
% prumerna souvisla doba chodu za rok
QOH_tamean = mean(yOH);
```

%% Odberove charakteristiky (ukázka pro nejchladnejsi den)

```
% deleni=prevod jednotek
for z=1:length(tau_c)
    QOH_vytc(z)=(qw_c(z)*rho*aw*(tw1_c(z)-tw2_c(z)))/(3600*1000*1000*60);
    QOH_SMc(z)=(qSM_c(z)*rho*aw*(tSM_c(z)-tSV_c(z)))/(3600*1000*1000*60);
    QOH_pozc(z)=qDHWcalc_c(z)*rho*aw*(tTVn-tSV_c(z))/(3600*1000*1000*60);
end
EOH_vytc=cumsum(QOH_vytc);% kumulativni
EOH_SMc=cumsum(QOH_SMc);% kumulativni
EOH_pozc=cumsum(QOH_pozc);% kumulativni
R_EOHSMc=cumsum(QOH_SMc)/sum(QOH_pozc);% kumulativni
```

%% Kontrola dodržení teploty ve vytápenem prostoru

```
for n=1:length(tau)
    % hleda delku otopneho obdobi (te < 13 °C)
    if (13>=te(n)&&ti(n)<=21)
        tau_otop(n)=1;
    end
    % hleda cas kdy teplota v zone mezi 19.5 a 21 °C
    if (19.5<ti(n)&& ti(n)<=21 && 13>=te(n))
        tau_tiI(n)=1;
    end
    % hleda cas kdy teplota v zone mezi 18 a 19.5 °C
    if (18<=ti(n)&& ti(n)<19.5 && 13>=te(n))
        tau_tiII(n)=1;
    end
    % hleda cas kdy teplota v zone mezi 15 a 18 °C
    if (15<ti(n)&& ti(n)<18)
        tau_tiIII(n)=1;
    end
    % hleda cas kdy teplota v zone mensi nez 15 °C
    if (ti(n)<15)
        tau_tiIV(n)=1;
    end
end
% pomer doby kdy splneny podminky intervalu vzhledem k delce otop. obdobi
Rvyt_I=((sum(tau_tiI))/sum(tau_otop))*100;
Rvyt_II=((sum(tau_tiII))/sum(tau_otop))*100;
Rvyt_III=((sum(tau_tiIII))/sum(tau_otop))*100;
Rvyt_IV=((sum(tau_tiIV))/sum(tau_otop))*100;
```

%% Rocni distribuce nabití ohříváče

```
for n=1:length(tau)
    if (qSM(n)>0&&tset(n)>=tSETn)
        preb(n)=1;
    end
    if (qSM(n)>0&&tSETn-10.5<=tset(n)&&tset(n)<tSETn)
        nab(n)=1;
    end
    if (qSM(n)>0&&40<=tset(n)&&tset(n)<tSETn-10.5)
        nednab(n)=1;
    end
    if (qSM(n)>0&&40>tset(n))
        vyb(n)=1;
    end
end
preb=sum(preb);
nab=sum(nab);
nednab=sum(nednab);
vyb=sum(vyb);
sumcelk=preb+nab+nednab+vyb;
preb=100*sum(preb)/sumcelk;
nab=100*sum(nab)/sumcelk;
nednab=100*sum(nednab)/sumcelk;
vyb=100*sum(vyb)/sumcelk;
```
