

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**SIMULAČNÍ ANALÝZA VYUŽITELNOSTI
ODPADNÍHO TEPLA Z DATOVÉHO
CENTRA**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jindřich** Jméno: **Leoš** Osobní číslo: **482401**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
Studijní program: **Technika prostředí**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Simulační analýza využitelnosti odpadního tepla z datového centra

Název diplomové práce anglicky:

Simulation Analysis of Waste Heat Utilization from a Data Centre

Pokyny pro vypracování:

Student se seznámí s možnými způsoby využití odpadního tepla z data centra a vybere nejvhodnější koncept pro zadané data centrum, ke kterému byla poskytnuta technická dokumentace firmou OptoNet Communication, spol. s r.o. Na základě této předlohy student vytvoří numerický model data centra v programu TRNSYS na kterém bude možné studovat vliv systému využití odpadního tepla na provoz data centra, zejména systému chlazení. Student provede parametrickou simulační analýzu cílící na různé provozní scénáře hypotetického systému využití odpadního tepla a posoudí dopady na energetickou a uhlíkovou náročnost zadaného datacentra včetně úspor na straně spotřeby odpadního tepla.

Seznam doporučené literatury:

Khosrow Ebrahimi, Gerard F. Jones, Amy S. Fleischer,
A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities,
Renewable and Sustainable Energy Reviews,
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.007>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vojtěch Zavřel, Ph.D. ústav techniky prostředí FS

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

Ing. Rostislav Prosecký OptoNet Communication, spol. s r.o.

Datum zadání diplomové práce: **20.03.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.06.2023**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Vojtěch Zavřel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Souhrn

Diplomová práce se zabývá simulační analýzou lokálního využití odpadního tepla z datového centra. V práci jsou shrnuty nejběžnější používané systémy chlazení datových center, způsoby implementace systémů využití odpadního tepla a možnosti na straně spotřebitele odpadního tepla. Simulační analýza je provedena v softwaru TRNSYS a klade si za cíl vyhodnotit dopady využití odpadního tepla na energetickou bilanci v datovém centru a dále vyhodnotit přínosy vůči standardním alternativám zdrojů tepla pro rezidenční a administrativní budovy. Praktická část práce se pak zabývá konkrétním typem datového centra, a to menším, regionálním datovým centrem s nominálním příkonem výpočetní techniky 530 kW. Hlavním zjištěním této práce je, že v některých případech instalace systému využití odpadního tepla do tohoto typu DC, jako doplňku systému volného chlazení, nemusí nutně vést k dosažení environmentálních, ani ekonomických cílů. Z vyhodnocení výsledků vyplývá, že systém využití odpadního tepla je výhodný až od určitého množství dodaného tepla do místa odběru, respektive až od určitého poměru k výkonové třídě DC. Konkrétní mez dodaného tepla, od které lze předpokládat pozitivní dopady (environmentální i ekonomické) je na základě studie v rozmezí 35 až 50 % nominálního výkonu výpočetní techniky, avšak může se lišit zejména s ohledem na požadovanou teplotní úroveň distribuce tepla a profil odběru.

Klíčová slova: TRNSYS, simulační analýza, datové centrum, využití odpadního tepla

Summary

The diploma thesis deals with the simulation analysis of the local use of waste heat from a data center. The most used data center cooling systems, implementation approaches for waste heat utilization systems and options on the side of the waste heat consumer are summarized in the thesis. The simulation analysis is carried out in the TRNSYS software and aims to evaluate the impacts of the use of waste heat on the energy balance in the data center and further evaluate the benefits compared to standard alternatives of heat sources for residential and commercial buildings. The practical part of the thesis deals with a bespoke data center, namely a smaller, regional data center with a nominal computing power 530 kW. The key finding of this thesis is that the installation of a waste heat utilization system into this type of DC, as a supplement to the free cooling system, does not necessarily lead to the achievement of environmental or economic goals in some cases. The results shows that the waste heat utilization system provide benefits from a certain amount of delivered heat, or from a certain ratio to the nominal DC power. Based on this study, the specific limit of supplied heat, from which positive impacts (environmental and economic) can be assumed, is in the range of 35 to 50 % of the nominal power of computing technology. However, it can vary especially regarding the required temperature level of heat distribution and the heating demand profile.

Key words: TRNSYS, simulation analysis, data center, waste heat utilization

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Simulační analýza využitelnosti odpadního tepla z datového centra“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Vojtěcha Zavřela, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....
Bc. LEOŠ JINDŘICH

Poděkování

Děkuji Ing. Vojtěchu Zavřelovi, Ph.D. za vedení a pomoc při tvorbě mé diplomové práce. Dále děkuji Ing. Rostislavu Proseckému ze společnosti OptoNet Communication za poskytnutí podkladů k Datovému Centru Vysočina.

Bc. LEOŠ JINDŘICH

Obsah

Seznam použitého značení	11
Seznam použitých zkratk	13
Úvod	14
1 Potenciál odpadního tepla v DC	16
1.1 Výpočetní zařízení	16
1.2 Systémy chlazení DC	17
1.2.1 Vzduchové chlazení	17
1.2.2 Kapalinné chlazení	19
1.2.3 Dvofázové chlazení	21
1.2.4 Volné chlazení	21
2 Existující systémy VOT	24
2.1 Technologie VOT (strana produkce)	24
2.1.1 Implementace v rámci kapalinného chlazení	24
2.1.2 Implementace v rámci vzduchového chlazení	25
2.1.3 Sorpční chlazení	27
2.1.4 Ostatní	27
2.2 Limity VOT	28
2.3 Možnosti pro VOT (strana spotřeby)	30
2.3.1 Sušení biomasy	30
2.3.2 Předehřev	31
2.3.3 Centralizované zásobování teplem	31
2.3.4 Nízkoteplotní CZT	33

3	Popis studovaného DC	34
3.1	Datové centrum	34
3.1.1	Implementace systému VOT	35
3.2	Provozní předpoklady	36
3.2.1	Profil příkonu ICT	36
3.2.2	Spotřebitelské charakteristiky	37
4	Postup vyhodnocení účinnosti VOT	40
4.1	Nástroje pro simulační analýzu	40
4.1.1	Rozbor nástrojů pro simulační analýzu	40
4.1.2	Použité nástroje	41
4.2	Klíčové ukazatele	42
4.2.1	pPUE	43
4.2.2	pERE a pERF	44
4.2.3	Provozní úspora	44
4.2.4	CO ₂ ekvivalent	45
4.3	Metodika řešení a vyhodnocení	47
5	Simulační model	50
5.1	Schéma zapojení v softwaru TRNSYS	50
5.2	Hlavní komponenty modelu DC	52
5.2.1	Chladivový okruh	54
5.2.2	Volné chlazení	55
5.3	Hlavní komponenty modelu VOT	56
5.4	Ověření kvality modelu	59
5.4.1	Verifikace dílčích výstupů modelu	60
5.4.2	Verifikace výstupů celoroční dynamické simulace	62
6	Vyhodnocení simulační analýzy	65

6.1	Dopady systému VOT na provoz DC	65
6.2	System VOT jako zdroj tepla	69
6.3	Globální vyhodnocení přínosu VOT	71
7	Diskuze	74
	Závěr	77
	Seznam použité literatury	85
	Přílohy	86
I	Technická dokumentace: klimatizační jednotka	88
II	Technická dokumentace: suchý chladič	90
III	Charakteristika chladicí sestavy DX	91
IV	Skript VBA	92
V	Výstupy ověření modelu	93

Seznam použitého značení

Označení	Jednotka	Popis
ATEL	kg/m ³	Akutní expoziční limit
ERE	1	Faktor účinnosti využití odpadního tepla
ERF	1	Faktor využití odpadního tepla
GWP	tCO ₂ /kg	Potenciál pro globální oteplování
i	1	Počet let
IRR	%	Vnitřní výnosové procento
LFL	kg/m ³	Spodní limit hořlavosti
\dot{M}_{cnd}	kg/h	Hmotnostní průtok na straně kondenzátoru
\dot{M}_{evp}	kg/h	Hmotnostní průtok na straně výparníku
ODL	kg/m ³	Mezní hodnota nedostatku kyslíku
\dot{P}_{cnd}	W	Příkon oběhového čerpadla strany kondenzátoru
\dot{P}_{eval}	W	Evaluační příkon komponenty modelu
\dot{P}_{evp}	W	Příkon oběhového čerpadla strany výparníku
P _{ICT}	J	Spotřeba elektřiny výpočetní techniky
P _{Klim}	J	Spotřeba elektřiny systému klimatizace
\dot{P}_{SCH}	W	Příkon suchého chladiče
PN	Kč	Provozní náklady
PU	Kč	Provozní úspora
PU _{rel}	%	Relativní provozní úspora
PUE	1	Faktor účinnosti využití energie
\dot{Q}_{cnd}	W	Tepelný výkon na straně kondenzátoru
\dot{Q}_{evp}	W	Tepelný výkon na straně výparníku
Q _{VOT}	J	Odpadní teplo využité mimo hranici datového centra
r	%	Relativní roční nárůst ceny
SCOP	1	Sezónní topný faktor
T _{EXT}	°C	Teplota exteriéru
T _{in}	°C	Teplota na vstupu
T _{out}	°C	Teplota na výstupu

Označení	Jednotka	Popis
\dot{V}_{norm}	1	Normalizovaný objemový průtok
WACC	%	Vážený průměr nákladu kapitálu
ΔPN	Kč	Rozdíl provozních nákladů

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Popis
AB	Administrativní budova
CDU	Distribuční jednotka chladicí látky
CRAC	Klimatizační jednotka pro přímý výpar
CRAH	Klimatizační jednotka pro vodní okruhy
CZT	Centralizované zásobování teplem
ČR	Česká republika
DC	Datové centrum
DX	Přímý výpar
EEA	Evropská agentura pro životní prostředí
EU	Evropská unie
ICT	Výpočetní technika
KK ZP	Kondenzační kotel na zemní plyn
MS	Microsoft
OČ	Oběhové čerpadlo
RBsou	Rezidenční budova soudobé zástavby
RBst	Rezidenční budova starší zástavby
TČ A-W	Tepelné čerpadlo typu vzduch/voda
TČ W-W	Tepelné čerpadlo typu voda/voda
TV	Teplá voda
VBA	Visual Basic
VOT	Využití odpadního tepla

Úvod

Datová centra (DC) jsou centralizovaná zařízení pro správu a šíření dat. Od uvedení do provozu historicky prvního DC ENIAC uběhlo dnes více než 77 let [1] a během této doby došlo v oblasti výpočetní techniky ke značnému technologickému rozvoji. DC se tak stala nedílnou součástí společenských i ekonomických systémů po celém světě [2].

O nepostradatelnosti DC hovoří také dokument Evropské komise z roku 2020 [3], kde je digitalizace uváděna jako nástroj pro snižování emisí, spotřeby fosilních paliv a efektivnějšího využití energie obecně. Zároveň jsou si však autoři vědomi toho, že digitalizace může výrazně zvýšit spotřebu energie DC, která jsou aktuálně zodpovědná za více než 2 % tvorby celosvětových emisí. Proto dokument uvádí i nutnost renovací a výstavby energeticky efektivních DC, využívání odpadního tepla z DC a samozřejmě využívání obnovitelných zdrojů energie v maximální možné míře.

DC lze z hlediska možností snižování spotřeby energie rozdělit do dvou skupin podle vzdálenosti od příjemce dat. Pro velká DC, která jsou označována „hyperscale“, např. společností Google nebo Meta je výhodné investovat do zhotovení infrastruktury i v odlehlých oblastech s chladným klimatem. Vhodnými podmínkami pro chlazení DC anebo lepší dostupností obnovitelných zdrojů energie je tak možné výrazně snižovat provozní náklady i tvorbu emisí [4]. Velká vzdálenost mezi příjemcem a zdrojem však vede k delší prodlevě při přenosu. Digitalizace a s ní spojené nároky na vyšší objem a zejména rychlost zpracování dat vedou dle studie EU [5] k trendu tzv. „Edge Computingu“. Jedná se o okrajová, resp. regionální, DC, jejichž předností je krátká vzdálenost mezi zdrojem a příjemcem. Z toho ovšem vyplývá, že lokalita výstavby není dána vhodnými klimatickými podmínkami, ale potřebou DC v daném místě. Proto je nutné hledat možnosti snižování spotřeby energie, které nebudou na klimatu tolik závislé.

Studie [5] dále uvádí i statistiky spotřeby energie v DC a také odhady budoucího vývoje v této oblasti v rámci států Evropské unie. DC tvořila ve státech EU v roce 2018 dohromady 2,7 % z celkové poptávky elektřiny, v absolutních hodnotách pak studie uvádí 76,8 TWh. Do roku 2030 by poptávka elektřiny v DC mohla překročit 98 TWh ročně, tedy 3,21 % celkové spotřeby EU. Studie také předpokládá nárůst podílu „Edge Computingu“ až na

12 % z celkové spotřeby energie v DC. Obdobný scénář vývoje v tomto sektoru je dle publikace International Energy Agency předpokládán i ve světovém měřítku [6].

Z výše uvedeného shrnutí je zřejmé, že počet DC se progresivně zvyšuje a s tím se zvyšuje také spotřeba elektřiny v tomto sektoru. V návaznosti na to existuje celá řada dokumentů, které předkládají návrhy, jak energetickou náročnost snížit, např. dokument Evropské komise [7]. Nejčastěji skloňovanou možností, jak dosáhnout klimaticky neutrálního hospodářství pro oblast DC, je jednoznačně využití odpadního tepla (VOT). Z toho důvodu se tato práce v rámci teoretické části zabývá přehledem teplotních poměrů v DC v návaznosti na VOT, jak na úrovni jednotlivých komponent serverů, tak i na úrovni systému chlazení. Dále je uveden popis dostupných technologií umožňujících využít odpadní teplo a možnosti jejich implementace v DC. Závěr teoretické části je věnován podrobné analýze již existujících studií v oblasti VOT z DC s v současnosti nejběžnějším, to je vzduchovým typem chlazení.

Praktická část práce se zabývá simulační analýzou lokálního VOT z DC za účelem vytápění a přípravy teplé vody v prostředí softwaru TRNSYS, který je uzpůsoben pro simulace dynamických energetických systémů. Simulační model je sestaven dle projektové dokumentace ke konkrétnímu DC společnosti OptoNet Communication, které lze zařadit do kategorie „Edge Computing“. V rámci simulační analýzy je provedena parametrická studie systému VOT pro typické odběrové profily administrativní a rezidenční budovy a pro různé teplotní a výkonové úrovně dodávky tepla. Přínos systému VOT je vyhodnocen na základě porovnání klíčových indikátorů s dalšími variantami zdrojů tepla, jako je tepelné čerpadlo typu vzduch/voda anebo kondenzační kotel na zemní plyn.

1 Potenciál odpadního tepla v DC

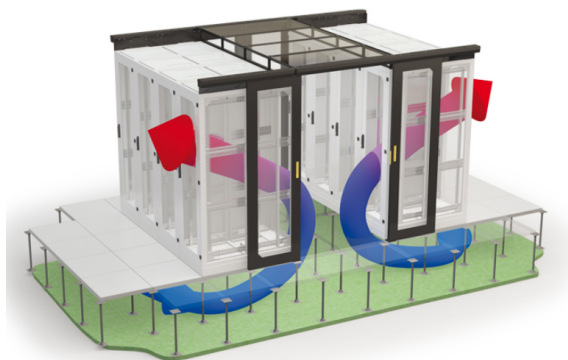
DC se skládají z různých typů technologických celků, které lze rozdělit na dvě základní skupiny. Primární skupinou je výpočetní technika s anglickou zkratkou ICT (Information and Communication Technologies), která zajišťuje zpracování a přenos dat. Sem patří zejména servery, síťová zařízení atp. Do druhé skupiny patří podpůrné systémy a zařízení, které zajišťují bezpečný a plynulý provoz pro výpočetní techniku. Jedná se například o klimatizační a hasicí systémy anebo záložní zdroje napájení.

Právě v komponentách výpočetní techniky (ICT) dochází k disipaci elektřiny na odpadní teplo, které musí být systémem chlazení odváděno. V současnosti připadá na ICT v průměru přibližně 60 % celkem spotřebované elektřiny [8]. Nicméně vzhledem k technologickému vývoji, který za posledních několik let rapidně zvýšil účinnost podpůrných systémů v DC, je pravděpodobné, že se podíl spotřeby ICT bude nadále zvyšovat. Z toho důvodu je vhodné odpadní teplo využít a tím pomoci snižování spotřeby energie v globálním měřítku. V následujících částech této kapitoly jsou shrnuty možnosti, které v tomto ohledu dílčí systémy a zařízení DC nabízejí.

1.1 Výpočetní zařízení

Výpočetní zařízení neboli servery představují v DC klíčový prvek, který umožňuje uchovávat a zpracovávat velké množství dat. Obecně je lze chápat jako vysoce výkonné výpočetní elementy, které provozují softwarové aplikace v propojení s dalším ICT vybavením [9]. Pro uložení serverů slouží serverové skříně, které obsahují další potřebnou infrastrukturu (přepínače, napájení atp.) [10]. Typické uspořádání serverových skříní ve vzduchem chlazených DC je zobrazeno níže (obr. 1).

Disipované teplo má v různých částech serveru různé teplotní úrovně. Na úrovni čipu je možné dosáhnout teploty až **95 °C**, standardně však spíše 80 až 85 °C. Na úrovni základové desky se pak teplota pohybuje okolo **50 °C** [11]. Uvedené teploty však představují spíše limitní hodnoty, kterým je možné se v oblasti technologií VOT přiblížit. Praktická teplotní úroveň odpadního tepla totiž závisí zejména na použitém systému chlazení.



Obr. 1 Uspořádání: Uzavřená studená ulička [12]

1.2 Systémy chlazení DC

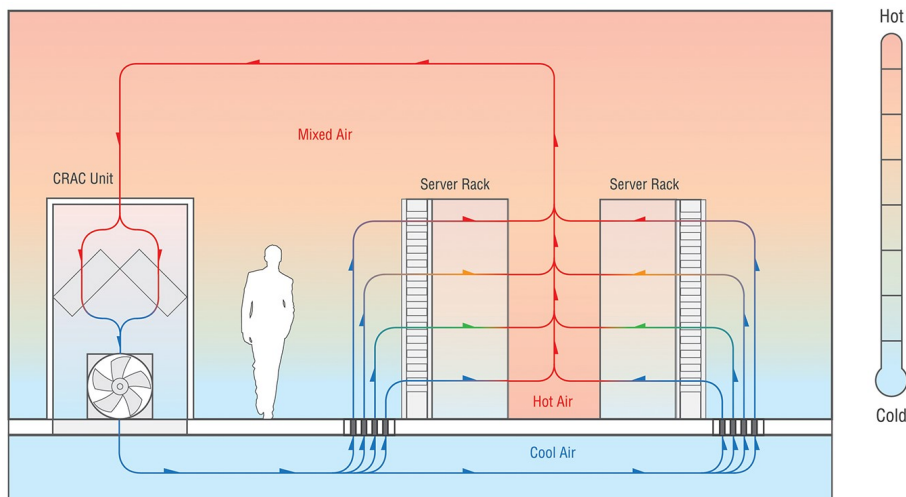
V této sekci je uveden přehled systémů chlazení, se kterými je možné se v DC setkat, a jejich potenciál pro VOT. Obecně je při návrhu systému chlazení předpokládáno maximální vytížení jednotlivých serverů, ačkoliv tento stav se v běžném provozu téměř nevyskytuje [13]. Pro stanovení výkonových možností VOT je tedy nutné vycházet ze skutečného průběhu vytížení ICT a nikoliv z nominálního chladicího výkonu. Dále musí návrh systému chlazení zohledňovat provozní podmínky udávané výrobcem serverů a hustotu instalovaného výkonu související s uspořádáním různých typů výpočetní techniky v prostoru datového sálu. Důsledky pro systémy VOT plynoucí z těchto aspektů jsou podrobně popsány v následujících částech této sekce.

1.2.1 Vzduchové chlazení

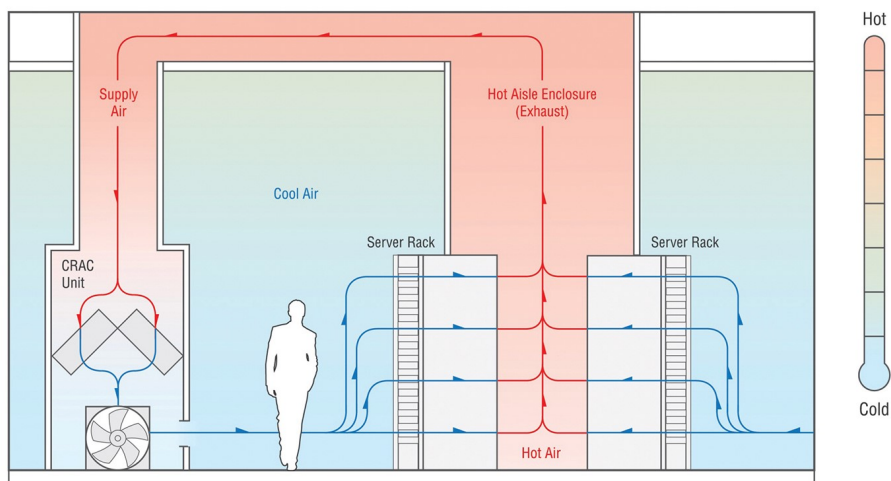
Základní případ vzduchového chlazení DC je znázorněn na obr. 2. Z vnitřní klimatizační jednotky je studený vzduch distribuován do zdvojené podlahy datového sálu. Přípustné parametry přívodního vzduchu dle UptimeInstitute, resp. ASHRAE [14] jsou 18 až 25 °C a 20 až 80 % relativní vlhkosti. Vzduch se následně ohřeje při průchodu ICT a je vyfukován do prostoru datového sálu. Ohřátý vzduch poté prochází výměníkem vnitřní klimatizační jednotky, kde se ochladí, a cyklus se opakuje. Možností fyzického uspořádání komponent ve vzduchem chlazených DC je více, ale pravděpodobně nepoužívanější jsou systémy s oddělenou tzv. teplou nebo studenou uličkou. Rozdíl oproti řešení na obr. 2 je v tom,

že nedochází ke směšování vzduchu v prostoru datového sálu, čímž se zvyšuje účinnost chladicího systému. Uspořádání pro oddělenou teplou uličku je možné vidět na obr. 3.

Teplotní spád pro servery se standardně pohybuje v rozmezí 10 až 15 °C [15]. Z toho plyne, že maximální teplota na straně vzduchu, se kterou je možné v rámci technologie VOT pracovat, se typicky pohybuje okolo 40 °C. Dle autorů článku [16] může být maximální teplota v teplé uličce až 47 °C. Je však důležité zmínit, že vysoké teploty vzduchu na výstupu ze serverů mohou představovat zvýšené riziko výpadku serveru z důvodu přehřívání.



Obr. 2 Chlazení DC přímým výparem (CRAC) [17]

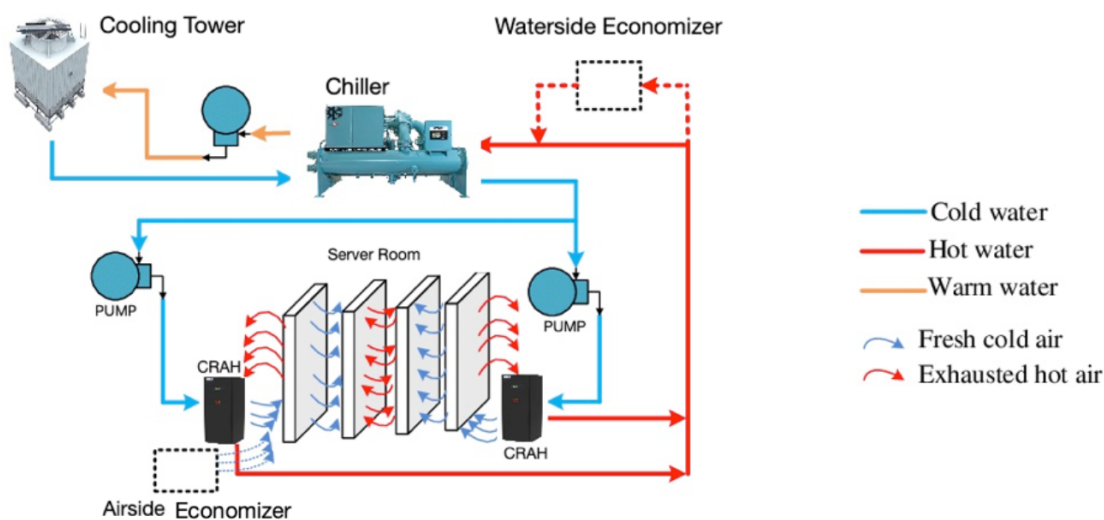


Obr. 3 Konfigurace oddělené teplé uličky [17]

Teplu předané na výměníku vnitřní klimatizační jednotky je dále odváděno do venkovního prostředí. Toto je realizováno buď parním kompresorovým okruhem nebo systémem volného chlazení, kterému je věnována samostatná sekce. V případě parního kompresorového

okruhu může za určitých podmínek výtlačná teplota kompresoru dosahovat až ke 120 °C. Omezením je zde zejména teplotní stabilita použitého mazacího oleje kompresoru.

Na obrázcích 2 a 3 je znázorněna vnitřní klimatizační jednotka typu CRAC se dvěma výparníky, tato konfigurace se nazývá chlazení přímým výparem (DX). Vzduch je v tomto případě chlazen přímo výparem chladiva v okruhu. Další možností je použití klimatizační jednotky typu CRAH, která obsahuje namísto výparníku tepelný výměník vzduch/kapalina. V tomto systému je vzduch v DC chlazen teplotnosnou látkou (typicky nemrznoucí směsí), která propojuje vnitřní jednotku a zdroj chladu. Možné zapojení chladicího systému s CRAH jednotkou je znázorněno na obr. 4. Vstupní teplota kapaliny ze zdroje chladu (v obrázku chiller) vedené do kondenzátoru (v obrázku cooling tower), může dosahovat až 70 °C [18].

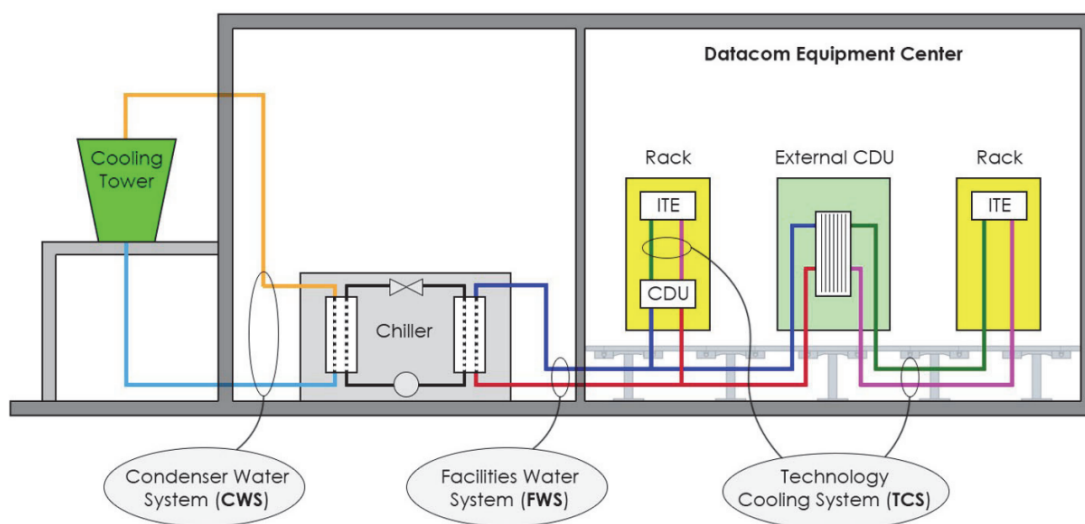


Obr. 4 Chlazení DC nepřímou: CRAH [19]

1.2.2 Kapalinné chlazení

Kapalinné chlazení je používáno zejména pro vysoce výkonné servery, které představují vysokou tepelnou zátěž koncentrovanou v malém prostoru. Parametr, podle kterého je možné zvolit vhodný způsob chlazení, je tepelný výkon generovaný servery z jedné serverové skříně. Zatímco maximální bezpečná hodnota tohoto parametru se pro vzduchové chlazení pohybuje mezi 20 až 30 kW, pro systémy kapalinného chlazení dosahuje až ke 100 kW na serverovou skříň [20].

Systémy kapalinného chlazení lze rozdělit do několika kategorií. První kategorií je chlazení na úrovni čipu. Zde jsou využity mikrokanálové a deskové výměníky, které jsou v přímém kontaktu s procesorem či moduly RAM [13]. Schematicky jsou níže (obr. 5) uvedeny způsoby zapojení chlazení na úrovni čipu, kde distribuční jednotka chladicí látky pro servery (CDU) je buď součástí serverové skříně nebo je samostatně umístěná v prostoru datového sálu. Další kategorií je chlazení na úrovni serverové skříně. V tomto případě jsou tepelné výměníky typu vzduch/kapalina umístěny v těsné blízkosti serverů, a ty jsou chlazeny vzduchem. Tato konfigurace se nazývá „rear door“ a jedná se o určitý mezistupeň mezi vzduchovým a kapalinným chlazením, obvykle je však řazena mezi kapalinné systémy [21]. Poslední základní kategorií je ponorné chlazení, kdy jsou servery ponořeny do chladicí kapaliny [22].



Obr. 5 Systém kapalinného chlazení [23]

Obecně se vstupní teplota chladicí kapaliny pohybuje v rozmezí 30 až 60 °C [13]. Teplota na výstupu ze serverů tak může dosahovat hodnot až 70 °C [13]. V novějších publikacích je přípustná mez výstupní teploty navýšena až na 85 °C [24]. K odvodu tepla do exteriéru je opět využíván parní kompresorový okruh nebo volné chlazení. Z hlediska teplotních poměrů kompresorového okruhu se jedná o obdobu vzduchových systémů. Na základě uvedených teplotních úrovní je patrné, že systémy kapalinného chlazení představují pro VOT vyšší potenciál než systémy vzduchové, protože teplo lze od serverů odvádět na vyšších teplotních úrovních.

1.2.3 Dvoufázové chlazení

Koncept dvoufázového chlazení v praxi zatím není příliš zavedený, jelikož pro naprostou většinu DC postačuje využití méně náročných technologií. Systém je velmi podobný kapalnému chlazení, ale navíc využívá výrazného zvýšení konvektivního součinitele přestupu tepla v důsledku vypařování chladicí látky v mikrokanálových výměnících u procesorů a modulů RAM. Tento systém dokáže odvádět výrazně vyšší tepelné zátěže serverů a na vyšších teplotních úrovních než výše uvedené systémy chlazení. Maximální teploty, se kterými je možné pracovat v rámci VOT, dosahují až k **90 °C** [11].

1.2.4 Volné chlazení

Volné chlazení je souhrnné označení pro systémy, které využívají přírodních zdrojů chladu. Těmi mohou být buď chladný venkovní vzduch, nebo vodní plochy. Prvky systému chlazení se tak redukuje pouze na provoz ventilátorů a případně oběhových čerpadel, čímž se výrazně snižují náklady na provoz. Volné chlazení je dnes běžnou součástí systémů chlazení DC a uplatňuje se zejména v polárním a mírném klimatickém pásu. Konkrétní možnosti technických řešení jsou uvedeny níže. Obecně lze však uvést, že volné chlazení zejména u vzduchových systémů výrazně snižuje teplotní potenciál odpadního tepla, protože vyšších teplotních hladin je dosahováno zejména na komponentách kompresorového okruhu.

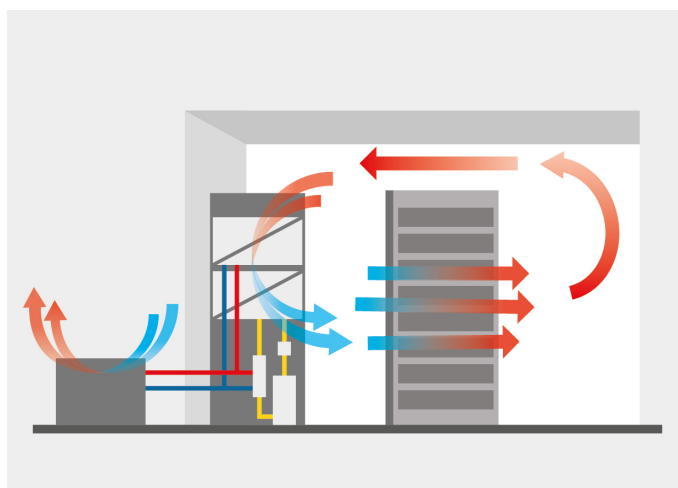
Vzduchové přímé volné chlazení

Chladný venkovní vzduch je distribuován přímo do prostoru datového sálu, kde je před vnitřní jednotkou klimatizace směřován s cirkulačním vzduchem. Výsledný stav vzduchu je buď vyhovující a není zapotřebí spínat kompresorový okruh, nebo ve směšovací komoře dojde pouze k předchlazení a zbytek odpadního tepla musí být odveden strojně. Pokud by projektovaná teplota přírodního vzduchu byla na maximální doporučené hodnotě (25 °C), pro klimatické podmínky ČR by bylo možné využívat přímé volné chlazení přes 90 % roku [25]. Hlavní nevýhody tohoto systému spočívají v náročnosti na kvalitu venkovního nasávaného vzduchu, je nutné použít kvalitní filtraci a vzduch zvlhčovat. Dále jsou to také výrazné prostorové nároky na instalaci vzduchovodů, hluk a potřeba pravidelné

údržby [25]. Z hlediska VOT je možné, v případě 100% odvodu tepelné zátěže přímým volným chlazením, využít pouze vzduch na výstupu ze serverů (do 47 °C).

Vzduchové nepřímé volné chlazení

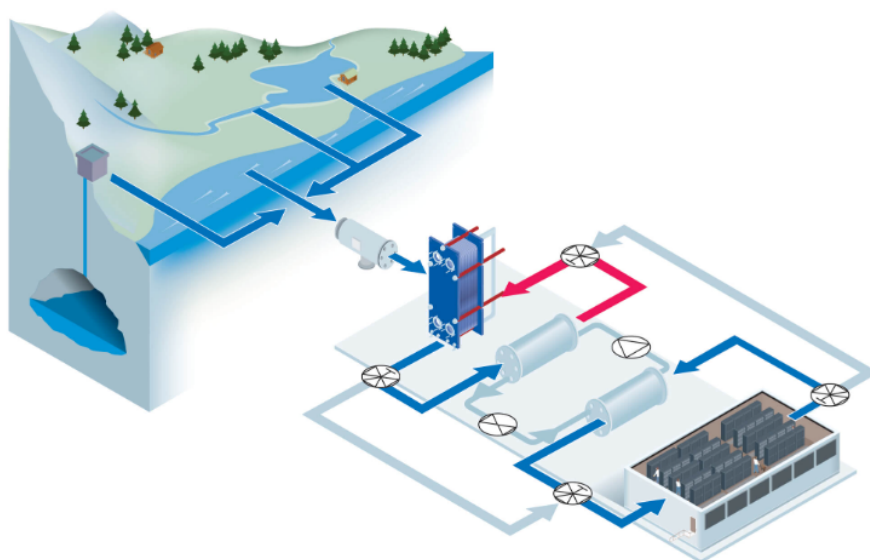
V této konfiguraci je chladný vzduch využitý typicky k ochlazení teplotonosné látky. A ta dále proudí do tepelného výměníku vnitřní klimatizační jednotky, kde odebírá teplo chladicí látky pro servery. Teplotonosnou látkou je obvykle nemrznoucí směs, ale může jí být i přímo chladivo kompresorového okruhu. Nepřímé volné chlazení lze implementovat jak v rámci vzduchového, tak i kapalinového systému chlazení. Pokud je odpadní teplo serverů odváděno vzduchem, je možné v klimatickém pásu ČR využít nepřímé volné chlazení přibližně 60 % roku [26]. V případě odvodu odpadního tepla kapalinou jej lze využít až ze 100 %. Jeden z možných způsobů provedení pro vzduchové systémy je znázorněn na obr. 6, kde vnitřní jednotka klimatizace obsahuje dva výměníky. Jeden pro chlazení kompresorovým okruhem a druhý pro nepřímé volné chlazení. Z venkovní jednotky, kterou může být např. suchý chladič, je navíc vedena potrubní trasa do ekonomizéru parního kompresorového okruhu. Teplotní úroveň teplotonosné látky na výstupu z vnitřní jednotky klimatizace bude typicky o 3 až 5 K nižší, než je přívodní teplota chladicí látky pro servery.



Obr. 6 Nepřímé volné chlazení [27]

Vodní volné chlazení

Pracuje na obdobném principu jako vzduchové nepřímé volné chlazení s tím rozdílem, že přirozeným zdrojem chladu není venkovní vzduch, ale vodní plochy či řeky. Výstupní teploty na výstupu z chladiče budou typicky opět o 3 až 5 K nižší než přívodní teplota chladicí látky pro servery. Schematicky je realizace zobrazena na obr. 7. Nevýhodami tohoto systému jsou potřeba filtrace a úprava používané vody podobně jako u přímého vzduchového volného chlazení. Další překážkou mohou být legislativní omezení v souvislosti s nadměrným ohřevem zdrojové vody.



Obr. 7 Vodní volné chlazení [28]

2 Existující systémy VOT

Na technologie VOT je možné nahlížet ze dvou směrů. První z nich je způsob zachycení odpadního tepla na straně produkce, který je obvykle realizován vhodnou úpravou chladicího systému. Jak již bylo uvedeno, systémy chlazení jsou pouze podpůrnými systémy, jejichž úkolem je zajištění optimálních podmínek pro primární funkci DC, tj. zpracování a přenos dat. Při implementaci zařízení pro VOT tedy nesmí dojít k ohrožení těchto primárních funkcí. Kromě omezení provozního charakteru je nutné zahrnout také limity vztahující se k zařízením používaných v systémech VOT. Mezi ně patří například maximální dosažitelná teplotní úroveň odpadního tepla anebo omezení v souvislosti s bezpečnostními požadavky. Druhý úhel pohledu představuje perspektivu odběratele odpadního tepla. Teplo může být využíváno za účelem vytápění či přípravy teplé vody v budovách anebo přímo v DC, například pro předehřev v rámci dílčích technologických celků. O možnostech na straně spotřeby odpadního tepla rozhoduje kromě uspořádání systému chlazení také vzájemná vzdálenost mezi DC a odběratelem.

2.1 Technologie VOT (strana produkce)

V této sekci jsou popsány možnosti implementace technologie VOT do systému chlazení DC. Na straně produkce lze rozlišit dvě skupiny technologií VOT. Primárně je odpadní teplo využíváno dále ve formě tepla, takže implementované technologie VOT slouží obvykle k propojení spotřebitelského okruhu a systému chlazení v DC. Méně časté jsou technologie, které z odpadního tepla generují elektřinu. Nízké využití je dáno zejména malými účinnostmi těchto systémů, složitostí atp. Z toho důvodu se sekce zaměřuje zejména na VOT pro další využití ve formě tepla.

2.1.1 Implementace v rámci kapalinného chlazení

Z hlediska technologie VOT se jedná o nejjednodušší možný případ implementace. Vzhledem k poměrně vysokým výstupním teplotám teplotnosné látky ze serverů je obvykle možné využívat teplo přímo bez navyšování teplotní úrovně [29]. Technologie VOT je

standardně realizována tepelným výměníkem připojeným na výstup z CDU nebo zdroje chladu. V případě kapalinného chlazení provozovaného na nízkých výstupních teplotách, jsou způsoby implementace systému VOT obdobné jako pro vzduchové systémy, které jsou popsány dále.

2.1.2 Implementace v rámci vzduchového chlazení

Implementace na straně vzduchu

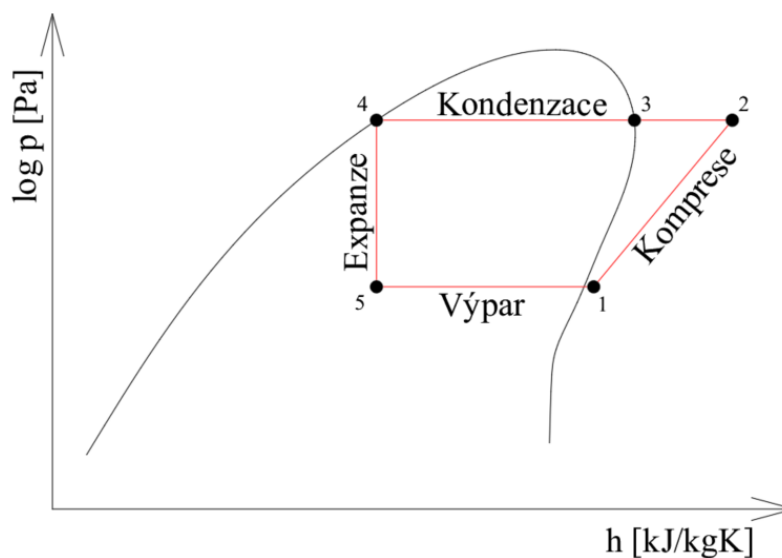
Nezávisle na konkrétním vzduchovém systému v DC lze využít ohřátého vzduchu v teplé uličce přes tepelný výměník typu vzduch/kapalina. Předehřátou kapalinu je možné buď přímo využít při nižších nárocích na teplotu (přibližně do 40 °C), nebo vést do tepelného čerpadla typu voda/voda, kde bude teplotní úroveň navýšena na požadovanou teplotu. Kapalina s požadovanými parametry dále distribuuje teplo do navazujícího systému [16]. Z hlediska DC znamená toto řešení zvýšení spotřeby ventilátorů v důsledku přidání tepelného výměníku, který představuje tlakovou ztrátu. Majoritní vliv na spotřebu však bude mít provoz tepelného čerpadla, je-li využíváno. V případě implementace tohoto řešení také může teoreticky hrozit riziko vzniku kondenzátu. Vzhledem k nutnosti umístění tepelného výměníku v prostoru datového sálu je nezbytné přijmout při návrhu technologie bezpečnostní opatření tak, aby nebyl ohrožen chod ICT.

Implementace pro vodou chlazený zdroj chladu

V případě použití CRAH jednotky a vodou chlazeného zdroje chladu lze implementaci řešit přidáním tepelného výměníku typu kapalina/kapalina paralelně na okruh mezi zdroj chladu a vzduchem chlazený kondenzátor [16]. Opět je možné získané teplo přímo využít na nižší teplotní hladině (přibližně do 70 °C) nebo zvyšovat teplotní potenciál tepelným čerpadlem typu voda/voda, jako v předchozím případě. Z hlediska spotřeby energie DC představuje tepelný výměník tlakový odpor, což znamená vyšší náklady na čerpací práci. Dále obdobně jako u předchozí varianty má zásadní vliv na spotřebu tepelné čerpadlo.

Implementace pro vzduchem chlazený zdroj chladu

Řešení pro konfiguraci CRAH jednotka a vzduchem chlazený zdroj chladu nebo CRAC jednotka a vzduchem chlazený kondenzátor je složitější než předchozí. V těchto případech je nutné implementovat tepelný výměník typu chladivo/kapalina do parního kompresorového okruhu. Tento tepelný výměník může fungovat buď jako tzv. „desuperheater“, který odebírá převážně citelné teplo v oblasti přehřátých par (body 2 až 3 v obr. 8), nebo jako kondenzátor, který odebírá i významnou část latentního tepla (body 2 až 4 v obr. 8). Rozdíl je v podílu získané energie, výměník zapojený jako kondenzátor umožňuje získat přibližně 85 %, zatímco druhá konfigurace cca 30 %, ale na vyšší teplotní hladině. Teplota výstupní kapaliny pro využití v navazující technologii může dosahovat až 70 °C (pro „desuperheater“) [18]. Omezením tohoto způsobu je, že pro stávající chladicí systémy, kde tato technologie VOT nebyla uvažovaná ani pro budoucí etapy, je nutný zásah do chladivového okruhu. Pro takovou implementaci je nutné znát velice podrobně charakteristiky chladivového okruhu, záleží také na používaném chladivu a mazném oleji kompresoru, který musí umožnit dostatečné přehřátí atp.



Obr. 8 Parní kompresorový okruh (p-h diagram)

Implementace pro nepřímé volné chlazení

Implementace technologie do okruhu nepřímého volného chlazení pro vzduchem chlazené DC je možná, ale teplotní potenciál pro přímé využití je velice nízký (přibližně do 23 °C).

Zpravidla je nutné teplotu zvýšit připojením tepelného čerpadla typu voda/voda za výstup z výměníku vnitřní jednotky klimatizace. Tento systém však předpokládá, že alespoň část odpadního tepla bude odváděna volným chlazením, v opačném případě se totiž nejedná o implementaci do systému volného chlazení, ale spíše o obdobu tepelného výměníku v teplé uličce.

2.1.3 Sorpční chlazení

Sorpční chlazení představuje speciální případ technologie VOT, která umožňuje odpadní teplo využít přímo v DC. Jedná se o způsob výroby chladu z ohřevu, při kterém sorpce a desorpce plní podobnou funkci jako kompresor. V rámci DC může být sorpční chlazení výhodně použito při kombinaci kapalinného a vzduchového chlazení. Zpětné potrubí od kapalinou chlazených zařízení ICT je vedeno přes výměník ohříváče adsorpčního zdroje chladu, který vyrábí chlad pro vzduchový systém [24]. Minimální teplota na přívodu do ohříváče však musí být vyšší než přibližně 70 °C [30], což už může být v rozporu s požadavky ICT.

2.1.4 Ostatní

Mezi další možnosti technologie VOT z hlediska strany produkce je výroba elektřiny. Obecně však tyto technologie nejsou příliš běžné, protože dosahují poměrně nízkých účinností. Dalším důvodem nízkého využití je také potřeba relativně vysokých teplot (minimálně 65 °C) anebo příliš dlouhá doba návratnosti. Konkrétně se jedná o technologie využívající [29]:

- Organický Rankinův cyklus (ORC)
- Piezoelektrický jev
- Termoelektrický jev

2.2 Limity VOT

Jedním z možných limitujících faktorů VOT na straně produkce je maximální možná teplota vystupující teplotnosné látky. Teplotní potenciál je obvykle navyšován tepelným čerpadlem typu voda/voda, kde hlavní vliv na maximální dosahovanou teplotu má použité chladivo a případně typ kompresoru. Ve studii [31] autoři uvádějí sumarizační tabulku, ve které jsou uvedeny parametry tepelných čerpadel od různých výrobců, viz obr. 9.

Manufacturer	Product	Refrigerant	Max. heat sink temperature	Heating capacity	Compressor type
Kobe Steel (Kobelco steam grow heat pump)	SGH 165	R134a/R245fa	165 °C	70 to 660 kW	Twin screw
	SGH 120	R245fa	120 °C	70 to 370 kW	
	HEM-HR90,-90A	R134a/R245fa	90 °C	70 to 230 kW	
Vicking Heating Engines AS	HeatBooster S4	R1336mzz(Z) R245fa	150 °C	28 to 188 kW	Piston
Ochsner	IWWDS R2R3b	R134a/ÖKO1	130 °C	170 to 750 kW	Screw
	IWWDS ER3b	ÖKO (R245fa)	130 °C	170 to 750 kW	
	IWWHS ER3b	ÖKO (R245fa)	95 °C	60 to 850 kW	
Hybrid Energy	Hybrid Heat Pump	R717/R718 (NH ₃ /H ₂ O)	120 °C	0.25 to 2.5 MW	Piston
Mayekawa	Eco Sirocco	R744 (CO ₂)	120 °C	65 to 90 kW	Screw
	Eco Cute Unimo	R744 (CO ₂)	90 °C	45 to 110 kW	
Combitherm	HWW 245fa	R245fa	120 °C	62 to 252 kW	Piston
	HWW R1234ze	R1234ze(E)	95 °C	85 to 1301 kW	
Dürr thermea	thermeco ₂	R744 (CO ₂)	110 °C	51 to 2'200 kW	Piston (up to 6 in parallel)
Friotherm	Unitop 22	R1234ze(E)	95 °C	0.6 to 3.6 MW	Turbo (two-stage)
	Unitop 50	R134a	90 °C	9 to 20 MW	
Star Refrigeration	Neatpump	R717 (NH ₃)	90 °C	0.35 to 15 MW	Screw (Vilter VSSH 76 bar)
GEA Refrigeration	GEA Grasso FX P 63 bar	R717 (NH ₃)	90 °C	2 to 4.5 MW	Twin screw (63 bar)
Johnson Controls	HeatPAC HPX	R717 (NH ₃)	90 °C	326 to 1'324 kW	Piston (60 bar)
	HeatPAC Screw	R717 (NH ₃)	90 °C	230 to 1'315 kW	Screw
	Titan OM	R134a	90 °C	5 to 20 MW	Turbo
Mitsubishi	ETW-L	R134a	90 °C	340 to 600 kW	Turbo (two-stage)
Viessmann	Vitocal 350-HT Pro	R1234ze(E)	90 °C	148 to 390 kW	Piston (2–3 in parallel)

Obr. 9 Parametry tepelných čerpadel pro VOT [31]

Z tabulky vyplývá, že výstupní teplota v oblasti komerčně vyráběných tepelných čerpadel je omezena a je do určité míry svázána s maximálním tepelným výkonem. Horní mez výstupní teploty se pohybuje okolo hodnoty **165 °C**. Zároveň je ale také možné si všimnout, že poměrně velká část výrobců nenabízí vyšší výstupní teplotu než 90 °C. Toto je pravděpodobně dáno trendy na straně odběru, které díky zlepšování tepelně technických vlastností budov nevyžadují tak vysoké přírodní teploty.

Dalším omezujícím faktorem pak mohou být samotná chladiva, a to v návaznosti na jejich bezpečnostní a ekologické limity. Chladiva jsou posuzována na základě jejich toxicity, hořlavosti a ukazatele GWP (z anglického Global Warming Potential). Toxicitu lze posuzovat podle parametrů ATEL (akutní expoziční limit) a ODL (mezní hodnota nedostatku kyslíku). Pro hodnocení je používán nižší z obou parametrů a podle toho jsou rozdělena do dvou skupin [32]:

- Skupina A: nízká toxicita
- Skupina B: vysoká toxicita

Z hlediska hořlavosti jsou chladiva rozdělena podle ukazatele LFL (spodní limit hořlavosti) do čtyř tříd [32]:

- Třída 1: nehořlavá
- Třída 2L: mírně hořlavá
- Třída 2: hořlavá
- Třída 3: vysoce hořlavá

Posledním kritériem je ekologický ukazatel GWP, který udává ekvivalentní emise CO₂ v tunách vztažené na jeden kilogram chladiva. Aktuální limity (k roku 2023) jsou nastaveny na maximální hodnotu GWP rovnou 2500.

Ve skupině tepelných čerpadel s výstupní teplotou do 90 °C jsou nejčastěji používána chladiva s označením R134a, R717, R744 a R1234ze. Jejich zařazení podle zavedených kritérií je zobrazeno v tabulce 1. Z uvedených hodnot vyplývá, že většina používaných chladiv je netoxická a mírně hořlavá. I tak ale v některých případech může být implementace technologie VOT velmi komplikovaná. Bezpečnostní opatření se totiž mj. odvíjí od konkrétního umístění zařízení dle kategorie daného prostoru a kategorie přístupu k zařízení. Podrobný popis výpočetních vztahů a klasifikace prostoru a přístupu lze dohledat v normě ČSN EN 378 1-4 [32].

Tab. 1 Parametry chladiv [33]

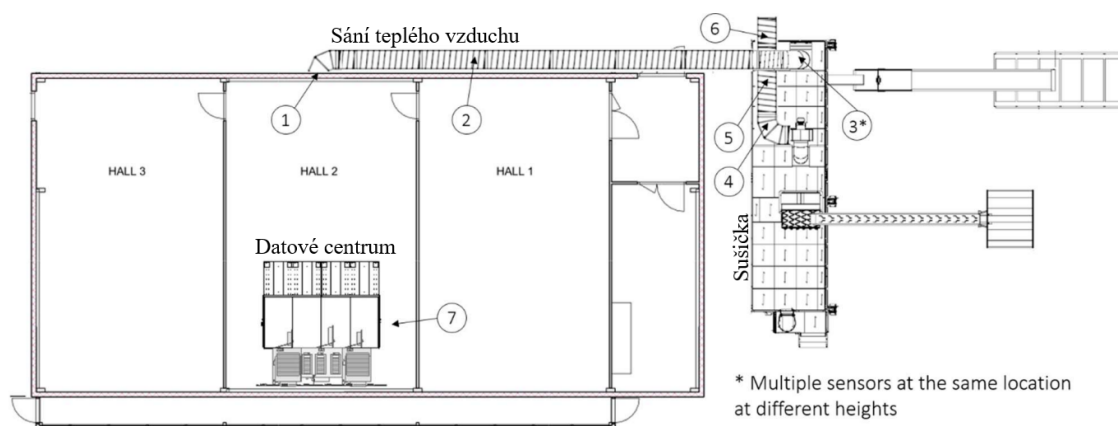
Chladivo	GWP	Bezpečnost
R134a	1430	A1
R717	0	B2L
R774	1	A2L
R1234ze	6	A2L

2.3 Možnosti pro VOT (strana spotřeby)

Ačkoliv v předchozí kapitole bylo popsáno, že kapalinné chlazení má mnohem vyšší potenciál pro VOT, je tato sekce zaměřena na možnosti odběru tepla zejména pro vzduchové systémy chlazení. Důvodem je skutečnost, že naprostá většina DC v současnosti tento typ chlazení využívá [8]. Nicméně je vhodné poznamenat, že ačkoliv jsou níže uváděné možnosti koncipovány pro vzduchem chlazená DC, většinu z těchto variant je možné s mírnými úpravami (často zjednodušujícími) využít i v kapalinných systémech.

2.3.1 Sušení biomasy

Sušení biomasy je jednou z možností VOT, kde není zapotřebí zvyšovat teplotní úroveň odpadního tepla. Je realizováno ohřátým vzduchem z oddělené teplé uličky, který je distribuován vzduchovody do prostoru sušičky. Technické řešení je poměrně komplikované a vyžaduje jednak vhodné lokální podmínky a také, aby byl při návrhu systému chlazení DC tento způsob VOT zohledněn. Příkladem je projekt Artiq-DC [34], jehož zjednodušený půdorys je zobrazen níže (obr. 10). Výsledná zpráva projektu popisuje, že dle očekávání ovlivňuje vyšší teplota v DC pozitivně výkon vysoušení, podobně jako vyšší průtok vzduchu. Na sušení biomasy je možné využít přibližně 30 % odpadního tepla DC.



Obr. 10 VOT: sušení biomasy [34]

2.3.2 Předehřev

Jedná se opět o způsob VOT, kde není nezbytně nutné navýšovat teplotní úroveň odpadního tepla. V rámci technologií DC je možné uplatnit předehřev například pro záložní diesellové generátory, které musejí být neustále připraveny pro okamžité nahrazení zdroje v případě výpadku dodávky elektřiny. Tento koncept byl realizován v DC KPN v Nizozemsku, kde bylo prokázáno výrazné navýšení celkové energetické účinnosti [35]. Další možností je teplo distribuovat mimo hranici DC, v takovém případě se prakticky jedná o dálkové vytápění s tím rozdílem, že požadovaná přívodní teplota může být nižší než v případě vytápění. Teplotní úroveň se odvíjí od konkrétní aplikace a požadavků technologie. Jednou z možností je například předehřev pro přípravu teplé vody, jak uvádí studie [29].

2.3.3 Centralizované zásobování teplem

Z hlediska DC je tento způsob VOT problematický kvůli nutnosti distribuovat teplo na poměrně vysoké teplotní úrovni. Pro vzduchem chlazená DC je nezbytné volit takové způsoby implementace, které umožní vyšší nároky na teploty splnit. Motivací pro začleňování DC do sítí centralizovaného zásobování teplem (CZT) je dekarbonizace zdrojů CZT [36]. Kromě snížení dopadů na životní prostředí ze strany zdroje tepla může implementace do sítí CZT ovlivnit i koncové odběratele. Například pro ČR je konverzní faktor primární energie odpadního tepla roven nule, což se v případě vytápění odpadním teplem z DC projeví pozitivně v hodnocení energetické náročnosti budovy [37].

V publikaci [38] se autoři zabývají dopady VOT pro soustavu CZT jak z hlediska DC, tak z hlediska provozovatele sítě CZT. Ve studii bylo na základě simulační analýzy zjištěno, že úspory na straně provozovatele sítě CZT rostou se zvyšujícím se podílem odpadního tepla. Z hlediska DC technologie VOT zvyšuje celkovou energetickou účinnost nezávisle na původní účinnosti. Parametry pro VOT byly nastaveny na konstantní přívodní teplotu 87 °C z DC do sítě CZT, ačkoli ve skutečnosti se teplota mění dle venkovní teploty. Studie uvádí, že zavedení konstantní teploty distribuce generuje pouze malou chybu výsledků. Na základě ekonomicky zaměřené studie [39] je možné rozdělit vzduchem chlazená DC do kategorií podle tepelné zátěže, kde každá kategorie vykazuje jiný potenciál pro VOT v sítích CZT. Teplotní úroveň distribuce do sítě ve studii byla předpokládána konstantní a její hodnota byla 80 °C. Kategorie DC jsou uvedeny v následujícím seznamu.

- Malá DC: 50 serverových skříní, generují přibližně 200 kW odpadního tepelného výkonu. Pro CZT je investice příliš riskantní, ale v případě spojení více malých DC by se mohlo jednat o technicky i ekonomicky proveditelnou variantu. Studie však nezahrnuje perspektivu provozovatele CZT.
- Střední DC: 500 serverových skříní, generují přibližně 2 MW odpadního tepelného výkonu. Pro CZT se jedná o hraniční velikosti DC z hlediska rizika investice. Koeficient vnitřního výnosového procenta (IRR) se pro nejhorší variantu pohybuje kolem 8,2 % a je tedy pro některé společnosti vyšší než vážený průměr nákladu kapitálu (WACC). Zjednodušeně lze říci, že pokud je IRR vyšší než WACC, projekt je z ekonomického hlediska realizovatelný.
- Velká DC: 5000 serverových skříní, generují přibližně 20 MW odpadního tepelného výkonu. Pro CZT obecně vhodná.

Uvedené rozdělení však ve výpočtech nezahrnuje možné ekologické přínosy VOT. Ve studii [40], která je lokalizována do Číny, je popsán dopad VOT pro nahrazení části dodávek tepla ze spalování uhlí. Výsledky studie ukazují, že při započtení environmentálních benefitů (snížení emisí CO₂, NO_x a SO₂) se koeficient IRR navýšil o cca 3,5 %.

Ve studii [16] se autoři zabývají porovnáním možných implementací VOT pro síť CZT. Nominální tepelná zátěž studovaného DC byla 1 MW a požadovaná konstantní teplotní hladina pro distribuci 90 °C. V DC byl systém klimatizace realizován pomocí vzduchem chlazeného zdroje chladu a CRAH, resp. „rear door“ systémem. Pravděpodobně vzhledem k lokalitě (Španělsko) není ve studii uvažováno volné chlazení. Studie se zabývá třemi variantami VOT pro distribuci do sítě CZT, kdy ve všech případech bylo použito stejné tepelné čerpadlo typu voda/voda pro navýšení teplotní úrovně.

- Zapojení tepelného výměníku typu vzduch/kapalina do teplé uličky DC
- Zapojení tepelného výměníku typu chladio/kapalina před kondenzátor zdroje chladu v systému s CRAH jednotkami
- Zapojení tepelného výměníku typu chladio/kapalina před kondenzátor zdroje chladu v systému „rear door“

Z výsledků publikace vyplývá, že implementace technologie VOT může při maximálním využití zvýšit ukazatel PUE z 1,7 na 2,2. Ukazatel PUE bude podrobněji popsán později,

ale zjednodušeně lze uvést, že zvýšení PUE o 0,5 představuje výrazné zvýšení spotřeby energie DC. Dále také uvádí, že jako nejvýhodnější varianta z hlediska poměru dodaného tepla vůči nutné investici vychází zapojení výměníku typu vzduch/kapalina do teplé uličky.

2.3.4 Nízkoteplotní CZT

V posledních letech je věnována velká pozornost systémům CZT s nízkou teplotou teplosnosné látky. Tyto systémy jsou někdy také nazývány jako CZT 4., resp. 5. generace. Sítě 4. generace pracují s teplotou na přívodu okolo 50 °C, a tak nevyžadují od koncových uživatelů další zařízení na zvyšování teplotní úrovně teplosnosné látky. U systémů 5. generace mohou klesat teploty na přívodu až ke 30 °C. Primárně zajišťují zejména vytápění objektu a pro přípravu teplé vody je nutné buď tepelné čerpadlo typu voda/voda, nebo je řešena jiným systémem [41].

Výhodou nízkých teplot v sítích CZT jsou zejména nízké tepelné ztráty a v případě využití tepelného čerpadla typu voda/voda výrazně vyšší topný faktor než u běžných alternativ zdrojů tepla. Je ale zapotřebí, aby zásobovaný objekt byl technicky způsobilý pro nízkoteplotní vytápění. V současné době jsou z toho důvodu sítě nízkoteplotních CZT (zejména 5. generace) spíše záležitostí výzkumu. Z hlediska VOT z DC se jedná o výhodný koncept, protože požadavky na vysoké teploty jsou problematické z hlediska technické i ekonomické proveditelnosti, jak již bylo uvedeno v předchozí sekci.

3 Popis studovaného DC

V této kapitole je uveden popis DC společnosti OptoNet Communication, lokalizovaného poblíž města Jihlavy v Kraji Vysočina, a také způsob implementace technologie VOT do systému chlazení. Dále jsou v kapitole uvedeny předpokládané provozní charakteristiky pro DC i pro stranu spotřeby odpadního tepla. Z hlediska rozdělení dle výše uvedené studie [39] lze zařadit DC společnosti OptoNet Communication mezi malá DC, protože nominální příkon ICT je navržen na přibližně 500 kW. Záměr studie předpokládá lokální VOT v koncepci nahrazení standardních zdrojů tepla pro administrativní nebo rezidenční budovy v okruhu 500 m od DC. Základní premisou tohoto konceptu je, že odpadní teplo představuje jediný zdroj tepla pro odběratele. Studie se zabývá výzkumem vlivu systému VOT na spotřebu DC pro případ, že budou respektovány odběrové profily budov a zároveň bude omezen maximální dodávaný výkon s ohledem na maximální předpokládaný dosah distribuce.

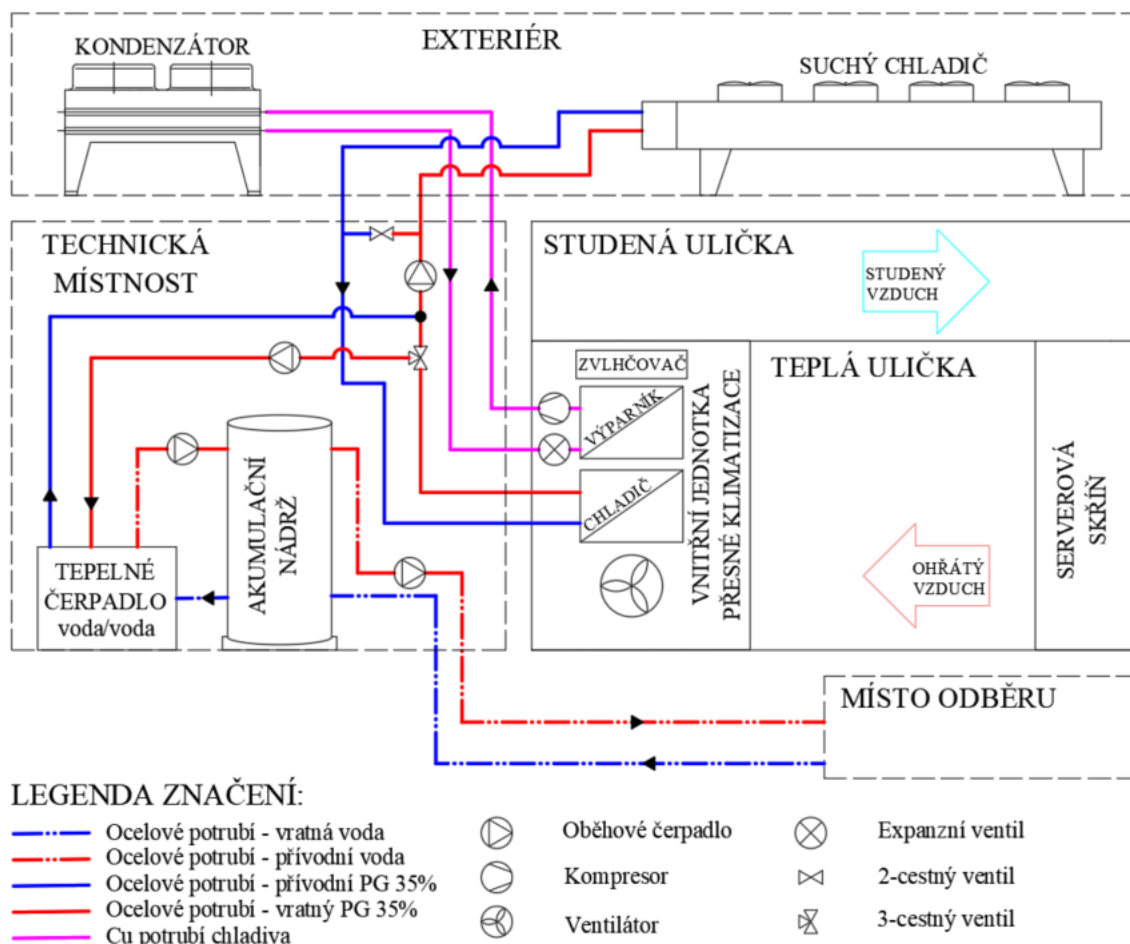
3.1 Datové centrum

Ve studovaném DC je fyzické uspořádání technologií řešeno následujícím způsobem. Výpočetní technika je umístěna ve dvou technologicky shodných datových sálech, kde maximální návrhová tepelná zátěž každého sálu je 265 kW. Odvod tepelné zátěže je řešen vzduchovým systémem chlazení v konfiguraci oddělené studené uličky. Chladný vzduch je z vnitřních jednotek přesné klimatizace vydechován do zdvojeného stropu datového sálu, odkud je nasáván serverovými skříněmi a vydechován do prostoru datového sálu. Vnitřní jednotky klimatizace umístěné po straně datového sálu obsahují výparník, dva kompresory s invertorem, elektronický expanzní ventil a výměník pro okruh volného chlazení (konkrétní specifikace viz příloha I). Dvě jednotky v každém datovém sálu jsou navíc osazeny zvlhčovačem. Každé vnitřní jednotce náleží jeden venkovní, vzduchem chlazený kondenzátor, umístěný na střeše objektu. Jednotky pracují s maximálním výkonem 55 kW na jednotku s redundancí N+1. Do obou datových sálů je tedy dohromady navrženo 12 jednotek. Teplotní poměry v DC jsou navrženy na teplotu 23 °C přírodního vzduchu k serverům a teplotu 35 °C vratného vzduchu do vnitřní jednotky. Volné chlazení je zajištěno celkem

pěti suchými chladiči (specifikace viz příloha II), umístěnými taktéž na střeše objektu. Teplosná látka okruhu volného chlazení je nemrznoucí směs (35% propylenglykol). Volné chlazení funguje bez redundance (N+0) a přenášený chladicí výkon na jednu jednotku je 44 kW. Teplotní spád v okruhu je navržen přibližně na 5 K (15/20 °C).

3.1.1 Implementace systému VOT

Pro simulační analýzu bylo zvoleno VOT distribuční sítí, která představuje jediný zdroj tepla pro potřeby vytápění a případně přípravy teplé vody dle odběrového profilu budovy. Z hlediska implementace do výše popsaného systému chlazení v DC existuje několik variant provedení. Na základě studie [16] byla zvolena varianta implementace VOT do okruhu volného chlazení. Výhodou tohoto řešení je maximální využití již navržených komponent, zároveň není nutný jakýkoli zásah do prostoru datového sálu, čímž se minimalizují bezpečnostní rizika. Zjednodušené schematické znázornění implementace zvolené technologie VOT je uvedeno na obr. 11. Pro přehlednost jsou ze schématu vynechána duplicitní zařízení, aby bylo možné snadno rozlišit dílčí systémy. Technologie systému VOT se skládá z tepelného čerpadla typu voda/voda, akumulární nádrže, oběhových čerpadel a distribuční sítě do místa odběru. Dále je ve schématu zobrazena také koncepce systému chlazení DC, která byla popsána výše.



Obr. 11 Schéma zapojení systému VOT

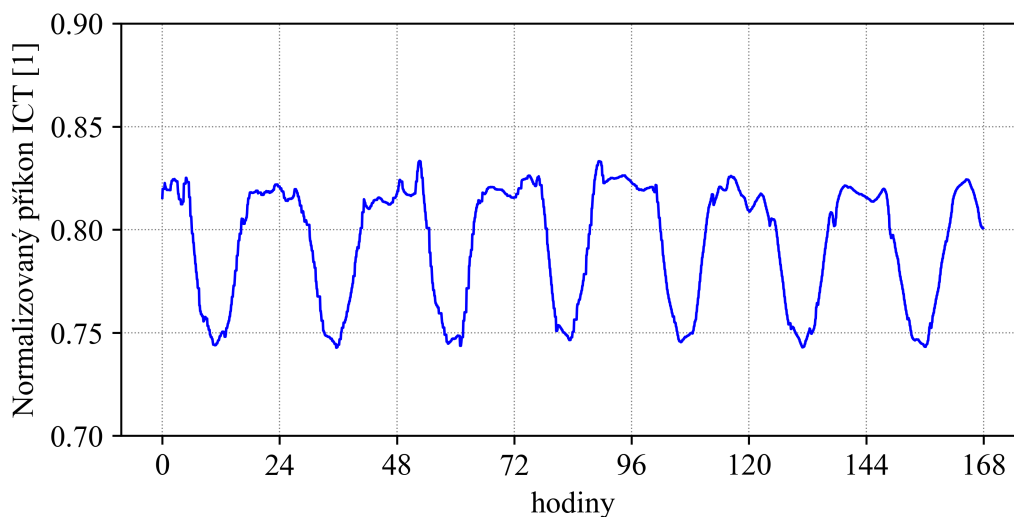
3.2 Provozní předpoklady

Tato sekce se zabývá popisem zvoleného profilu příkonu ICT, který je v rámci DC zásadní z hlediska provozu jednotlivých zařízení anebo dílčích částí systému chlazení. Následně jsou zde uvedeny spotřebitelské charakteristiky pro systém VOT. Ty obsahují popis zvolených odběrových profilů spotřebitelů odpadního tepla a také charakteristiky alternativ zdrojů tepla, se kterými je v navazujících částech práce systém VOT porovnáván.

3.2.1 Profil příkonu ICT

Ve studii jsou z hlediska DC sledovány zejména spotřeby zařízení systému klimatizace, tj. ventilátory, kompresory, suché chladiče, zvlhčovače atp. Provozní charakteristiky těchto

zařízení se odvíjí zejména od teplotních poměrů, kde významnou roli hraje také profil příkonu ICT, resp. profil tepelné zátěže v datovém sálu. Profil je zvolený na základě předpokládaného typu provozu studovaného DC a pro období jednoho týdne je zobrazen na obr. 12. Je možné si všimnout, že křivka profilu je poměrně ustálená a v žádném bodě není dosaženo maximální hodnoty normalizovaného příkonu. Toto chování je typické pro DC, která nabízejí výpočetní kapacitu pro větší množství zákazníků.



Obr. 12 Profil příkonu ICT

3.2.2 Spotřebitelské charakteristiky

Kromě energetické bilance z hlediska DC je pro vyhodnocení systému VOT nedílnou součástí také vyhodnocení bilance na straně spotřebitelů odpadního tepla. Za tímto účelem byly definovány hypotetické provozní varianty jak pro různé odběrové profily, tak i pro alternativy zdrojů tepla a různé teplotní úrovně dodávaného tepla. Teplo je využíváno za účelem vytápění a případně přípravy teplé vody (TV) v budovách. Zahrnuté varianty včetně uvažovaných parametrů jsou shrnuty v tabulce 2, kde KK ZP značí kondenzační kotel na zemní plyn a TČ A-W značí tepelné čerpadlo typu vzduch/voda.

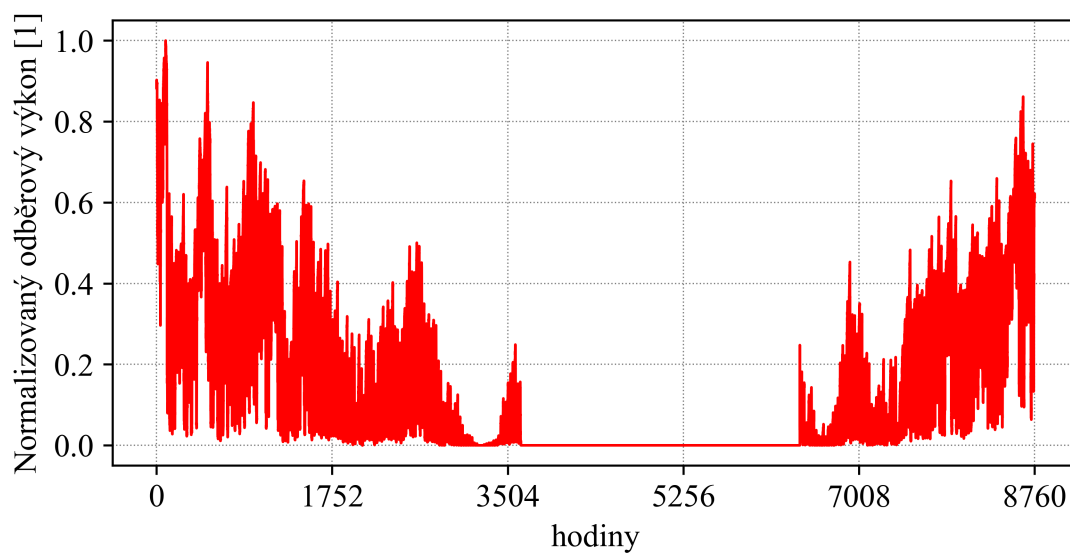
Zkoumané případy jsou rozděleny dle několika faktorů. V první řadě je tvar odběrového profilu, který je dán typem budovy. Zatímco v případě rezidenčních budov je nutné zahrnout i energii potřebnou na přípravu TV, v oblasti administrativních budov je příprava teplé vody řešena obvykle lokálně elektrickými průtokovými ohříváči se zanedbatelnou spotřebou oproti spotřebě tepla na vytápění a do simulační analýzy tedy není zahrnuta.

Tab. 2 Spotřebitelé odpadního tepla

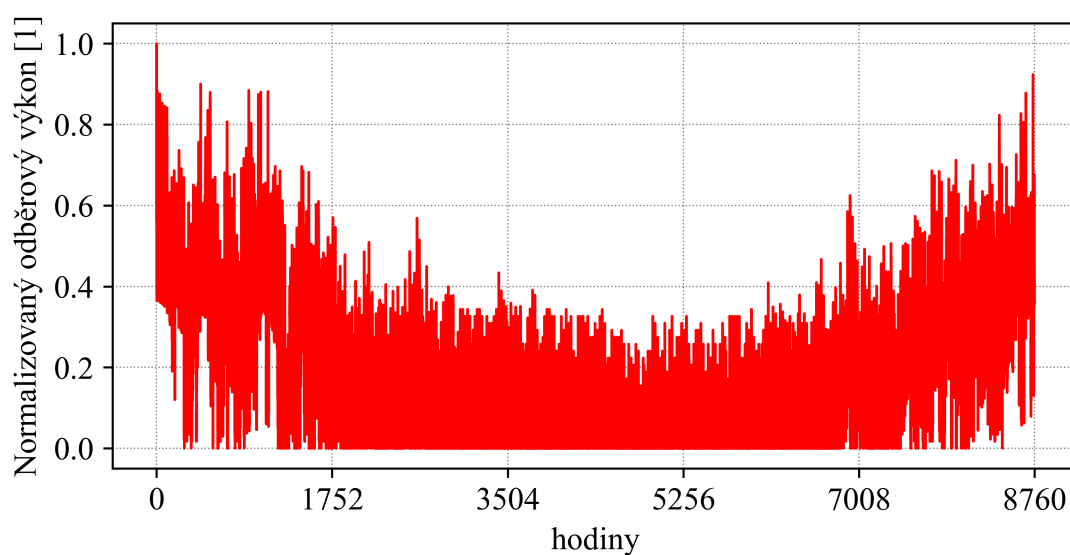
Typ budovy	Teplotní úroveň	Zdroj tepla	Příprava TV
Administrativní (AB)	55 °C	KK ZP / TČ A-W	NE
Rezidenční soudobé zástavby (RBsou)	65 °C	KK ZP / TČ A-W	ANO
Rezidenční starší zástavby (RBst)	75 °C	KK ZP / TČ A-W	ANO

Odběrový profil rezidenční budovy je pro oba případy stejný a liší se pouze teplotní úrovní. U rezidenční budovy soudobé zástavby jsou předpokládány lepší tepelně technické vlastnosti oproti rezidenční budově starší zástavby, a proto je možné dodávat teplo na nižší teplotní úrovni. Dále je v letních měsících, tzn. červen, červenec a srpen, pro oba typy rezidenční budovy snížena teplotní úroveň dodávky tepla na 60 °C, protože je předpokládáno, že tato teplota bude dostatečná pro přípravu TV. Uváděné provozní varianty mají za cíl vyhodnotit dopady systému VOT pro širší spektrum teplotních úrovní dodávaného tepla, a případně nalézt limity, pro které jsou systémy VOT výhodnější než běžně používané zdroje tepla. Uvažované odběrové profily pro administrativní a rezidenční budovu jsou uvedeny na obr. 13 a obr. 14.

Z hlediska zdroje tepla jsou posuzovány varianty v podobě kondenzačního kotle na zemní plyn (KK ZP) a tepelného čerpadla typu vzduch/voda (TČ A-W), která jsou aktuálně velmi široce využívána. Protože porovnání energetické bilance je v této práci založeno na ročních úhrnech, lze s dostatečnou přesností referenční údaje pro zdroj TČ A-W odvozovat na základě odběrového profilu a sezónního topného faktoru (SCOP), viz tabulka 3. Rozsah SCOP je určen na základě jednoduché analýzy většího množství typů TČ A-W pro rezidenční i administrativní budovy v návrhovém softwaru výrobce STIEBEL ELTRON [42]. Uvedené hodnoty SCOP odpovídají sledovanému období jeden rok a pro rezidenční budovy odpovídají poměru mezi potřebou tepla na vytápění a potřebou tepla na přípravu TV přibližně 60:40, což je ve shodě s uvažovaným odběrovým profilem. Pro KK ZP je v práci určen normovaný stupeň využití (η_n), který je svým rozsahem shodný pro všechny varianty typů budov (viz tab. 3).



Obr. 13 Profil odběru administrativní budovy



Obr. 14 Profil odběru rezidenční budovy

Tab. 3 Charakteristiky zdrojů tepla

Typ budovy	SCOP	η_n
AB	2,8 až 3,5	1 až 1,08
RBsou	2,3 až 2,8	1 až 1,08
RBst	2,1 až 2,4	1 až 1,08

4 Postup vyhodnocení účinnosti VOT

Tato kapitola se zabývá představením možných simulačních softwarů, které umožňují provedení simulační analýzy VOT v DC, zejména pak softwaru TRNSYS, který byl nakonec vybrán pro účely simulační analýzy v této práci. Následně jsou popisovány klíčové indikátory, které jsou dále použity ve výsledkové části pro vyhodnocení účinnosti VOT a pro ověření kvality simulačního modelu. Závěr kapitoly je věnován popisu postupu při volbě studovaných scénářů, ilustrovanému souhrnným schématickým znázorněním. Simulační analýza zahrnuje popsání dohromady devíti různých variant provozu, které jsou pro přehlednost jednoznačně označeny pro další rozbor ve výsledkové části.

4.1 Nástroje pro simulační analýzu

Dynamické energetické simulace DC představují vysoký potenciál pro zhodnocení přínosů inovativních řešení v oblasti technologií DC a nabízejí také pokročilé možnosti optimalizace řízení spotřeby v tomto sektoru. Jejich hlavní výhodou je možnost v krátkém čase vyhodnotit charakteristiky různých provozních scénářů a poskytnout investorovi velmi přesné podklady o výhodách a limitujících faktorech jednotlivých řešení. V oblasti systémů VOT jsou dynamické energetické simulace jedním z hlavních zdrojů informací o proveditelnosti, protože se jedná o zatím v praxi málo aplikovaný koncept.

4.1.1 Rozbor nástrojů pro simulační analýzu

Pro tvorbu simulačních modelů v této práci byly zvažovány tři různé simulační nástroje. Prvním a pravděpodobně nejznámějším softwarem je Matlab Simulink, který je používán zejména pro úlohy optimalizace v oblasti systémů distribuce elektřiny a regulace DC, viz publikace [43], [44], [45]. Software není přímo uzpůsoben pro modelování systémů klimatizace a vzduchotechniky, nicméně existují rozšíření, která konvenční prvky těchto systémů obsahují. S tímto rozšířením je možné Matlab Simulink použít i pro výzkum v oblasti VOT, viz studie [46].

Druhou možností pro modelování DC a systémů VOT představuje software OpenModelica, který je založen na programovacím jazyce Modelica. I přes to, že program má volnou licenci, je možné dohledat poměrně velké množství knihoven přímo zaměřených na modelování systémů DC, jak uvádí studie [47]. Balíčky obsahují buď již sestavené modely technologických celků, nebo je možné systémy skládat z jednotlivých bloků. Nevýhodou je uživatelsky poměrně málo přívětivé prostředí a nutnost znalosti programovacího jazyka Modelica v případě potřeby komponent, které stávající knihovny neobsahují.

Posledním zvažovaným nástrojem pro energetické simulace je software TRNSYS. Jeho použití je uvedeno například v již dříve zmiňované studii [16], která se zabývala různými implementacemi VOT ve vzduchem chlazených DC. Kromě rozsáhlých knihoven předdefinovaných prvků pro systémy chlazení, vytápění a vzduchotechniky, nabízí také možnosti ze stran regulace a optimalizace nejen pro oblast DC. Lze dohledat poměrně velké množství publikací se zaměřením na optimalizaci řídicích a regulačních systémů, analýzu jednotlivých komponent systému chlazení anebo VOT, ve kterých je tento software využitý, např. studie [48], [49] a [50]. TRNSYS dále nabízí poměrně rozsáhlé možnosti kosimulace s různými dalšími softwary a programovacími jazyky, jako například ESP-r, Contam, Matlab, MS Excel anebo Python.

4.1.2 Použité nástroje

Na základě předchozí sekce, kde byly v krátkosti představeny možnosti simulačních nástrojů, byl zvolen software TRNSYS, protože pro oblast VOT nabízí nejširší knihovny validovaných komponent. TRNSYS byl původně navržen pro simulace v oblasti solárních systémů a až později byl rozšířen pro simulace různých dynamických systémů, mezi které se řadí analýzy chování budov, systémů klimatizace, větrání, vytápění atp.

Simulační software se skládá ze dvou hlavních částí. První z nich je výpočetní systém zvaný „jádro“, který čte a následně iterativně řeší sestavený matematický model, vykresluje proměnné a vyhodnocuje konvergenci [51]. Druhou částí je knihovna komponent, které se označují jako „Type xxx“, kde „xxx“ značí unikátní číslo dané komponenty. Například Type 924 představuje ventilátor se dvěma režimy nastavení průtoku vzduchu a příkonu. Obecně tyto prvky knihovny představují různě detailní matematické modely skutečných zařízení, která mohou fungovat buď samostatně nebo v propojení s ostatními.

TRNSYS zároveň umožňuje upravovat stávající prvky knihoven nebo vytvářet uživatelem definované komponenty. Podmínkou je, aby uživatelsky definovaný model umožňoval generovat dynamické knihovny neboli soubory s příponou „.dll“. Toho je možné docílit např. v programovacím jazyce Fortran, na kterém je TRNSYS založen, nebo v programovacích jazycích C, C++ nebo MS Visual Basic [51]. Tvorbu „deck file“, neboli souboru s definicí simulačního modelu, je možné provádět buď ručně v textovém editoru, nebo v grafickém rozhraní aplikace „Simulation Studio“, která je přímo součástí TRNSYS a je intuitivní a uživatelsky přívětivá. Jednotlivé komponenty jsou v aplikaci přidávány přesunutím z knihovny do prostoru modelu, kde mezi sebou mohou být dále propojovány.

K vyhodnocení výstupů ze softwaru TRNSYS byl použitý software PyCharm Community Edition, což je integrované vývojové prostředí pro programovací jazyk Python (verze 3.8). Tento software byl použitý zejména kvůli tomu, že umožňuje efektivně zpracovávat velké objemy dat, které výstupy simulační analýzy představují. Mezi další výhody tohoto softwaru patří uživatelsky přívětivé prostředí, volná licence a přenositelnost skriptů do jiných vývojových prostředí pro programovací jazyk Python, jako např. Visual Studio, Spyder atp.

4.2 Klíčové ukazatele

Indikátory určené k hodnocení energetických poměrů v DC a dopadů technologie VOT jsou:

- PUE: indikátor účinnosti využití energie v DC
- ERE: indikátor účinnosti využití energie se zahrnutím benefitů VOT
- ERF: poměr mezi využitým odpadním teplem a spotřebou energie DC

V akademické sféře jsou však obvykle pro zjednodušení uvažovány tzv. částečné indikátory. Ty se pak, alespoň v rámci akademických prací, většinou označují malým písmenem „p“ (z angl. partial) před vlastní zkratkou daného indikátoru. Takto označený indikátor obvykle zahrnuje namísto celkové spotřeby energie jen spotřeby dílčích technologických celků v DC. Obecně záleží na autorech dané studie, jaká zařízení do výpočtu uvedených indikátorů zahrnou. Dalšími ukazateli použitými v této práci jsou CO₂ ekvivalent a provozní úspora. Oba tyto ukazatele slouží zejména k porovnání systému VOT s alternativami

zdrojů tepla pro daný typ budovy, aby bylo možné vyhodnotit přínosy VOT. Konkrétní výpočtové vztahy a definice jednotlivých ukazatelů jsou popsány v následujících sekcích.

4.2.1 pPUE

Pravděpodobně nejznámějším ukazatelem pro určení energetické efektivity DC je PUE (z anglického Power Usage Effectiveness). Tento ukazatel vyjadřuje, kolik energie spotřebuje DC navíc k energii spotřebované IT zařízeními. Průměrná hodnota tohoto ukazatele byla v roce 2021 dle průzkumu UptimeInstitute [8] 1,57. To znamená, že přibližně 60 % spotřebované energie v DC bylo využito na zařízení ICT.

Ačkoliv se ukazatel PUE hojně vyskytuje v širokém spektru publikací, je do určité míry zavádějící. PUE totiž nevyjadřuje efektivitu DC jako celku, ale pouze podíl spotřeby ICT a ostatních zařízení. Není možné pomocí něj korektně hodnotit energetickou vyspělost DC, protože neobsahuje informaci o účinnosti ICT zařízení a stejně tak ani informaci o (ne)obnovitelnosti zdroje energie. Nedostatkem je i fakt, že rozdíl mezi projektovaným a skutečně naměřeným PUE je běžně i více než 50 %. Toto je obvykle způsobeno zejména výrazně nižší tepelnou zátěží od ICT, než na kterou je systém klimatizace navržen. Zejména v komerčním sektoru je také možné se často setkat s nekorektním značením, a ačkoliv je uváděná hodnota označována PUE, jedná se o pPUE. Rozdíl mezi indikátory je v zařízeních zahrnutých do výpočtu. Ukazatel PUE je definován tak, že zahrnuje spotřebu všech komponent DC, například i osvětlení, chlazení v rozvodnách atp. V této práci je vyhodnocován částečný ukazatel, tedy pPUE, který je matematicky definován v rovnici 1, kde P_{ICT} představuje elektřinu spotřebovanou ICT zařízeními a P_{Klim} elektřinu spotřebovanou systémem klimatizace v datových sálech (chlazení a vlhčení vzduchu). Slovně lze uvést, že pPUE vyjadřuje, kolik energie navíc je spotřebováno systémem klimatizace vůči spotřebě ICT. Indikátor je využitý za účelem porovnání jednotlivých případů simulační analýzy mezi sebou, a proto je jeho využití relevantní.

$$pPUE = \frac{P_{ICT} + P_{Klim}}{P_{ICT}} \quad (1)$$

4.2.2 pERE a pERF

Pro vyhodnocení VOT je možné použít ukazatele ERF (z anglického Energy Reuse Factor) a ERE (z anglického Energy Reuse Effectivness). V publikaci [52] autoři uvádějí, že tyto indikátory je možné použít pouze v případě, že odpadní teplo je distribuováno mimo hranici DC. Tato práce je zaměřena na VOT pro vytápění a přípravu TV v budovách nesouvisejících s DC, a proto lze považovat uvedenou podmínku za splněnou. Indikátor ERF představuje poměr mezi využitou energií a celkovou spotřebovanou. Druhý jmenovaný, ERE, je obdobou ukazatele PUE, ale do výpočtu zahrnuje i benefit využitého tepla. V práci jsou opět vyhodnocovány částečné indikátory, které obdobně jako pPUE zahrnují pouze spotřeby ICT a klimatizačního systému datového sálu. Jejich matematické definice vycházejí z definic uvedených v publikaci [52] a jsou uvedeny v rovnicích 2 a 3, kde P_{ICT} , resp. P_{Klim} , představuje elektřinu spotřebovanou ICT zařízeními, resp. systémem klimatizace, a Q_{VOT} reprezentuje teplo využitě mimo hranici DC.

$$pERF = \frac{Q_{VOT}}{P_{ICT} + P_{Klim}} \quad (2)$$

$$pERE = \frac{P_{ICT} + P_{Klim} - Q_{VOT}}{P_{ICT}} \quad (3)$$

Z uvedených rovnic vyplývá, že při výpočtech ukazatelů nejsou zohledněny rozdíly mezi vyskytujícími se formami energie, tedy teplem a elektřinou. Dále není zahrnuta teplotní úroveň distribuovaného tepla. Kvůli tomu je velmi obtížné porovnávat tyto indikátory s výsledky v jiných studiích atp. V této práci jsou však použity k porovnání jednotlivých výkonových variant VOT, kdy ostatní podmínky zůstávají stejné. Technologie VOT je v práci uvažována jako součást systému klimatizace. Hranice DC je tedy definována tak, že mimo ni leží pouze místo odběru. Takto definovaná hranice následně umožňuje energeticky vyhodnotit účinnost systému VOT pro účely vytápění a přípravy TV a zahrnuje také spotřebu energie na dopravu teplonosné látky a tepelné ztráty.

4.2.3 Provozní úspora

Provozní úspora je snadno uchopitelný ukazatel, který umožňuje rychlé posouzení výhodnosti zkoumaného řešení oproti dané alternativě. V této práci je provozní úspora definována

tak, aby mj. zohledňovala meziroční nárůst cen elektřiny a plynu. Pro vyhodnocení tohoto ukazatele byly uvažovány následující předpoklady:

- Cena elektřiny: 5200 Kč/MWh
- Cena zemního plynu: 3200 Kč/MWh
- Relativní nárůst ceny plynu a elektřiny: 2 % ročně
- Časový horizont: 10 let
- Použití průměrných hodnot účinnosti zdrojů tepla TČ A-W a KK ZP

V rámci výpočtu provozní úspory byly stanoveny také absolutní provozní náklady a relativní provozní úspora. Obecné matematické vztahy k vyhodnocení těchto indikátorů jsou definovány v následujících rovnicích 4, 5 a 6, kde PU_{i+1} představuje provozní úsporu po $i + 1$ letech, PN_{i+1} provozní náklady za $i + 1$ let, PU_{rel} relativní provozní úsporu, PN provozní náklady za nultý rok, ΔPN rozdíl provozních nákladů za nultý rok, i počet let a r předpokládaný relativní nárůst ceny energie nebo paliva.

$$PU_{i+1} = \sum_{n=0}^i \frac{\Delta PN}{\left(1 - \frac{r}{100}\right)^n} \quad (4)$$

$$PN_{i+1} = \sum_{n=0}^i \frac{PN}{\left(1 - \frac{r}{100}\right)^n} \quad (5)$$

$$PU_{rel} = \frac{PU_{i+1}}{PN_{i+1}} \cdot 100 \quad (6)$$

4.2.4 CO₂ ekvivalent

Tento ukazatel slouží k porovnání různých forem energie z hlediska jejich environmentálních dopadů. Výpočet je založen na přepočtovém koeficientu, který představuje ekvivalentní množství emisí CO₂, které by měly stejný dopad na skleníkový jev atmosféry jako emise vzniklé při přeměně daného druhu paliva na energii v palivu obsaženou. Na emisní faktor lze nahlížet ze dvou perspektiv – jednak z hlediska legislativního a jednak

z pohledu skutečných emisí CO₂, vzniklých při výrobě elektřiny dodávané do sítě. Z legislativního hlediska je CO₂ ekvivalent klíčovým faktorem pro stanovení emisních limitů a dalších právních předpisů, které mají za cíl omezit negativní dopady na klima a životní prostředí. Emisní faktory pro různé druhy paliv a elektřiny jsou uvedeny v tabulce 4, která je převzata z přílohy č. 8 vyhlášky č. 140/2021 Sb. Vyhláška zároveň definuje, že uvedené hodnoty jsou vztaženy k výhřevnosti paliva.

Tab. 4 Emisní faktory paliv a energie [53]

Palivo nebo energie	t_{CO₂}/MWh
černé uhlí	0,330
hnědé uhlí	0,352
koks	0,385
hnědouhelné brikety	0,346
topný a ostatní plynový olej	0,267
topný olej nízkosirný (do 1% hm.síry)	0,279
topný olej vysokosirný (nad 1% hm.síry)	0,279
zemní plyn	0,200
zkapalněný ropný plyn (LPG)	0,237
elektřina	0,860

Uvedené, legislativně dané hodnoty v případě elektřiny nepřihlíží k aktuálním zdrojům elektřiny a CO₂ ekvivalent 0,86 t_{CO₂}/MWh lze považovat za zastaralý. Skutečný emisní faktor pro elektřinu se může lišit v závislosti na lokálních podmínkách. Například Evropská agentura pro životní prostředí (EEA), která sleduje energetickou situaci v zemích EU, uvádí pro Českou republiku CO₂ ekvivalent pro elektřinu téměř o polovinu nižší, konkrétně 0,442 t_{CO₂}/MWh [54]. V kontextu paliv lze hodnoty uvedené ve vyhlášce považovat za aktuální, protože jsou určeny na základě emisí uvolněných při spalování, které se v čase nemění. Ty závisejí zejména na konkrétním chemickém složení daného druhu paliva, ale tyto rozdíly jsou pro výslednou hodnotu emisního faktoru zanedbatelné. Pro vyhodnocení jsou v této práci uvažovány hodnoty CO₂ ekvivalentu pro elektřinu dle EEA a pro zemní plyn dle přílohy č. 8 vyhlášky č. 140/2021.

4.3 Metodika řešení a vyhodnocení

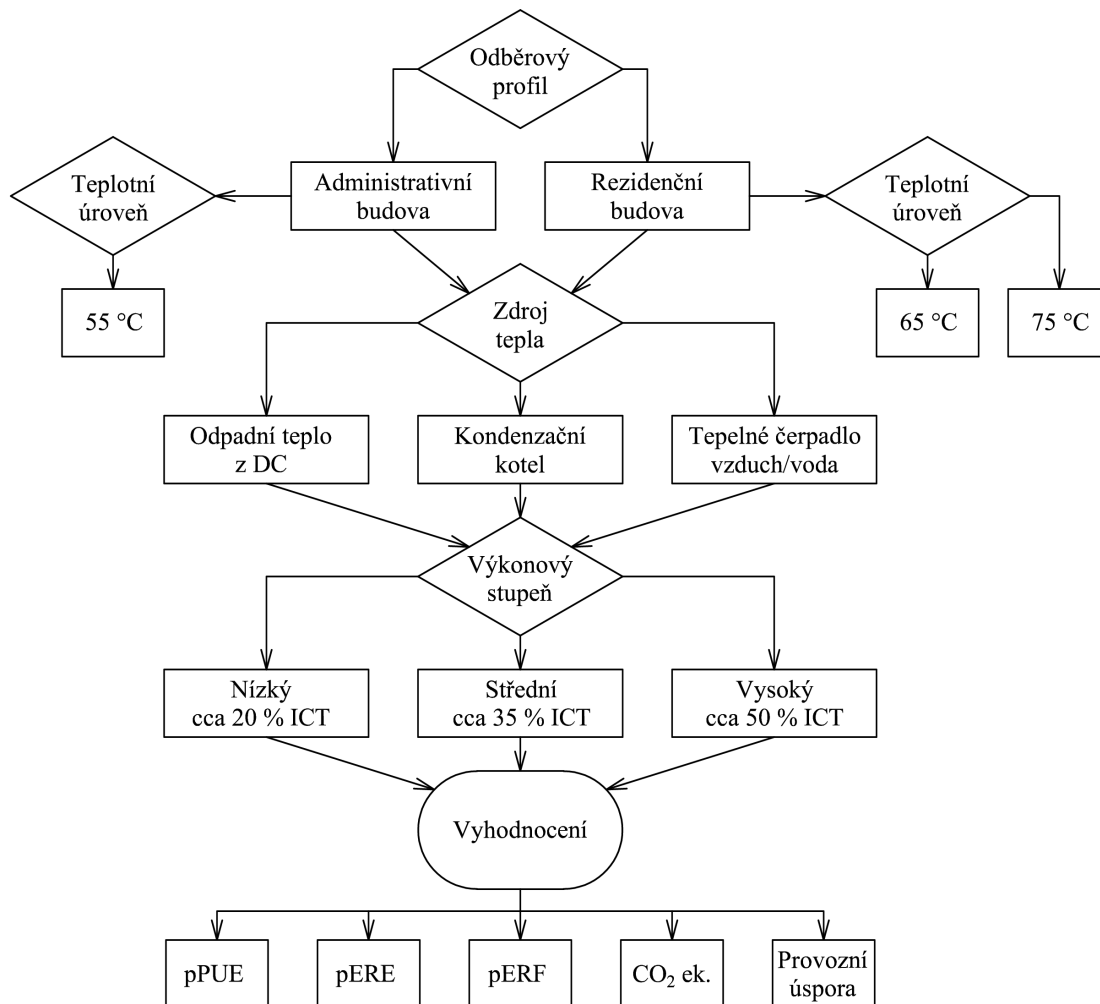
Jak již bylo uvedeno, simulační analýza v této práci se zabývá systémem lokálního VOT v DC společnosti OptoNet Communication. Výzkum je zaměřen na zmapování dopadů VOT na energetickou bilanci DC a zároveň na porovnání systému VOT s běžnými alternativami zdrojů tepla. Jednotlivé kroky vlastního řešení simulační analýzy jsou bodově shrnuty v následujícím seznamu.

1. Vymodelování typologicky shodného DC dle skutečného DC společnosti OptoNet Communication v softwaru TRNSYS
2. Implementace systému VOT včetně strany odběratele odpadního tepla
3. Ověření požadované odezvy nejdůležitějších komponent modelu na statické vstupy porovnáním s technickými listy zařízení
4. Dynamické ověření modelu dle charakteristických teoretických průběhů vybraných indikátorů
5. Parametrická studie pro různé výkonové stupně systému VOT
6. Vyhodnocení klíčových indikátorů

Konkrétní popis tvorby modelu DC a systému VOT (kroky 1 a 2) je poměrně obsáhlý a z toho důvodu je mu věnována samostatná kapitola v navazující části práce. Ve stejné kapitole jsou také uvedeny i výstupy pro ověření vlastností modelu (kroky 3 a 4). Ověření nemohlo být realizováno standardně, na základě naměřených dat, protože pro modelované DC nejsou v době řešení tato data k dispozici. Výkonová škála systému VOT (krok 5) je do studie zavedena z toho důvodu, aby bylo možné sledovat změny účinnosti systému v závislosti na dodaném teple. Na základě rešeršní práce lze totiž předpokládat změnu účinnosti systému VOT vzhledem k tomuto parametru. Metodické schéma řešení a vyhodnocení analýzy je uvedeno na obr. 15.

Ve schématu jsou postupně uvedeny proměnné parametry, které jsou ve studii zahrnuty. Prvním parametrem je odběrový profil na straně spotřeby, ke kterému se vážou teplotní hladiny distribuce tepla dle typu budovy. Následuje volba zdroje tepla, kdy simulačně je vyhodnocován pouze systém VOT a ostatní zdroje tepla jsou vyhodnoceny zjednodušeně na základě dříve uvedených charakteristik. Dalším parametrem je výkonový stupeň, který

je určen jako 20, 35 a 50 % příkonu ICT. Výkonový stupeň se váže jak ke zdroji tepla, tak i k odběrovému profilu. Model je konstruován tak, aby maximální tepelný výkon systému VOT byl roven maximu spotřeby tepla dle odběrového profilu. Nakonec jsou ve schématu uvedeny vyhodnocované klíčové indikátory.



Obr. 15 Schéma řešení a vyhodnocení

Jak vyplývá ze schématu, simulačně je vyhodnocováno dohromady devět různých případů. Ty tvoří uspořádané trojice podle typu odběrového profilu, resp. teplotní hladiny distribuce dle typu budovy. Jednotlivé případy v uspořádané trojici se liší výkonovým stupněm, který je vztažen k nominálnímu výkonu ICT (530 kW). Výkonový stupeň reprezentuje maximální požadovaný výkon na straně spotřeby a nominální výkon systému VOT, který je dán zapojeným tepelným čerpadlem (TČ W-W). Do studie byl selektován pouze jeden typ TČ W-W a tepelný výkon je navyšován zapojením více jednotek. Z toho důvodu se nominální tepelné výkony pro různé typy budov mírně liší.

S ohledem na snadnou orientaci mezi simulovanými případy je v navazujících kapitolách striktně rozlišováno mezi jednotlivými typy budov, pro které pak vždy existují už pouze tři různé scénáře. Číslo scénáře koresponduje s počtem TČ W-W. Z hlediska nastavení modelu jsou mezi scénáři i další rozdíly, jako například velikost akumulční nádrže atp. Konkrétní změny v nastavení pro parametrické studie v rámci typů budov jsou uvedeny v navazující kapitole popisu modelu. Výkonové rozdíly mezi simulovanými případy jsou shrnuty v následující tabulce 5.

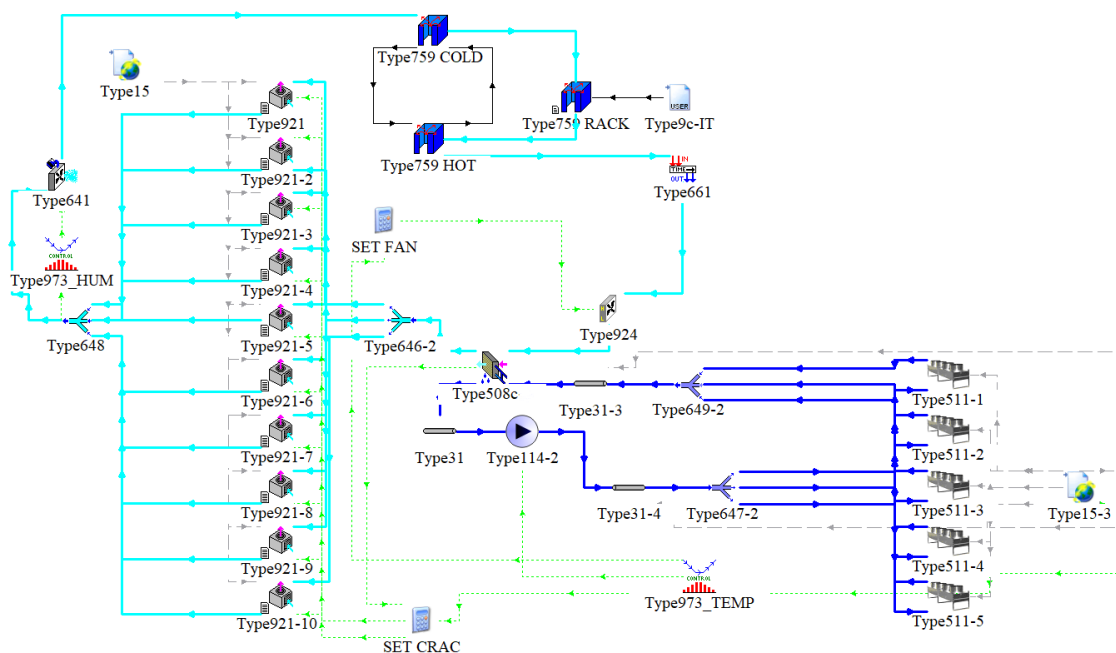
Tab. 5 Scénáře parametrické studie

Typ budovy	Scénář	Nominální výkon VOT [kW]
AB	Scénář 1	95
	Scénář 2	186
	Scénář 3	265
RBsou	Scénář 1	90
	Scénář 2	180
	Scénář 3	265
RBst	Scénář 1	80
	Scénář 2	160
	Scénář 3	240

5 Simulační model

V této kapitole jsou představeny simulační modely v prostředí softwaru TRNSYS. Úvodní sekce se zabývá ukázkami simulačních schémat v prostředí aplikace Simulation Studio, na kterých jsou vysvětleny základní principy fungování modelu. Další sekce popisují jednotlivé komponenty, tvorbu simulačního modelu a verifikaci výstupů simulací. Vzhledem k vysoké náročnosti na vstupní data a charakteristiky zařízení, bylo v některých případech nutné zavést zjednodušující předpoklady, které umožnily dané prvky modelovat. Zejména pro tyto komponenty, které nejsou modelovány standardními postupy, jsou uvedeny detailní odůvodnění a limitace plynoucí ze zavedení těchto předpokladů.

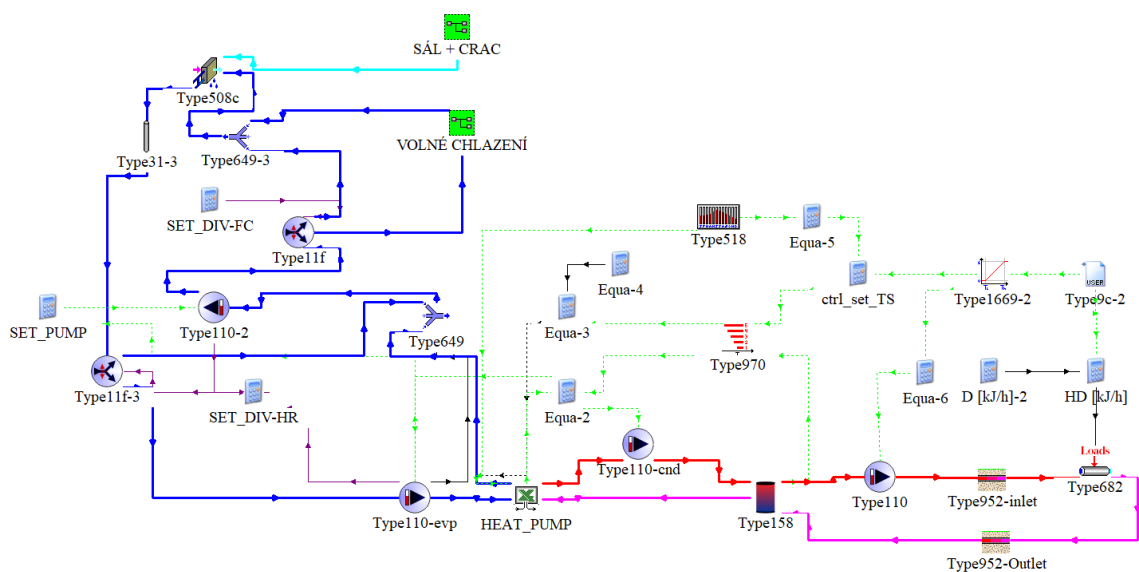
5.1 Schéma zapojení v softwaru TRNSYS



Obr. 16 Schéma modelu DC v TRNSYS

Schéma zapojení modelu DC lze vidět na obr. 16. Prostor datového sálu je reprezentován třemi komponentami type 759. Komponenty s popisem „HOT“ a „COLD“ představují vzduchové kanály, kterými je vzduch dopravován k resp. od serverů a serverových skříní. Komponenta s popisem „RACK“ představuje prostor serverů a serverových skříní, kde

vzniká odpadní teplo dle profilu příkonu ICT, viz obr. 12. Systém chlazení je řízen na základě venkovní teploty, kdy rozhodující hodnota je 8 °C. Teplota je určována dle dostupných klimatických dat, co nejbližše lokaci DC, v komponentě s označením type 15. Při venkovní teplotě nižší než 8 °C je spuštěn okruh volného chlazení, který je reprezentován komponentami chladiče ve vnitřní jednotce type 508c, suchého chladiče type 511 (5x), oběhovým čerpadlem (OČ) type 110, ventilátory type 924 a dalšími pomocnými prvky. Nad teplotou 8 °C je systém volného chlazení vypnutý a DC je chlazeno parním kompresorovým okruhem, ten je reprezentován zejména komponentami chladičového okruhu type 921 (10x) a ventilátory type 924. Součástí systému je také parní zvlhčovač, který je nastaven na sepnutí při podkročení měrné vlhkosti vzduchu pod 8 g/kg_{sv}.



Obr. 17 Schéma modelu DC s VOT v TRNSYS

Model DC byl následně rozšířen o systém VOT, jehož schéma je zobrazeno na obrázku 17. Části shodné s původním modelem jsou pro přehlednost skryté v makrech („SÁL + CRAC“ a „VOLNÉ CHLAZENÍ“). Zobrazeny jsou pouze části, které byly přidány nebo upraveny z důvodu implementace technologie VOT do modelu. Oproti referenčnímu stavu byly přidány komponenty TČ W-W type 62 „HEAT_PUMP“, akumulční nádrž type 158, tři oběhová čerpadla type 110 (výparníku, kondenzátoru a okruhu odběru), výměník v místě odběru type 682 a další pomocné regulační komponenty.

Řízení modelu TČ W-W se odvíjí od požadované teplotní úrovně distribuce tepla, která je zadávána komponentou type 518, a dále kaskádní regulací reprezentovanou komponentou

type 970. Uvedený type 518 umožňuje zadávat požadovanou teplotu pro jednotlivé měsíce v roce a přednastaveným profilem řídí výstupní teplotu z TČ W-W. Regulace výkonu TČ W-W je realizována komponentou type 970, která je napojena na termostat v akumulační nádrži a umožňuje škálu až šesti výkonových stupňů. Teplotní spád pro nominální podmínky v okruhu odběru je pro výpočet uvažován 15 K. Okruh odběru také umožňuje částečnou kvantitativní regulaci na základě požadované dodávky tepla, kdy průtok okruhem může klesnout až na polovinu nominálního průtoku. Odběr odpadního tepla z DC je modelován komponentou type 682, která dle zadaného odběrového profilu ochlazuje protékající vodu. Tato komponenta neobsahuje žádné dynamické prvky a jedná se tak o základní formu odběru tepla. Nicméně z hlediska výzkumného záměru této práce je chování soustavy reprezentované touto komponentou dostačující.

5.2 Hlavní komponenty modelu DC

V následující tabulce 6 je shrnuto nastavení základních komponent referenčního modelu DC bez systému VOT. Nastavení komponent vychází z projektové dokumentace, která byla pro účely této práce autorovi zpřístupněna se souhlasem zástupce DC OptoNet Communication s.r.o., firmou Neko Klima s.r.o. V tabulce je ve sloupci „Komponenta“ uveden název zařízení, které je modelováno a ve sloupci „Označení“ je uveden název prvku v softwaru TRNSYS. Význam ostatních sloupců tabulky je zřejmý. Druhá část sekce se zabývá podrobným popisem komponent systému chlazení DC, protože se jedná o stěžejní prvky celého modelu.

Tab. 6 Komponenty DC

Komponenta	Parametr	Hodnota	Jednotka	Označení
Chladivový okruh	Evaluační průtok přes výparník	16900	m ³ /h	Type 921
	Evaluační citelný výkon	56,2	kW	
	Evaluační latentní výkon	56,2	kW	
	Evaluační příkon	14,3	kW	
Ventilátor	Evaluační průtok - nízké otáčky	140000	m ³ /h	Type 924
	Evaluační průtok - vysoké otáčky	145000	m ³ /h	
	Evaluační příkon - nízké otáčky	13,2	kW	
	Evaluační příkon - vysoké otáčky	21	kW	
	Ztrátový koeficient ventilátoru	1	-	

Pokračování tab. 6

Komponenta	Parametr	Hodnota	Jednotka	Označení
<i>Suchý chladíč</i>	Mód výměníku	1	-	<i>Type 511</i>
	Evaluační vstupní teplota - kapalina	20,8	°C	
	Evaluační výstupní teplota - kapalina	15,5	°C	
	Evaluační průtok - kapalina	19830,2	kg/h	
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	3,745	kJ/kg.K	
	Evaluační teplota - vzduch	8	°C	
	Evaluační průtok - vzduch	52471	kg/h	
	Evaluační příkon	1	kW	
	Poměr souč. přestupu tepla	5	-	
	Výkonový koeficient-1	0,3239	-	
	Výkonový koeficient-2	-1,4961	-	
	Výkonový koeficient-3	2,198	-	
<i>Zvlhčovač</i>	Zvlhčovací výkon	16	kg/h	<i>Type 641</i>
	Časová konstanta	0,05	h	
	Evaluační příkon	12	kW	
<i>Oč</i>	Evaluační průtok	112625	kg/h	<i>Type 114</i>
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	3,7459	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	16	kW	
<i>Chladíč</i>	Mód řízení	1	-	<i>Type 508c</i>
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	3,7459	kJ/kg.K	
	Set-point - vzduch	23,2	°C	
<i>Teplá ulička</i>	Kapacita zóny	90	kJ/K	<i>Type 759</i>
	Objem zóny	258	m ³	
	Konduktance do studené uličky	25	W/K	
<i>Studená ulička</i>	Kapacita zóny	60	kJ/K	<i>Type 759</i>
	Objem zóny	159	m ³	
	Konduktance do teplé uličky	25	W/K	
<i>ICT</i>	Kapacita zóny	120	kJ/K	<i>Type 759</i>
	Objem zóny	381	m ³	

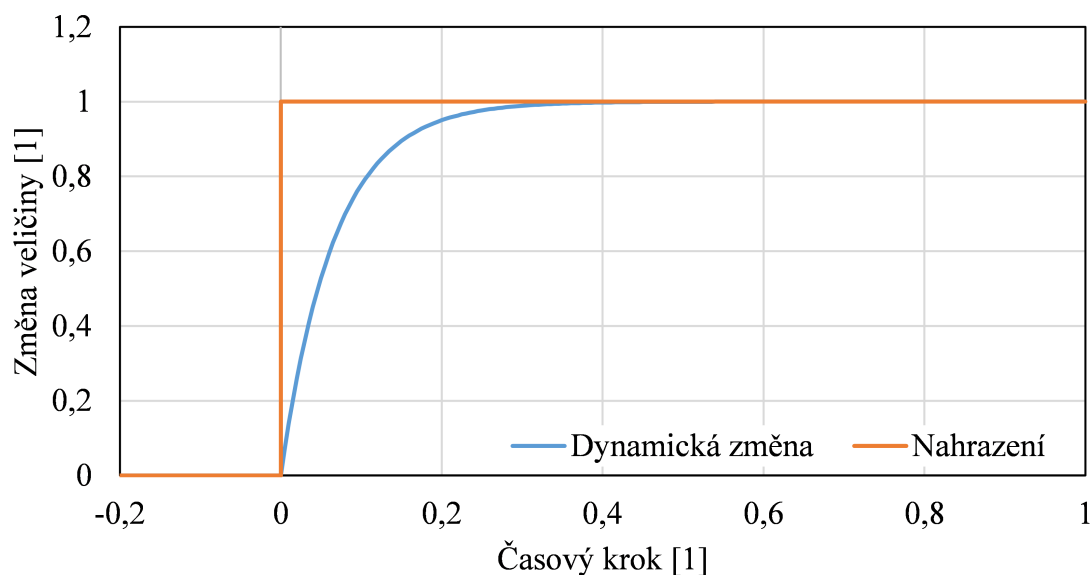
5.2.1 Chladivový okruh

Vlastnosti komponent s označením typu 921, které reprezentují chlazení typu DX, jsou definovány pomocí tzv. výkonové mapy. Na řízení výkonu chladicích jednotek v reálných DC mají vliv zejména otáčky ventilátoru a kompresoru. Ventilátor má být ve studovaném DC řízen podle udržování konstantního zvoleného přetlaku ve studené uličce, ten odpovídá zatížení serverů, které jsou standardně vybaveny vlastními ventilátory s teplotním čidlem. Regulací ventilátorů tedy dochází ke změně průtoku podle aktuální tepelné zátěže od ICT. V důsledku tohoto řízení se mění průtok přes výparník vnitřní klimatizační jednotky, což má za následek změnu charakteristiky výparníku, a tedy celého chladivového okruhu.

Z hlediska modelu by pro nejbližší aproximaci bylo zapotřebí znát hodnoty citelného chladicího výkonu, celkového chladicího výkonu a příkonu zařízení napříč parametry průtoku vzduchu, vlhkosti a teplot vstupujících, resp. vystupujících z klimatizační jednotky. Tato ze své podstaty velice rozsáhlá charakteristika není u výrobce jednotek dostupná. Z uvedených důvodů bylo nutné zavést zjednodušující předpoklady, které umožní vytvořit dostatečně přesný model chování parního kompresorového okruhu systému chlazení DC. Zjednodušení byla učiněna na základě požadavku ICT na konstantní přívodní teplotu vzduchu z vnitřní klimatizační jednotky a průběhu tepelné zátěže, která se vyznačuje poměrně stálou potřebou chlazení (viz graf typického profilu zátěže obr. 12). Pro sestavení výkonové mapy byly učiněny následující zjednodušující předpoklady.

1. Chladicí faktor je funkcí pouze venkovní teploty
2. Regulace výkonu nebude zahrnovat snížení průtoku vzduchu (konstantní otáčky ventilátoru)

Výrobce udávané podklady pro sestavení výkonové mapy jsou příkon jednotky, celkový a citelný výkon pro jednu variantu teplot a vlhkosti vstupního a výstupního vzduchu v závislosti na různých venkovních teplotách. Tabulka s podklady od výrobce jednotek (FläktGroup a.s.) je uvedena v příloze III. Výkonová mapa je sestavena tak, aby na základě teploty vstupujícího vzduchu do komponenty typu 921 ochladila vzduch na přibližně 23 °C. Tento přístup vychází z kvazi-stacionárního principu, jehož podstatu pro daný případ lze jednoduše popsat na obr. 18.



Obr. 18 Přechodový děj

Jak z grafu vyplývá, základním předpokladem je, že přechodové děje jsou z hlediska časového kroku výpočtu zanedbatelné. Tento předpoklad je možné považovat za splněný vzhledem k poměrně vyrovnanému profilu tepelné zátěže do ICT a nastavení časového kroku na 7,5 minuty. V rámci jednoho časového kroku je tedy možné zanedbat dynamické chování chladičového okruhu a výpočet provádět na základě předdefinované ustálené odezvy na vstupní teplotu dle sestavené výkonové mapy.

Uvedená zjednodušení umožní z dostupných podkladů získat dostatečně přesnou aproximaci chování chladičového okruhu systému chlazení DC. Zároveň však takto konfigurovaný model neumožňuje analýzu v případě výrazných prudkých změn v profilu tepelné zátěže od ICT. V takovém případě by totiž nebylo možné v rámci časového kroku předpokládat ustálené podmínky a zavedené předpoklady by pravděpodobně vnášely do výpočtu výrazně vyšší chybu.

5.2.2 Volné chlazení

Pro simulační model systému nepřímého volného chlazení byly využity komponenty typu 511 (suchý chladič) a 508c (chladič ve vnitřní jednotce přesné klimatizace). Jejich použití odpovídá standardním postupům modelování v TRNSYS a je v souladu s matematickými popisy modelů. Obě komponenty umožňují automatické řízení dle požadované výstupní

teploty, které bylo v modelu využito. K výpočtu příkonu suchého chladiče je použitý regresní model křivky třetího řádu, která je popsána v rovnici 7. V rovnici vyjadřuje \dot{P}_{SCH} aktuální příkon suchého chladiče, \dot{P}_{eval} zadaný evaluační příkon modelu suchého chladiče v modelu a \dot{V}_{norm} aktuální normalizovaný průtok vzduchu suchým chladičem (0 až 1).

$$\dot{P}_{SCH} = \dot{P}_{eval} \cdot \left(1.0097 \cdot \dot{V}_{norm}^3 - 0.01176 \cdot \dot{V}_{norm}^2 + 0.00292 \cdot \dot{V}_{norm} \right) \quad (7)$$

5.3 Hlavní komponenty modelu VOT

V tabulkách 7 a 8 je shrnuto nastavení základních komponent pro model technologie VOT a distribuční sítě. Nejdůležitější komponentou pro systému VOT je TČ W-W, které je modelováno pomocí komponenty type 62. Tato komponenta umožňuje propojení prostředí TRNSYS s MS Excel, kdy část výpočtu probíhá v excelu dle uživatelem definovaných vazeb mezi definovanými parametry. Výhoda tohoto řešení spočívá v možnosti vytvoření vlastní komponenty v uživatelsky přívětivém prostředí softwaru Excel. Nevýhodou je naopak mírně vyšší výpočetní náročnost z důvodu kosimulace. V modelu TČ W-W v MS Excel probíhají vyhledávání a případně lineární interpolace mezi hodnotami z výkonové mapy zvoleného typu TČ W-W pro VOT. Do studie bylo jako typický zástupce z hlediska výkonnostních parametrů vybráno tepelné čerpadlo VITOCAL 350-HT Pro 352.AHT058, jehož technická specifikace je uvedena v příloze práce.

Vzhledem k tomu, že TČ W-W je vytvořeno v prostředí softwaru Excel, jsou v TRNSYS nastavovány pouze počty vstupů a výstupů. Skript v programovacím jazyce Visual Basic, který zajišťuje propojení a následnou kosimulaci včetně popisu vstupů a výstupů, je uveden v příloze IV. Chod TČ W-W je upravován dle signálu z termostatu v akumulární nádrži, která propojuje DC s odběrovým okruhem. Parametry nádrže jsou voleny na základě jednoduché simulační analýzy tak, aby tepelné čerpadlo pracovalo co nejlépe optimálními podmínkami v rámci požadované výstupní teploty na straně kondenzátoru. Aby nebylo nutné měnit nastavení oběhových čerpadel (OČ) kondenzátoru a výparníku zvlášť pro každou simulaci, jsou nastavena jednotnými parametry a výkonovými koeficienty. Toto nastavení bylo zavedeno z toho důvodu, aby bylo možné reprezentovat plynulou regulaci, která udržuje optimální pracovní podmínky modelů OČ. Detailnější ověření modelu je řešeno v následující sekci „Ověření kvality modelu“. Řízení OČ poté zajišťuje signál

z modelu TČ W-W, který nastavuje průtok jednotlivými OČ dle požadovaného teplotního spádu. Na základě technické dokumentace k tepelnému čerpadlu VITOCAL 350-HT Pro 352.AHT058 jsou OČ regulována pro udržování teplotního spádu na kondenzátoru 5 K a na výparníku 3 K.

Tab. 7 Komponenty technologie VOT

Komponenta	Parametr	Hodnota	Jednotka	Označení
<i>TČ W-W</i>	Vstupy	6	-	<i>Type 62</i>
	Výstupy	5	-	
<i>OČ výparníku</i>	Evaluační průtok	165141	kg/h	<i>Type 110</i>
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	3,7459	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	1	kW	
	Výkonový koeficient-1	-0,0682	-	
	Výkonový koeficient-2	1,9793	-	
	Výkonový koeficient-3	6,1077	-	
<i>OČ kondenzátoru</i>	Evaluační průtok	106502	kg/h	<i>Type 110</i>
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	4,182	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	1	kW	
	Výkonový koeficient-1	-0,02	-	
	Výkonový koeficient-2	1	-	
	Výkonový koeficient-3	5,8036	-	

Tab. 8 Komponenty distribuční trasy

Komponenta	Parametr	Hodnota	Jednotka	Označení
Scénář č. 1				
Akumulační nádrž	Výška	2	m	Type 158
	Objem	2,5	m ³	
	Tepelná ztráta	0,4	W/m ² .K	
Potrubí	Vnitřní průměr	37,2	mm	Type 952
	Vnější průměr	42,4	mm	
	Tloušťka izolace	38	mm	
	Hloubka uložení	2	m	
OČ pro AB	Evaluační průtok	5452	kg/h	Type 110
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	4,182	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	1,5	kW	
OČ pro RBsou	Evaluační průtok	5165	kg/h	Type 110
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	4,182	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	1,5	kW	
OČ pro RBst	Evaluační průtok	4591	kg/h	Type 110
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	4,182	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	1,2	kW	
Scénář č. 2				
Akumulační nádrž	Výška	2	m	Type 158
	Objem	4,25	m ³	
	Tepelná ztráta	0,4	W/m ² .K	
Potrubí	Vnitřní průměr	43,1	mm	Type 952
	Vnější průměr	48,3	mm	
	Tloušťka izolace	35	mm	
	Hloubka uložení	2	m	
OČ pro AB	Evaluační průtok	10674	kg/h	Type 110
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	4,182	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	3,5	kW	
OČ pro RBsou	Evaluační průtok	10330	kg/h	Type 110
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	4,182	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	3,5	kW	
OČ pro Rst	Evaluační průtok	9125	kg/h	Type 110
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	4,182	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	3	kW	

Pokračování tab. 8

Komponenta	Parametr	Hodnota	Jednotka	Označení
Scénář č. 3				
Akumulační nádrž	Výška	2	m	Type 158
	Objem	5,8	m ³	
	Tepelná ztráta	0,4	W/m ² .K	
Potrubí	Vnitřní průměr	54,5	mm	Type 952
	Vnější průměr	60,3	mm	
	Tloušťka izolace	37	mm	
	Hloubka uložení	2	m	
OČ pro AB	Evaluační průtok	15208	kg/h	Type 110
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	4,182	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	4,5	kW	
OČ pro RBsou	Evaluační průtok	15208	kg/h	Type 110
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	4,182	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	4,5	kW	
OČ pro RBst	Evaluační průtok	13716	kg/h	Type 110
	Měrná tepelná kapacita - kapalina	4,182	kJ/kg.K	
	Evaluační příkon	4	kW	

5.4 Ověření kvality modelu

Pro ověření simulačních modelů jsou obecně využívány metody verifikace, validace a kalibrace. Verifikace modelu má za cíl ověřit, zda jsou jednotlivé komponenty modelovány vhodným způsobem a zda model neobsahuje chyby z hlediska zadaných parametrů (překlepy atp.). Toto bylo provedeno v předchozích sekcích a kapitolách, kde jsou vstupy modelu uvedeny a přístup ke tvorbě modelu detailně diskutován. Dále je verifikace doložena porovnáním výstupů modelu s očekávanými výstupy dle technických listů a teoretických předpokladů. Ostatní metody, tj. validace a kalibrace, se vztahují k porovnání výsledků modelu a skutečně naměřených dat. Pro řešenou případovou studii toto ovšem nelze uplatnit, protože v době řešení nebyla k dispozici naměřená data, a je nutné posoudit kvalitu modelu na základě jiných dostupných údajů. Těmi jsou podklady udávané výrobcí modelovaných zařízení a známé průběhy charakteristických veličin v závislosti na určitých parametrech. Jednotlivé kroky ověření modelu jsou popsány níže, včetně zobrazení výsledků.

5.4.1 Verifikace dílčích výstupů modelu

Tento způsob ověření spočívá v porovnání modelovaných zařízení s referenčními údaji v technických listech, případně s doplňujícími údaji poskytnutými výrobcem. Verifikace výstupů má za cíl zhodnotit, zda odezva modelu komponenty na statický vstup odpovídá požadovaným výstupním parametrům. Verifikace byla prováděna postupně v průběhu tvorby modelu pro veškeré použité komponenty, zde jsou však uvedeny vyhodnocení pouze pro vybrané komponenty, tj. suchý chladič, chladivový okruh a oběhová čerpadla pro TČ W-W na straně výparníku a kondenzátoru.

Pro model suchého chladiče byl, kromě výkonových koeficientů pro ventilátory, rozhodující poměr součinitele přestupu tepla na straně vzduchu a nemrznoucí směsi. Ačkoliv v matematickém popisu komponenty type 511 je uvedeno, že parametr nemá zásadní vliv, při ověřování komponenty bylo zjištěno, že při nesprávném odhadu může chování modelu výrazně ovlivnit. Konečná hodnota tohoto parametru byla stanovena iterativně na základě výstupů simulace. Výsledky včetně porovnání s údaji od výrobce jsou zobrazeny v tab. 9, kde T_{EXT} je venkovní teplota suchého teploměru, T_{in} a T_{out} je teplota kapaliny na vstupu, resp. výstupu ze suchého chladiče, a nakonec je uveden příkon ventilátorů suchého chladiče získaný z modelu a dle výrobce.

Tab. 9 Verifikace modelu suchého chladiče

T_{EXT} [°C]	T_{in} [°C]	T_{out} [°C]	Příkon: Model [kW]	Příkon: Výrobce [kW]
8	20,8	15,5	1,03	1,03
4	20,8	15,5	0,26	0,26
1	20,8	15,5	0,13	0,13
-2	20,8	15,5	0,08	0,08

Pro model chladivového okruhu klimatizační jednotky byla použita výkonová mapa, která na základě vstupních údajů definuje výstupní parametry modelu. Tyto výstupy jsou určovány interpolačně dle hodnot zadaných do výkonové mapy. Při vytváření výkonové mapy byl zaveden předpoklad, že se chladicí faktor nemění pro konstantní průtok vzduchu přes výparník a pro konstantní nasycenou sací vypařovací teplotu. Jak již bylo uvedeno v sekci 5.2.1, model chladivového okruhu je nastaven tak, aby byla na výstupu udržována teplota přibližně 23 °C. Indikátorem potřebné výkonové kapacity je teplota vzduchu na vstupu do modelu. Výrobce výkonovou mapu uvádí včetně spotřeby ventilátorů ve vnitřní jednotce

klimatizace (viz příloha III), v modelu jsou však ventilátory modelovány zvlášť. Z toho důvodu byl příkon ventilátorů od údajů výrobce odečten. Výsledky včetně porovnání s údaji od výrobce jsou zobrazeny v tabulce 10, kde T_{EXT} je teplota exteriéru, T_{in} a T_{out} je teplota vzduchu vstupujícího, resp. vystupujícího z komponenty a odpovídající příkon modelu a dle výrobce obdobně jako v předchozím případě.

Tab. 10 Verifikace modelu chladivového okruhu

T_{EXT} [°C]	T_{in} [°C]	T_{out} [°C]	Příkon: Model [kW]	Příkon: Výrobce [kW]
35	35	23,2	13,7	13,7
30	35	23,2	11,1	11,1
25	35	23,2	10	10
20	35	23,2	9,5	9,5
15	35	23,2	9,6	9,6
10	35	23,2	9,6	9,6

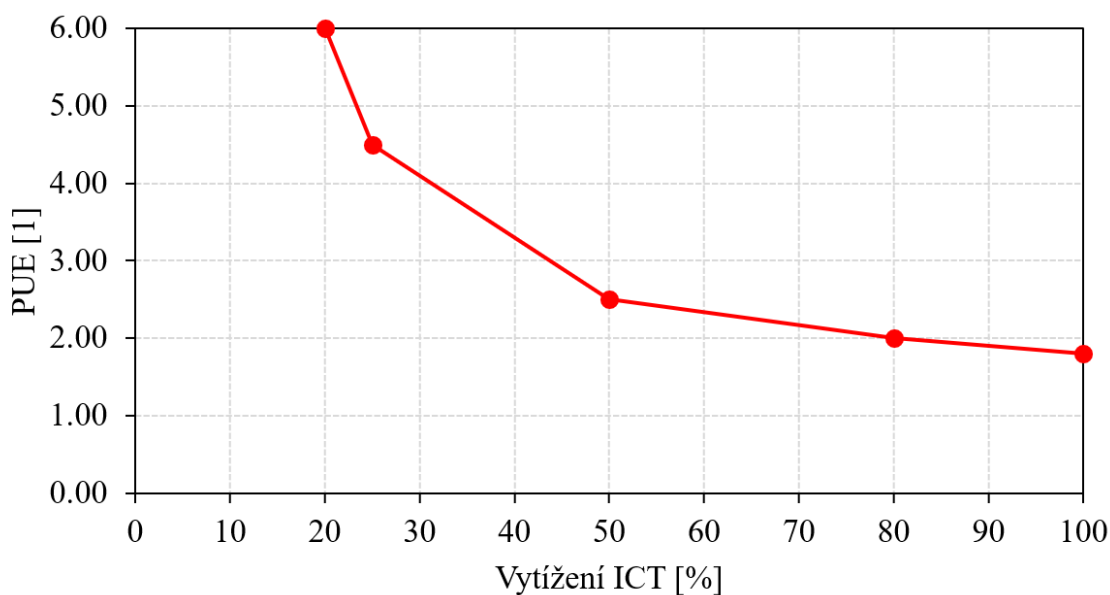
Z důvodů uvedených v předchozí sekci jsou v tabulce 11 ukázány provozní stavy pro oběhová čerpadla na stranách výparníku a kondenzátoru TČ W-W v rámci simulace. Ověření je provedeno ve vybraných bodech v rozsahu celého spektra možných provozních stavů. V tabulce jsou uvedeny chladicí, resp. tepelné výkony TČ W-W (\dot{Q}) a k nim odpovídající hmotnostní průtoky (\dot{M}) a příkony (\dot{P}) oběhových čerpadel. Index „evp“ značí stranu výparníku a index „cnd“ stranu kondenzátoru. Z uvedených hodnot je patrné, že se komponenty chovají realisticky a jednotné parametry modelů oběhových čerpadel odpovídají požadovaným výstupům dle doporučených teplotních spádů výrobce TČ W-W.

Tab. 11 Provozní stavy oběhových čerpadel pro TČ W-W

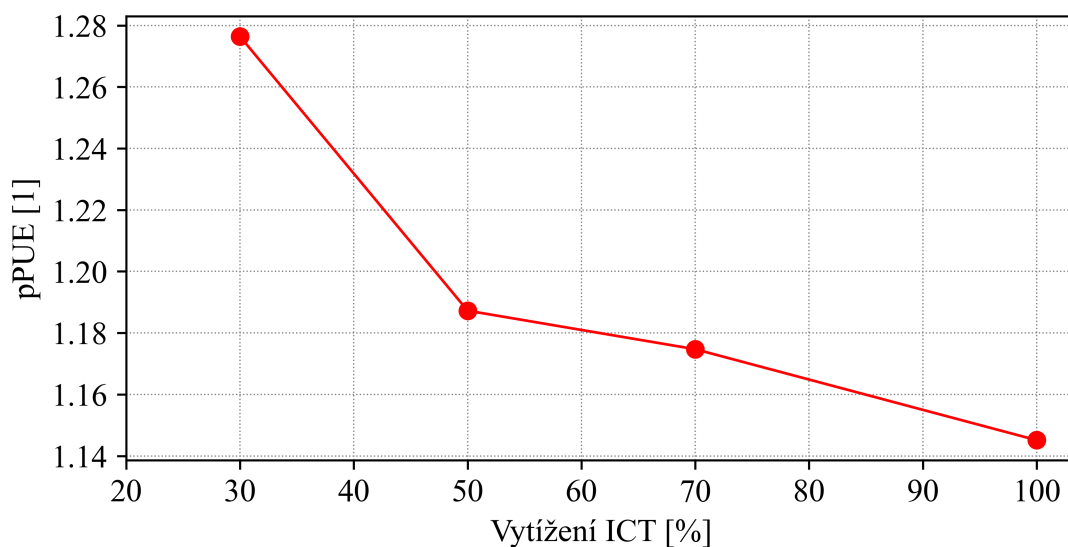
\dot{Q}_{evp} [kW]	\dot{Q}_{cnd} [kW]	\dot{M}_{evp} [kg/h]	\dot{P}_{evp} [W]	\dot{M}_{cnd} [kg/h]	\dot{P}_{cnd} [W]
38	50	11890	150	8520	100
99	77	24771	320	17040	280
149	115	36331	600	25560	560
198	154	49542	1100	34080	900
248	192	61102	1600	42600	1300
297	230	74313	2000	51120	1800

5.4.2 Verifikace výstupů celoroční dynamické simulace

Verifikace výstupů modelu celého DC spočívá ve vyhodnocení indikátoru pPUE z celoroční dynamické simulace v závislosti na parametru velikosti tepelné zátěže od ICT. Tyto zátěže byly určeny jako 30, 50, 70 a 100 % nominálního stavu, který je 530 kW. Vyhodnocení ze simulačního modelu pro 100% zátěž by mělo být shodné s vypočteným pPUE dle projektové dokumentace studovaného DC. Dále by z křivky pPUE v závislosti na tepelné zátěži měl být zřejmý trend, který je pro DC typický a jeho průběh je znázorněn na obr. 19. Tento trend je dán zhoršením účinnosti systému chlazení, protože pro nižší tepelné zátěže ICT se systém stává předdimenzovaný. Výsledky získané simulačně poměrně dobře odpovídají teoretickému průběhu, jak lze vidět na obr. 20. Výsledky získané z modelu DC je možné považovat za relevantní a v potřebném rozsahu konzistentní. Konkrétní číselné hodnoty jednotlivých simulací jsou zobrazeny v tabulce 12. V tabulce lze zároveň pozorovat, že indikátor pPUE pro 100% tepelnou zátěž od ICT odpovídá předpokládané hodnotě dle projektové dokumentace 1,15.



Obr. 19 Typický vývoj PUE dle vytížení ICT, graficky upraveno z [55]



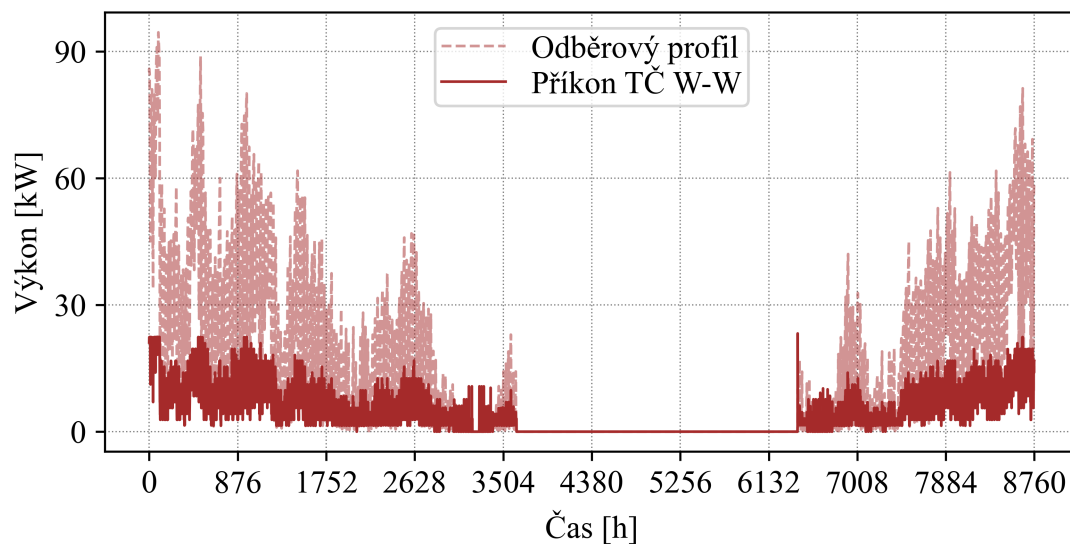
Obr. 20 Vývoj pPUE dle vytížení ICT (simulační model)

Tab. 12 Vývoj pPUE dle vytížení ICT (simulační model)

Vytížení ICT [%]	pPUE [1]
30	1,28
50	1,19
70	1,18
100	1,15

Dále bylo nutné verifikovat model technologie VOT, kde je zásadní komponentou TČ W-W. Vzhledem k tomu, že model je definován v softwaru MS Excel, kde prakticky dochází pouze k vyhledávání v charakteristikách výrobce, bylo ověření kvality modelu VOT zaměřeno zejména na způsob řízení TČ W-W. Toto bylo realizováno na základě posouzení podobnosti křivky příkonu pro TČ W-W a odběrového profilu pro celoroční simulace. Tvary křivek by si měly navzájem odpovídat a nemělo by docházet k výrazným odchylkám. Dále lze tímto způsobem kontrolovat i správné zadání odběrových profilů do modelu, které by naopak měly tvarově odpovídat výše uvedeným normalizovaným profilům a jejich maximum by mělo být shodné s nominálním tepelným výkonem pro daný scénář. Výstup verifikace je uveden pro Administrativní budovu scénář 1 (obr. 21). Výstupy pro ostatní simulované případy je možné nalézt v přílohové části V. V uvedeném grafickém zobrazení je možné vidět, že si profily dobře odpovídají. Nejvýznamnější odchylku lze sledovat na začátku otopného období (přibližně 6300. hodina), kde je ovšem toto chování způsobeno

nahříváním akumulční nádrže po letním odstavení. Na základě vizuální kontroly grafických zobrazení je možné považovat model technologie VOT za ověřený, protože odpovídá požadovaným parametrům.



Obr. 21 Verifikace TČ W-W: Administrativní budova scénář 1

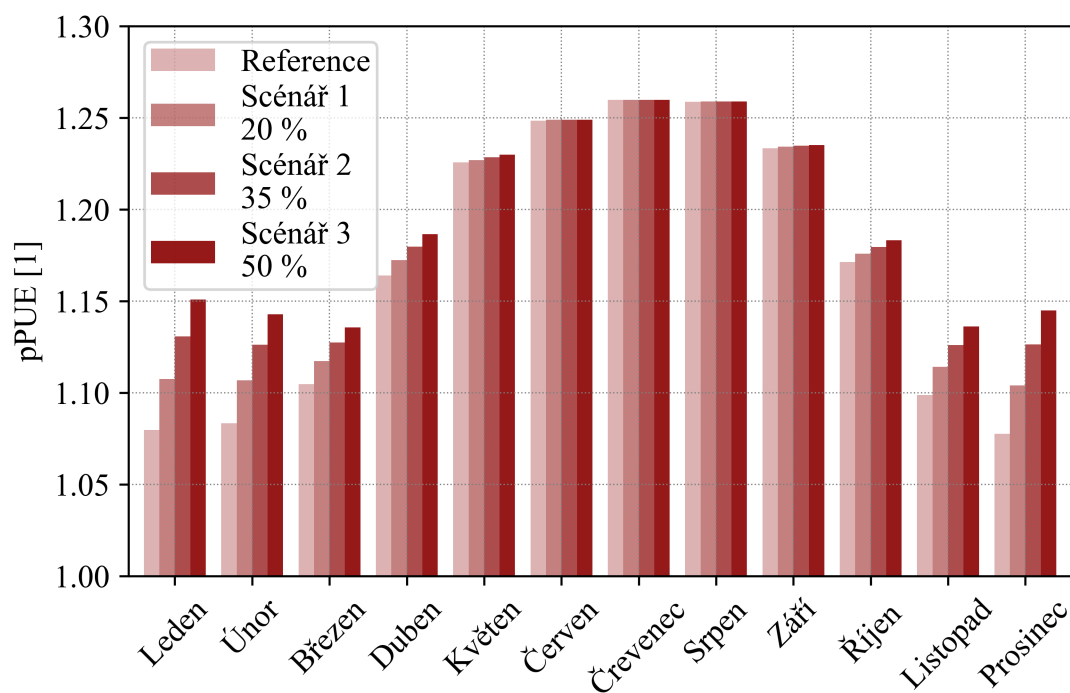
6 Vyhodnocení simulační analýzy

V této kapitole jsou uvedeny zpracované výsledky simulační analýzy. První část analýzy se soustředí na simulovaný provoz samotného DC, který je vyhodnocen pomocí indikátorů pPUE, pERE a pERF. Z výsledků jsou patrné dopady implementace VOT na účinnost systému chlazení v DC. V následující části je vyhodnoceno porovnání systému VOT pouze jako zdroje tepla s ostatními zahrnutými alternativami zdrojů tepla. Toto porovnání si na základě indikátoru CO₂ ekvivalentu klade za cíl ukázat, zda je uvažovaný systém VOT efektivnější než tyto alternativy bez přihlédnutí ke vlivu na DC. Poslední sekce zahrnuje vyhodnocení celého komplexu, tedy celkové spotřeby DC včetně spotřeb budov na vytápění a případně přípravu TV. Kromě vyhodnocení ekvivalentních emisí CO₂ jsou v poslední sekci vyčísleny také provozní úspory v případě využití systému VOT po 10 letech.

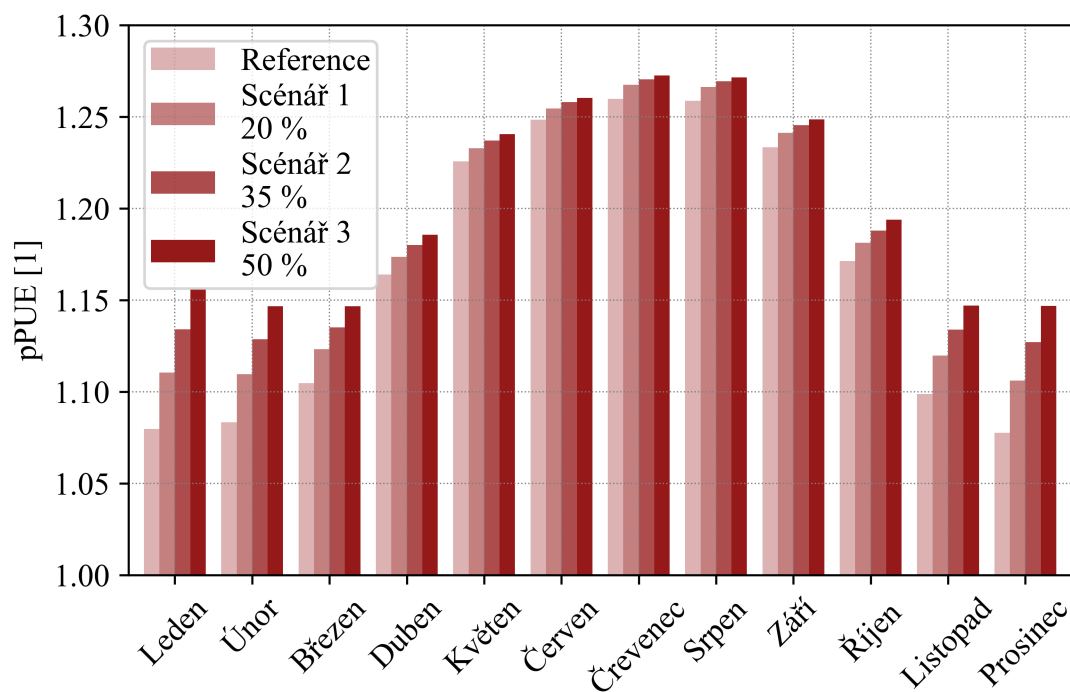
6.1 Dopady systému VOT na provoz DC

Na obrázcích 22, 23 a 24 jsou zobrazeny dílčí hodnoty indikátoru pPUE v jednotlivých měsících. V každém grafu jsou zobrazeny 4 sledované případy, jednak scénáře 1, 2 a 3 zvlášť pro daný typ budovy a jednak výchozí stav, tedy DC bez instalované technologie VOT, označen „Reference“. Jednotlivé scénáře se liší nominálním výkonem VOT, který je definovaný jako podíl z nominálního příkonu ICT. Pro přehlednost jsou v legendách tyto podíly uvedeny pod označením scénáře.

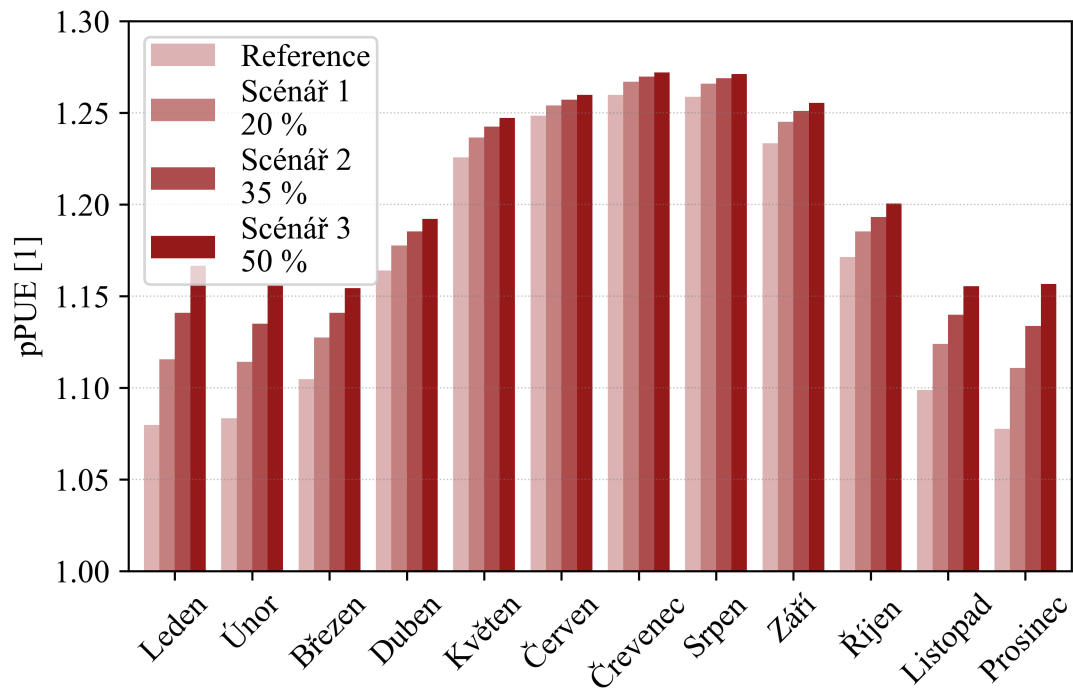
Ve zobrazeních lze pozorovat, že v teplejších měsících je ovlivnění technologií VOT nejmenší. To je způsobeno tím, že v tomto období je spotřeba tepla v budově nižší a také, že je využíván systém DX, který je spotřebou výrazně bližší spotřebě TČ W-W, na rozdíl od systému volného chlazení. Dále je také možné si všimnout, že hodnoty korespondují s odběrovým profilem. Například pro administrativní budovu je pro měsíce nulového odběru tepla hodnota pPUE shodná s referenční hodnotou DC bez technologie VOT.



Obr. 22 Měsíční porovnání pPUE: Administrativní budova



Obr. 23 Měsíční porovnání pPUE: Rezidenční budova soudobé zástavby



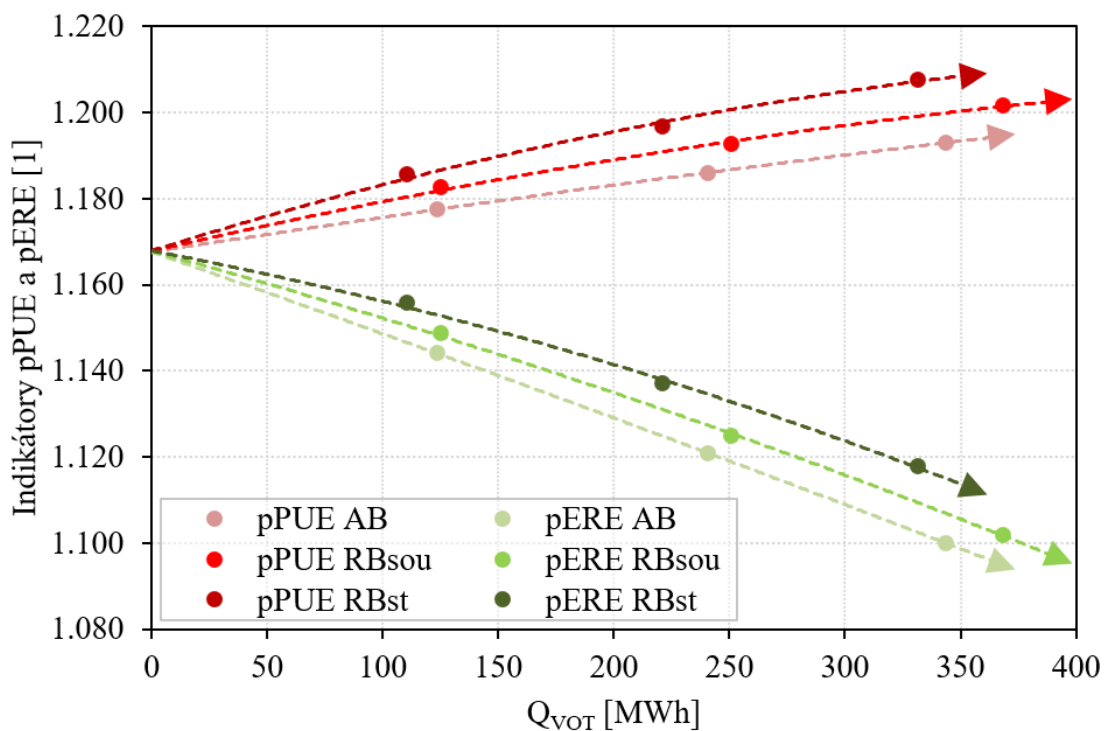
Obr. 24 Měsíční porovnání pPUE: Rezidenční budova starší zástavby

Obecně je z grafů patrné, že systém VOT výrazně ovlivňuje spotřebu energie v DC. Vzhledem k provázanosti mezi teplotní úrovní distribuce tepla a indikátoru pPUE je zcela v souladu s předpoklady, že hodnoty tohoto ukazatele budou narůstat s nárůstem teplotní úrovně. Tento trend lze přibližně pozorovat porovnáním hodnot pPUE za měsíc leden, protože profily odběru rezidenční i administrativní budovy jsou v tomto měsíci velmi podobné.

Zároveň si také lze všimnout, že k nejvyššímu nárůstu pPUE dochází mezi scénářem 1 a referenčním případem. Tento poznatek naznačuje, že instalací technologie VOT může dojít ke snížení účinnosti systému chlazení v DC a tím k navýšení spotřeby, která ovšem neroste lineárně s nominálním výkonem systému VOT. Z toho důvodu byla zpracováno grafické zobrazení indikátorů pPUE a pERE v závislosti na parametru dodaného tepla do budovy (Q_{VOT}), viz obr. 25. V grafu lze pozorovat, že směrnice křivky pPUE se postupně snižuje a naopak pokles indikátoru pERE se zrychluje. Dále je možné také sledovat, že oba indikátory úzce souvisí s teplotní úrovní dodávaného tepla.

Vyhodnocení provozu DC za období jednoho roku je shrnuto v tabulce 13. Zjištěné hodnoty ukazatele pPERF jsou poměrně nízké, ačkoliv by instalované výkony umožňovaly výrazně vyšší podíl VOT. Tento jev je důsledkem dodávky tepla dle odběrových profilů budov, které pochopitelně nevyužívají celý potenciál systému VOT. Pokud by byl systém VOT

využitý v maximální možné míře, indikátor pERF by mohl v některých případech dosahovat až k hodnotě 0,4. Do tabulky je zahrnuta také celková spotřeba elektřiny uvnitř hranice DC, aby bylo možné sledovat rozdíly mezi jednotlivými scénáři i v absolutních hodnotách.



Obr. 25 Vývoj indikátorů pPUE a pERE

Tab. 13 Výsledné hodnoty indikátorů pro DC

Ukazatel	Scénář 1	Scénář 2	Scénář 3	Reference
	20 %	35 %	50 %	
Administrativní budova				
Spotřeba elektřiny [MWh]	4349	4379	4406	4312
pPUE [1]	1,178	1,186	1,193	1,168
pERF [1]	0,028	0,055	0,078	0,000
pERE [1]	1,144	1,121	1,100	1,168
Rezidenční budova soudobé zástavby				
Spotřeba elektřiny [MWh]	4367	4404	4438	4312
pPUE [1]	1,183	1,193	1,202	1,168
pERF [1]	0,029	0,057	0,083	0,000
pERE [1]	1,149	1,125	1,102	1,168

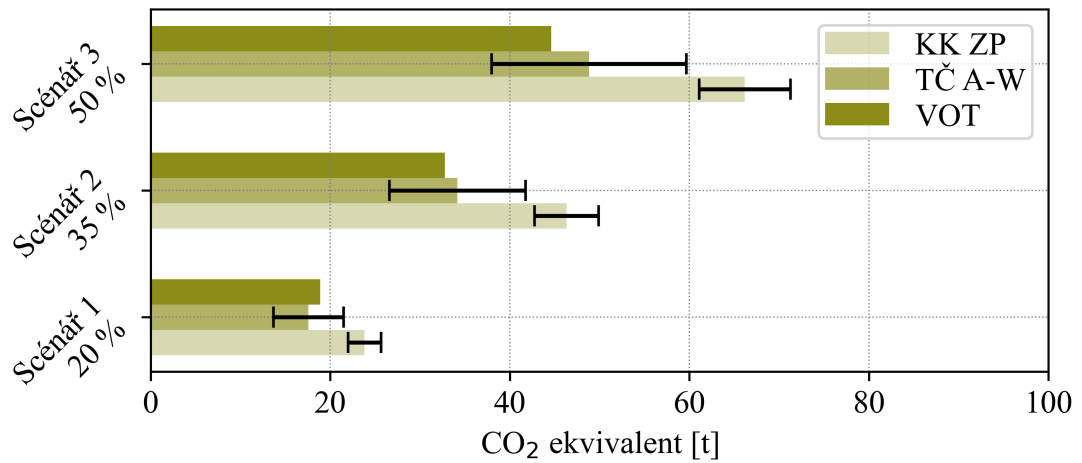
Pokračování tab. 13

Ukazatel	Scénář 1 20 %	Scénář 2 35 %	Scénář 3 50 %	Reference
Rezidenční budova starší zástavby				
Spotřeba elektřiny [MWh]	4378	4420	4459	4312
pPUE [1]	1,186	1,197	1,208	1,168
pERF [1]	0,025	0,050	0,074	0,000
pERE [1]	1,156	1,137	1,118	1,168

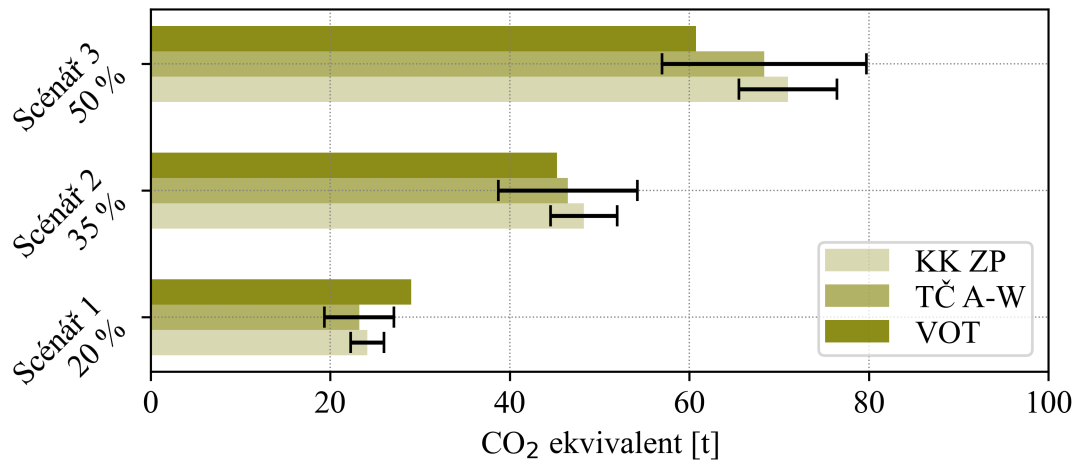
6.2 Systém VOT jako zdroj tepla

Do vyhodnocení jsou v této části zahrnuty spotřeby pouze TČ W-W a oběhových čerpadel systému VOT. Vyhodnocovaným indikátorem je CO₂ ekvivalent po jednom roce provozu, aby bylo možné mezi sebou porovnat plynové a elektrické zdroje tepla. V legendách zobrazení jsou pro přehlednost uvedeny pouze zkratková označení, kde KK ZP představuje kondenzační kotel na zemní plyn, TČ A-W tepelné čerpadlo typu vzduch/voda a VOT systém využití odpadního tepla. Dále jsou pro KK ZP a TČ A-W uvedeny rozptyly hodnoty CO₂ ekvivalentu v závislosti na dříve uvedených charakteristikách těchto zdrojů tepla, viz tab. 3 v teoretické části. U označení scénářů jsou pro přehlednost doplněny podíly nominálního výkonu systému VOT vzhledem k nominálnímu příkonu ICT.

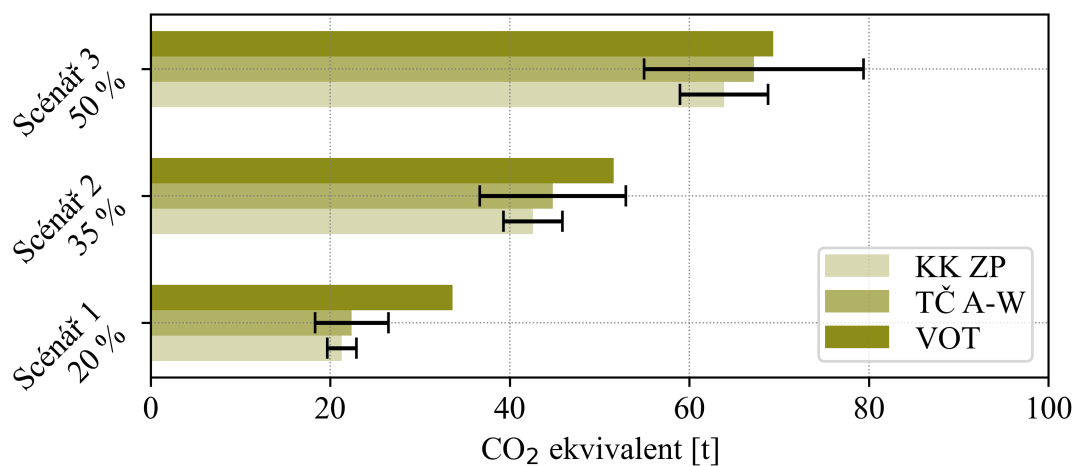
V grafech je možné pozorovat, jak výrazně závisí účinnost systému VOT na teplotní úrovni dodávaného tepla. Pro administrativní budovu byla teplota distribuce určena na 55 °C, a tak i pro scénář č. 1 (nejnižší výkonový stupeň) je hodnota ukazatele CO₂ ekvivalentu na srovnatelné úrovni pro všechny posuzované zdroje tepla. Na druhou stranu pro vyšší teplotní úrovně, tj. 65 a 75 °C, bylo ve scénářích č. 1 dosaženo systémem VOT výrazně vyšších hodnot ekvivalentních emisí CO₂ než u ostatních zdrojů tepla. Kompletní zpracované výsledky této sekce jsou uvedeny na obrázcích 26, 27 a 28.



Obr. 26 Porovnání zdrojů tepla: Administrativní budova



Obr. 27 Porovnání zdrojů tepla: Rezidenční budova soudobé zástavby

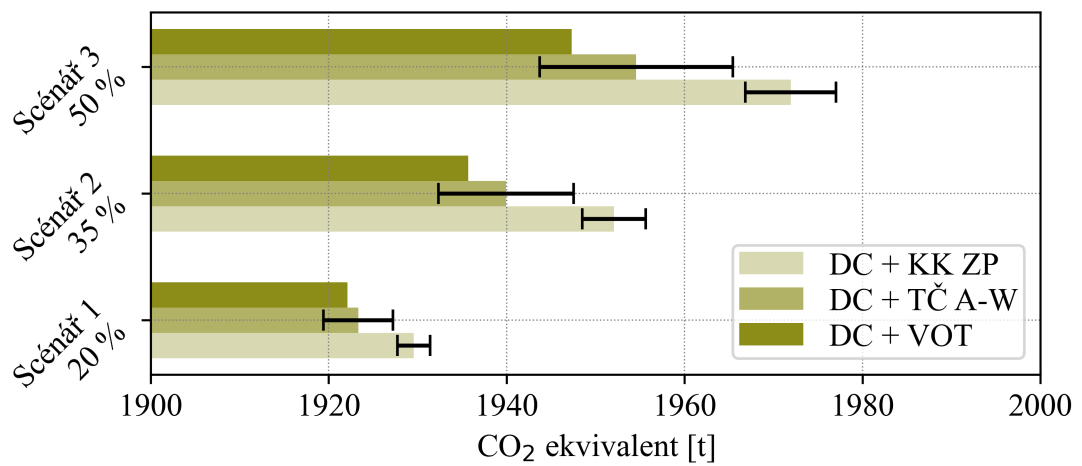


Obr. 28 Porovnání zdrojů tepla: Rezidenční budova starší zástavby

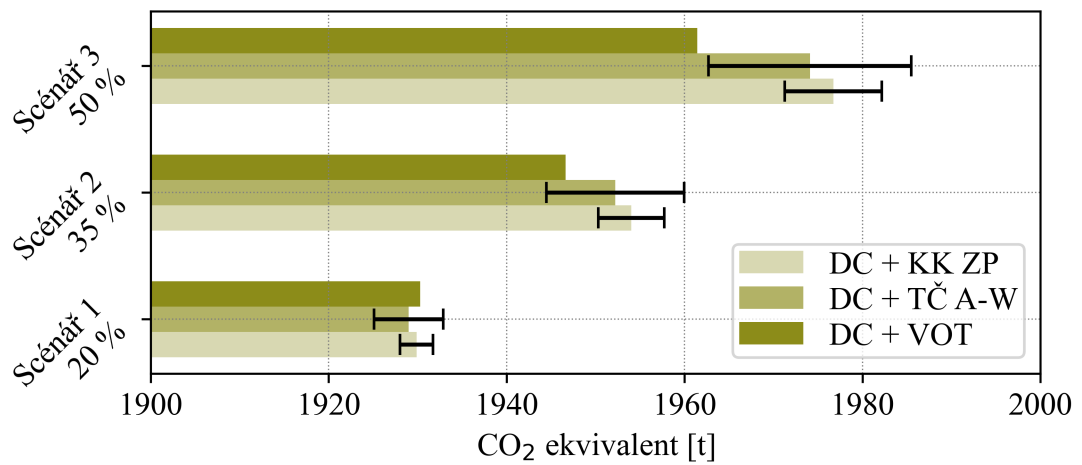
6.3 Globální vyhodnocení přínosu VOT

Celkový přínos byl vyhodnocen na základě hodnot ekvivalentních emisí CO₂, které porovnávají spotřebu DC včetně technologie VOT a součet spotřeby DC bez VOT a alternativy zdroje tepla. Jedná se sloučení předchozích dvou sekcí, které má za cíl zobrazit celkové přínosy systému VOT. Bilance spotřeby energie dle indikátoru CO₂ ekvivalentu systému VOT a alternativ je uvedena na obrázcích 29, 30 a 31. Rozptyly naznačené v grafech indikují rozsahy ekvivalentních emisí CO₂ dle charakteristik zdrojů tepla, viz tab. 3 v teoretické části. Scénáře jsou opět uvedeny včetně podílu nominálního výkonu VOT vůči ICT. Ve zobrazeních je možné si všimnout, že oproti srovnání systému VOT pouze jako zdroje tepla, dosahuje systém VOT lepších výsledků. Toto chování je důsledkem započtení přínosů na straně chlazení DC.

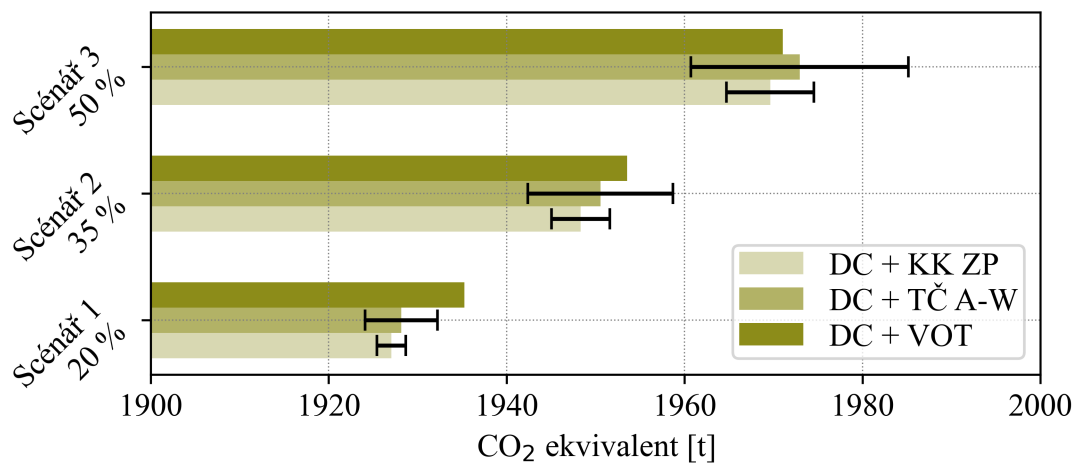
Z uvedených výsledků bilance spotřeby energie je zřejmé, že za určitých podmínek může VOT generovat finanční úsporu. Za účelem posouzení systému VOT z ekonomického hlediska byl v teoretické části práce definován ukazatel provozní úspory. Provozní úspora byla stanovena v časovém horizontu 10 let na základě porovnání systému VOT s alternativami zdrojů tepla dle vztahů a předpokladů uvedených v kapitole 4. Vyhodnocení proběhlo pro všechny typy budov a pro všechny scénáře. Z toho důvodu je v některých případech provozní úspora záporná, což znamená, že systém VOT byl v daném případě kontraproduktivní. Pokud je uváděná provozní úspora kladná, provoz systému VOT je v tom případě levnější než daná alternativa. Vyhodnocení indikátoru provozní úspory je rozděleno do dvou tabulek. V první (tab. 14) jsou uvedeny výsledky porovnání systému VOT vůči variantě s TČ A-W a ve druhé (tab. 15) systém VOT vůči variantě s KK ZP. Tabulky obsahují provozní úsporu po 10 letech (PU), které by bylo dosaženo v případě nahrazení daného zdroje tepla za systém VOT, provozní náklady (PN) za 10 let pro TČ A-W, resp. KK ZP, a relativní provozní úsporu (PU_{rel}).



Obr. 29 Globální vyhodnocení VOT: Administrativní budova



Obr. 30 Globální vyhodnocení VOT: Rezidenční budova soudobé zástavby



Obr. 31 Globální vyhodnocení VOT: Rezidenční budova starší zástavby

Tab. 14 Vyhodnocení provozní úspory VOT vůči TČ A-W

Ukazatel	Scénář 1 20 %	Scénář 2 35 %	Scénář 3 50 %
Administrativní budova			
PU ₁₀ [tis. Kč]	155	546	938
PN ₁₀ [tis. Kč]	2 268	4 410	6 300
PU _{rel} [%]	7	12	15
Rezidenční budova soudobé zástavby			
PU ₁₀ [tis. Kč]	-166	720	1 636
PN ₁₀ [tis. Kč]	2 999	5 997	8 819
PU _{rel} [%]	-6	12	19
Rezidenční budova starší zástavby			
PU ₁₀ [tis. Kč]	-915	-386	247
PN ₁₀ [tis. Kč]	2 890	5 780	8 670
PU _{rel} [%]	-32	-7	3

Tab. 15 Vyhodnocení provozní úspory VOT vůči KK ZP

Ukazatel	Scénář 1 20 %	Scénář 2 35 %	Scénář 3 50 %
Administrativní budova			
PU ₁₀ [tis. Kč]	2 068	4 267	6 253
PN ₁₀ [tis. Kč]	4 181	8 130	11 615
PU _{rel} [%]	49	52	54
Rezidenční budova soudobé zástavby			
PU ₁₀ [tis. Kč]	1 070	3 193	5 273
PN ₁₀ [tis. Kč]	4 235	8 470	12 456
PU _{rel} [%]	25	38	42
Rezidenční budova starší zástavby			
PU ₁₀ [tis. Kč]	-68	1 307	2 786
PN ₁₀ [tis. Kč]	3 737	7 474	11 210
PU _{rel} [%]	-2	17	25

7 Diskuze

Záměrem práce je posouzení systému VOT z DC pro lokální využití v malém měřítku. Do simulační analýzy jsou zahrnuty hypotetické provozní scénáře, kde je odpadní teplo využíváno pro potřeby vytápění, resp. přípravy teplé vody v budovách ve vzdálenosti 500 m od studovaného DC. Hlavním rozdílem od dosavadních studií na téma VOT z DC je respektování odběrového profilu budov, do kterých je odpadní teplo dodáváno. Jak bylo možné sledovat ve výsledkové části, tato koncepce zásadním způsobem ovlivňuje potenciál systému VOT.

Ve dříve uváděných publikacích [16], [38] a [39] je pro VOT z DC uvažována konstantní teplota distribuovaného tepla na základě předpokladu, že toto zjednodušení nemá zásadní vliv na získané výsledky. V této práci bylo toto zjednodušení uvažováno taktéž, ale vzhledem k většímu množství studovaných scénářů bylo možné ukázat, že teplotní úroveň dodávaného tepla má nezanedbatelný vliv na výsledky pro všechna sledovaná kritéria. Z analýzy výsledků také vyplývá, že není zcela korektní nahradit teplotní úroveň dodávaného tepla, která by se ve skutečnosti měla měnit dle klimatických podmínek, roční průměrnou teplotu. V důsledku střídání systému DX a volného chlazení totiž dochází ke změnám teplot vstupujících na výparník TČ W-W, což vede ke změně účinnosti systému VOT ve vazbě na teplotní úroveň dodávky tepla spotřebiteli. Systém VOT by tedy bylo možné optimalizovat z pohledu regulace teplotní úrovně a tím dosáhnout celkově vyšší účinnosti systému. Pro alternativní varianty zdroje tepla byly uvažovány optimální parametry provozu systému vytápění a přípravy TV. Zejména SCOP pro TČ A-W byl sice volen na základě dostupných technických možností dle aktuální tržní nabídky, přesto je ale možné předpokládat, že horní hranice rozsahů jsou vyšší, než jakých by pravděpodobně bylo možné dosáhnout ve skutečném provozu. I přes tyto rozdíly kvality regulace, které znevýhodňují systém VOT, bylo ve srovnání možné pozorovat, že simulovaná koncepce systému VOT má potenciál dosahovat za určitých podmínek lepších výsledků než ostatní uvažované zdroje tepla.

Obecně představuje systém VOT pro DC vyšší nároky na spotřebu energie, jak bylo možné sledovat v grafických zobrazeních měsíčního porovnání ukazatele pPUE. Tento závěr odpovídá teoretickým předpokladům a zároveň lze konstatovat, že spotřeba energie narůstá s množstvím tepla dodávaného přes hranici DC. Zásadním zjištěním je, že implementací

systemu VOT dojde k výraznému zhoršení účinnosti systému chlazení, ale zároveň existuje hranice množství dodaného tepla, od které benefity systému VOT pro systém DC a stranu odběru jako celek převáží jeho zhoršení účinnosti na straně DC. Na základě vyhodnocení systému VOT ze strany zdroje tepla bylo ukázáno, že při dostatečně vysokém odběru odpadního tepla spotřebitelem může být systém VOT z pohledu CO₂ ekvivalentu nejlepší z vyhodnocovaných variant. Obdobné trendy je možné sledovat i v rámci globálního vyhodnocení. V globálním měřítku vycházejí hodnoty CO₂ ekvivalentu přibližně o 2,5 až 5 tun relativně nižší oproti porovnání pouze z hlediska zdrojů tepla. To je dáno dvojí funkcí TČ W-W, které kromě navyšování teplotní úrovně zároveň částečně chladí DC.

O výsledné účinnosti systému VOT rozhodují dva provázané parametry, kterými jsou teplotní úroveň a množství tepla dodaného přes hranici DC. Poměr využitého a celkového odpadního tepla je reprezentovaný indikátorem pERF. Na základě analýzy není možné určit jednotnou hodnotu tohoto indikátoru, pro kterou je systém VOT efektivní. Zatímco pro administrativní budovu byla dostatečná hodnota pERF 0,028, pro rezidenční budovu starší zástavby už byl kvůli vyšší teplotní úrovni zapotřebí přibližně 2,5násobek. Ukazatel pERF představuje měřítko velikosti DC vůči systému VOT, z uvedených hodnot lze tedy odvodit, že pro efektivní systém VOT není rozhodující jen samotná technologie, ale také velikost a typ spotřebitele odpadního tepla. Hranice indikátoru pERF se jsou poměrně nízké, protože využité teplo představuje jednotky procent celkového objemu odpadního tepla DC. Na druhou stranu pro využití alespoň 3 % odpadního tepla z DC je zapotřebí, aby poměr mezi nominální tepelnou zátěží od ICT a tepelnou ztrátou budovy byl přibližně 1:5. Z toho plyne, že pro DC s nominální tepelnou zátěží ICT 500 kW je systém VOT z energetického hlediska vhodný pro spotřebitelský okruh s požadovaným výkonem minimálně 100 kW. Z ekonomického hlediska bylo možné pozorovat, že ukazatel provozní úspory dosáhl v několika případech záporných hodnot. Signifikantně pozitivní ekonomické bilance bylo dosaženo pouze pro scénáře č. 3 administrativní budovy a rezidenční budovy soudobé zástavby.

Nejvyšších kladných provozních úspor bylo obecně dosaženo v porovnání systému VOT a KK ZP. Je ovšem nutné poznamenat, že investičně je zdroj tepla v podobě kondenzačního kotle výrazně levnější než tepelné čerpadlo typu vzduch/voda anebo systém VOT. Provozní úsporu po 10 letech je tedy nutné chápat spíše jako maximální rozdíl počáteční investice. Lze odhadovat, že ani v jednom ze simulovaných případů by při započtení investičních nákladů nedosáhl systém VOT pozitivní ekonomické bilance.

Popsané výsledky simulační analýzy odpovídají obecným zjištěním v ostatních studiích zaměřených na VOT z DC. Tyto obecné závěry lze shrnout tak, že spotřeba energie DC roste v důsledku implementace technologie VOT, ale zároveň je možné náklady na tuto spotřebu pokrýt ziskem z distribuce odpadního tepla. Generovaná úspora energie, potažmo financí, je tím vyšší, čím více tepla bylo dodáno mimo hranici DC. Lokální využití odpadního tepla však nemusí nutně vést ke snížení ekvivalentních emisí anebo k finančním úsporám. Rozhodujícím parametrem je v tomto ohledu zejména teplotní úroveň a podíl využitého odpadního tepla vůči velikosti DC.

Závěr

Práce se zabývala simulačním posouzením dopadů lokálního využití odpadního tepla (VOT) z datového centra (DC) na energetickou a uhlíkovou náročnost včetně vyhodnocení provozních úspor, kterých lze systémem VOT dosáhnout. Na základě projektové dokumentace ke skutečnému DC společnosti OptoNet Communication byl v softwaru TRNSYS vytvořen numerický model typologicky shodného DC, který byl následně rozšířen o model systému VOT. Simulační analýza zahrnovala dohromady devět různých případů využití odpadního tepla pro potřeby vytápění a přípravy teplé vody v budovách v blízkosti DC. Vzhledem k nízké teplotě odpadního tepla na straně DC bylo nutné navýšit teplotní úroveň tepelným čerpadlem typu voda/voda, které bylo implementováno do okruhu volného chlazení. Provozní scénáře analýzy se lišily odběrovým profilem na straně spotřeby, teplotní úrovní a nominálním tepelným výkonem. Jednotlivé scénáře byly voleny tak, aby byla zmapována co nejširší oblast možných provozních stavů a aby bylo možné na jejich základě zobecnit závěry v rámci zadaného typu DC. Konkrétní výsledky studie jsou tedy platné zejména pro menší, regionální datová centra, tzv. „Edge Computing“, se systémem volného chlazení a vztahují se výhradně ke klimatickým podmínkám České republiky.

Z výsledků simulační analýzy vyplývá, že přínos VOT ve studovaném typu využití v porovnání se standardními zdroji tepla v budovách v rovině ekvivalentních emisí CO₂ i provozních nákladů závisí na relativní velikosti tepelného výkonu odběru vůči disipovanému tepelnému výkonu v DC a na požadovaných provozních podmínkách ze strany odběru odpadního tepla. Přínos VOT, zvláště pro řádově menší požadované tepelné výkony odběru, není vždy jednoznačný a pro některé simulované scénáře se implementace systému VOT ukázala dokonce jako kontraproduktivní. Na základě získaných výsledků lze konstatovat, že rozhodující vliv na účinnost systému VOT mají zejména tyto parametry:

- Teplotní úroveň dodávaného tepla

Teplotní úroveň výrazně ovlivňuje topný faktor tepelného čerpadla systému VOT, ale také podíl tepelných ztrát distribuční sítě. Se zvyšováním teplotní úrovně narůstá spotřeba energie a systém VOT dosahuje v porovnání s ostatními zdroji tepla horších výsledků ve všech sledovaných kritériích.

- Množství dodaného tepla přes hranici DC

V případě nízkého využití odpadního tepla vzhledem k velikosti DC dochází k neúměrnému nárůstu relativního podílu fixních složek spotřeby energie (tepelné ztráty, energie na dopravu teplonosné látky atp.). V důsledku toho se snižuje celková účinnost systému VOT. Provozní parametry systému tedy nezáleží pouze na účinnosti jednotlivých zařízení, ale také na odběrovém profilu a požadovaném tepelném výkonu na straně odběru.

- Odběrový profil

Odběrový profil spotřebitele odpadního tepla obvykle výrazně kolísá v závislosti na klimatických podmínkách a dalších aspektech. Z hlediska spotřeby energie jsou požadavky na dodávku tepla výhodnější zejména během teplejšího období roku, protože ke chlazení DC je využíván parní kompresorový okruh, a tepelné čerpadlo systému VOT tak může pracovat s vyššími teplotami na výparníku, což vede k vyššímu topnému faktoru. Odběrové profily budov ovšem zpravidla vykazují nejvyšší spotřebu tepla v chladné části roku, čímž je systém VOT nucen pracovat s horší účinností.

- Poměr velikosti DC vůči spotřebiteli odpadního tepla

Poměr mezi disipovaným tepelným výkonem z DC, resp. nominálním příkonem ICT, a požadovaným nominálním tepelným výkonem na straně odběru kombinuje předchozí parametry „odběrový profil“ a „množství dodaného tepla přes hranici DC“. Tímto poměrem je možné zjednodušeně posoudit, zda má smysl implementaci systému VOT v daném případě zvažovat. Zásadní výhodou tohoto parametru oproti ostatním je nenáročnost na vstupní informace a zároveň vysoká výpovědní hodnota o systému VOT.

Hlavním zjištěním této práce je, že ačkoliv je technologicky možné poměrně snadno zajistit vysokou účinnost zařízení technologie VOT v porovnání se standardními alternativami zdrojů tepla, není tím nutně zajištěna úspora spotřeby energie či na straně financí. Lokální využití odpadního tepla se ukázalo jako nevhodné pro malé poměry velikosti DC vůči spotřebiteli a tím spíše při požadavku na vysokou teplotní úroveň. Využití odpadního tepla v malých administrativních budovách, které jsou typicky přidružené k budově DC, nepředstavuje potenciál úspory. Naopak v důsledku zásahu do systému chlazení celková spotřeba energie roste, a proto je v těchto případech vhodné navrhnout jiný zdroj tepla,

např. tepelné čerpadlo typu vzduch/voda. Obecně lze na základě výsledků analýzy konstatovat, že v rámci studovaného VOT by měl být poměr velikosti DC vůči spotřebiteli přibližně 2:1, tzn. nominální příkon ICT by měl odpovídat dvojnásobku požadovaného maxima tepelného výkonu na straně spotřeby. Při splnění této podmínky je možné očekávat signifikantně pozitivní výsledky ve smyslu nižší hodnoty ekvivalentních emisí CO₂ a provozní úspory, zejména pro teplotní úroveň do 65 °C.

Seznam použité literatury

- [1] Paul A Swaine Michael R. a Freiburger. “ENIAC”. *Encyclopedia Britannica* (2023). [online]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/ENIAC> (cit. 04. 04. 2023).
- [2] L. Dittmar a Marc Schaefer. “Electricity demand modeling of German data centers: Dealing with uncertainties”. *Verlag: Universitätsverlag der TU Berlin ISSN 1869-5906* (led. 2009). [online]. DOI: 10.14279/depositonce-2296. (Cit. 25. 03. 2023).
- [3] European Commission. *Shaping Europe’s Digital Future*. [online]. Publications Office of the European Union, 2020. Dostupné z: https://commission.europa.eu/system/files/2020-02/communication-shaping-europes-digital-future-feb2020_en_4.pdf (cit. 25. 03. 2023).
- [4] Yanan Liu et al. “Energy consumption and emission mitigation prediction based on data center traffic and PUE for global data centers”. *Global Energy Interconnection* 3.3 (2020). [online], s. 272–282. ISSN: 2096-5117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2020.07.008>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096511720300761> (cit. 25. 03. 2023).
- [5] Environment Agency Austria a Borderstep Institute. *Energy-efficient Cloud Computing Technologies and Policies for an Eco-friendly Cloud Market*. [online]. European Commission, 2020. Dostupné z: https://commission.europa.eu/system/files/2020-02/communication-shaping-europes-digital-future-feb2020_en_4.pdf (cit. 25. 03. 2023).
- [6] George Kamiya. *Data Centres and Data Transmission Networks*. [online]. International Energy Agency. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks> (cit. 25. 03. 2023).
- [7] Evropská komise. *Cesta ke klimaticky neutrálnímu hospodářství: Strategie EU pro integraci energetického systému*. [online]. Evropská komise, 2020. Dostupné z: https://commission.europa.eu/system/files/2020-02/communication-shaping-europes-digital-future-feb2020_en_4.pdf (cit. 25. 03. 2023).
- [8] Daniel Bizo et al. *Uptime Institute Global Data Center Survey 2021*. [online]. Uptime Institute. Dostupné z: <https://itjoo.ir/Download/Uptime-Institute-Global-Survey-2021.pdf> (cit. 25. 03. 2023).
- [9] Chaoqiang Jin et al. “A review of power consumption models of servers in data centers”. *Applied Energy* 265 (2020). [online], s. 114806. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114806>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920303184> (cit. 25. 03. 2023).

- [10] Krishna Kant. “Data center evolution: A tutorial on state of the art, issues, and challenges”. *Computer Networks* 53.17 (2009). [online], s. 2939–2965. ISSN: 1389-1286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2009.10.004>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128609003090> (cit. 25. 03. 2023).
- [11] Khosrow Ebrahimi, Gerard Jones a Amy Fleischer. “A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31 (břez. 2014). [online]. DOI: 10.1016/j.rser.2013.12.007. (Cit. 25. 03. 2023).
- [12] Conteg s.r.o. *Uzavřená studená ulička*. [online]. Conteg s.r.o. Dostupné z: <https://www.conteg.cz/uzavrena-studena-ulicka> (cit. 25. 03. 2023).
- [13] Alfonso Capozzoli a Giulio Primiceri. “Cooling Systems in Data Centers: State of Art and Emerging Technologies”. *Energy Procedia* 83 (2015). [online], s. 484–493. ISSN: 1876-6102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.168>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215028337> (cit. 25. 03. 2023).
- [14] Daniel Bizo. *New ASHRAE guidelines challenge efficiency drive*. [online]. Uptime Institute Intelligence. Dostupné z: <https://journal.uptimeinstitute.com/new-ashrae-guidelines-challenge-efficiency-drive/> (cit. 25. 03. 2023).
- [15] AKCP. *Understanding the 4 Delta T's of a Data Center*. [online]. AKCP Remote Sensor Monitoring. Dostupné z: <https://www.akcp.com/blog/understanding-the-4-delta-t-of-a-data-center/> (cit. 25. 03. 2023).
- [16] Eduard Oró, Paolo Taddeo a Jaume Salom. “Waste heat recovery from urban air cooled data centres to increase energy efficiency of district heating networks”. *Sustainable Cities and Society* 45 (2019). [online], s. 522–542. ISSN: 2210-6707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.012>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670718314082> (cit. 25. 03. 2023).
- [17] Kevin Heslin. *A Look at Data Center Cooling Technologies*. [online]. Uptime Institute Intelligence. Dostupné z: <https://journal.uptimeinstitute.com/a-look-at-data-center-cooling-technologies/> (cit. 25. 03. 2023).
- [18] Daikin Industries. *Air-Cooled Chillers, Heat recovery chillers*. [online]. Daikin Industries, Ltd. Dostupné z: https://www.daikin.ch/content/dam/document-library/catalogues/as/air-cooled-chiller/ewtp-mbynn/EWTP-MBYN_EPLEN08-413_Catalogues_English.pdf (cit. 25. 03. 2023).
- [19] Jose Livin. *Data center Cooling Infrastructure*. [online]. Smart Data Center Insights. Dostupné z: <https://dc.mynetworkinsights.com/data-center-cooling-infrastructure/> (cit. 25. 03. 2023).

- [20] AKCP. *Direct Liquid Cooling for Data Centers*. [online]. AKCP Remote Sensor Monitoring. Dostupné z: <https://www.akcp.com/blog/direct-liquid-cooling-for-data-centers/> (cit. 25. 03. 2023).
- [21] Zhi Hu Xue, Bang Cheng Ai a Wei Qu. “Data center energy conservation study utilizing loop heat pipes as a chip-level cooling technique and its industrial application”. *Applied Thermal Engineering* 220 (2023). [online], s. 119715. ISSN: 1359-4311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119715>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431122016453> (cit. 25. 03. 2023).
- [22] Vertiv Group Corporation. *Liquid Cooling Options for Data Centers*. [online]. Vertiv Group Corporation. Dostupné z: <https://www.vertiv.com/en-asia/solutions/learn-about/liquid-cooling-options-for-data-centers/> (cit. 25. 03. 2023).
- [23] ASHRAE Technical Committee 9.9. *Water-Cooled Servers*. [online]. ASHRAE. Dostupné z: https://www.ashrae.org/File%20Library/Technical%20Resources/Bookstore/WhitePaper_TC099-WaterCooledServers.pdf (cit. 25. 03. 2023).
- [24] Rohit Gupta a Ishwar K. Puri. “Waste heat recovery in a data center with an adsorption chiller: Technical and economic analysis”. *Energy Conversion and Management* 245 (2021). [online], s. 114576. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114576>. (Cit. 25. 03. 2023).
- [25] Vladimír Zmrhal. “Přímé volné chlazení datových center”. *Vytápění, větrání, instalace* (2019). [online]. ISSN: 1210-1389. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/klimatizace-a-chlazení/19126-prime-volne-chlazení-datových-center> (cit. 25. 03. 2023).
- [26] Caesar Wu a Rajkumar Buyya. “Chapter 9 - Cooling Strategy”. *Cloud Data Centers and Cost Modeling*. Ed. Caesar Wu a Rajkumar Buyya. [online]. Morgan Kaufmann, 2015, s. 317–339. ISBN: 978-0-12-801413-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801413-4.00009-X>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012801413400009X> (cit. 25. 03. 2023).
- [27] STULZ GMBH. *Free Cooling – Direct and Indirect*. [online]. STULZ GMBH. Dostupné z: <https://www.stulz.com/newsroom/free-cooling-direct-and-indirect-1-2/> (cit. 25. 03. 2023).
- [28] ALFA LAVAL. *Free cooling with water*. [online]. ALFA LAVAL. Dostupné z: <https://www.alfalaval.com/industries/hvac/data-center-cooling/free-cooling-water/> (cit. 25. 03. 2023).
- [29] Khosrow Ebrahimi, Gerard F. Jones a Amy S. Fleischer. “A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31 (2014). [online], s. 622–638. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.007>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113008216> (cit. 25. 03. 2023).

- [30] TZBinfo. “Sorpční jednotky pro chlazení a vytápění s využitím odpadního tepla nebo spalováním zemního plynu”. (2022). [online]. ISSN: 1801-4399. Dostupné z: <https://vetrani.tzbinfo.cz/klimatizace-a-chlazení/23434-sorpční-jednotky-pro-chlazení-a-vytápění-s-využitím-odpadního-tepla-nebo-spalováním-zemního-plynu> (cit. 25. 03. 2023).
- [31] Cordin Arpagaus et al. “High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials”. *Energy* 152 (2018). [online], s. 985–1010. ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.166>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218305759> (cit. 25. 03. 2023).
- [32] Vladimír Zmrhal. “Požadavky na prostředí a bezpečnost chladivových klimatizačních systémů”. *Větrání, vytápění, instalace* (2022). [online]. ISSN: 1210-1389. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/~zmrhavla/Publikace/2022/Zmrhal_05_2022.pdf (cit. 25. 03. 2023).
- [33] A-Gas Group. *Product Information Guide*. [online]. A-Gas Group. Dostupné z: <https://www.agas.com/media/5hbnty0j/product-info-guide.pdf> (cit. 25. 03. 2023).
- [34] Vesterlund M. et al. “Data center for biomass drying”. (2021). [online]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1576003&dswid=9878> (cit. 25. 03. 2023).
- [35] Data Centre Dynamics. *2016 DCD EMEA Award winners announced*. [online]. Data Centre Dynamics. Dostupné z: <https://www.datacenterdynamics.com/en/event-news/2016-dcd-emea-award-winners-announced/> (cit. 25. 03. 2023).
- [36] Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky. *Posouzení dekarbonizace dálkového vytápění v České republice*. [online]. Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/strategicke-a-koncepcni-dokumenty/2022/6/Posouzeni-dekarbonizace-dalkoveho-vytapeni-v-Cesku_final.pdf (cit. 25. 03. 2023).
- [37] ČESKO. *Vyhláška č. 264/2020 Sb., o energetické náročnosti budov - znění od 1. 1. 2023*. [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2020-264#f6818459> (cit. 25. 03. 2023).
- [38] Mikko Wahlroos et al. “Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks”. *Energy* 140 (2017). [online], s. 1228–1238. ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.078>. (Cit. 25. 03. 2023).
- [39] Matti Pärssinen et al. “Waste heat from data centers: An investment analysis”. *Sustainable Cities and Society* 44 (2019). [online], s. 428–444. ISSN: 2210-6707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.10.023>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670718314318> (cit. 25. 03. 2023).
- [40] Caiqing Zhang, Hongxia Luo a Zixuan Wang. “An economic analysis of waste heat recovery and utilization in data centers considering environmental benefits”. *Sustainable Production and Consumption* 31 (2022). [online], s. 127–138. ISSN: 2352-5509. DOI: <https://doi.org/10.>

- 1016/j.spc.2022.02.006. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550922000409> (cit. 25. 03. 2023).
- [41] Henrik Lund et al. “Perspectives on fourth and fifth generation district heating”. *Energy* 227 (2021). [online], s. 120520. ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120520>. (Cit. 25. 03. 2023).
- [42] STIEBEL ELTRON. *Stiebel eltron toolbox*. [online]. STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG. Dostupné z: <https://www.stiebel-eltron.cz/toolbox/home/> (cit. 25. 03. 2023).
- [43] Haiyun An a Xiaoyan Ma. “Dynamic coupling real-time energy consumption modeling for data centers”. *Energy Reports* 8 (2022). [online], s. 1184–1192. ISSN: 2352-4847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.085>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722012252> (cit. 25. 03. 2023).
- [44] Xiaoyuan Chen et al. “Energy reliability enhancement of a data center/wind hybrid DC network using superconducting magnetic energy storage”. *Energy* 263 (2023). [online], s. 125622. ISSN: 0360-5442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125622>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222025087> (cit. 25. 03. 2023).
- [45] Nouhaila Lazaar et al. “Modeling and control of a hydrogen-based green data center”. *Electric Power Systems Research* 199 (2021). [online], s. 107374. ISSN: 0378-7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107374>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779621003552> (cit. 25. 03. 2023).
- [46] Johannes Oltmanns et al. “Potential for waste heat utilization of hot-water-cooled data centers: A case study”. *Energy Science & Engineering* 8.5 (2020). [online], s. 1793–1810. DOI: <https://doi.org/10.1002/ese3.633>. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ese3.633> (cit. 25. 03. 2023).
- [47] Yangyang Fu, Michael Wetter a Wangda Zuo. “Modelica Models for Data Center Cooling Systems”. (Zář. 2018). [online]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/biblio/1479111> (cit. 25. 03. 2023).
- [48] Jinkyun Cho, Taesub Lim a Byungseon Sean Kim. “Viability of datacenter cooling systems for energy efficiency in temperate or subtropical regions: Case study”. *Energy and Buildings* 55 (2012). [online], s. 189–197. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.012>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812004161> (cit. 25. 03. 2023).
- [49] Baptiste Durand-Estebe et al. “Simulation of a temperature adaptive control strategy for an IWSE economizer in a data center”. *Applied Energy* 134 (2014). [online], s. 45–56. ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.072>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914007557> (cit. 25. 03. 2023).

- [50] Je-Yong Kim et al. “Energy conservation effects of a multi-stage outdoor air enabled cooling system in a data center”. *Energy and Buildings* 138 (2017). [online], s. 257–270. ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.057>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816319582> (cit. 25. 03. 2023).
- [51] R.L. Shrivastava, Vinod Kumar a S.P. Untawale. “Modeling and simulation of solar water heater: A TRNSYS perspective”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (2017). [online], s. 126–143. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.005>. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116304944> (cit. 25. 03. 2023).
- [52] MIKE PATTERSON. *ERE: A METRIC FOR MEASURING THE BENEFIT OF REUSE ENERGY FROM A DATA CENTER*. [online]. The Green Grid. 2010. Dostupné z: <https://fhi.nl/app/uploads/sites/30/2014/04/4.InstallectGreenGridWhitepaper29ERE.pdf> (cit. 25. 03. 2023).
- [53] ČESKO. *Vyhláška č. 140/2021 Sb., o energetickém auditu - znění od 1. 4. 2021*. [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-140#f7012954> (cit. 25. 03. 2023).
- [54] European Environment Agency. *Greenhouse gas emission intensity of electricity generation*. [online]. European Union. Dostupné z: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-12/#tab-chart_2 (cit. 25. 03. 2023).
- [55] Ark Data Centres. *DATA CENTRES COMPARISON*. [online]. Ark Data Centres. Dostupné z: <https://arkdatacentres.co.uk/blog/comparing-data-centres-made-easy/> (cit. 25. 03. 2023).

Přílohy

SEZNAM TIŠTĚNÝCH PŘÍLOH

Označení	Popis
Příloha I	Technická dokumentace klimatizační jednotky, FläktGroup
Příloha II	Technická dokumentace suchého chladiče, Güntner
Příloha III	Charakteristika chladicí sestavy přímého výparu
Příloha IV	Skript VBA pro propojení MS Excel a TRNSYS
Příloha V	Výstupy simulací pro ověření modelu

SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH NA CD

Označení	Popis
1st_set_TRNSYS.xlsm	Výpočty pro úvodní nastavení komponent modelu
AB_profile.out	Data odběrového profilu pro administrativní budovu
DP-jindrich.pdf	Diplomová práce
ICT_profile.xlsx	Profil příkonu výpočetní techniky
HeatPump_W-W.xlsm	Model tepelného čerpadla pro systém VOT
KPI_Python.xlsx	Vyexportované výsledné hodnoty klíčových indikátorů
KPI_results.xlsm	Výpočty provozní úspory a dílčí grafické zpracování
RB_profile.csv	Data odběrového profilu pro rezidenční budovu
Vitocal-350-HT-Pro.pdf	Technická dokumentace k tepelnému čerpadlu pro VOT
Složka Python	
HR_admin_results.py	Skript zpracování výstupů simulace pro administrativní budovu
HR_BD65_results.py	Skript zpracování výstupů simulace pro rezidenční budovu soudobé zástavby
HR_BD75_results.py	Skript zpracování výstupů simulace pro rezidenční budovu starší zástavby
Partial_load_PUE_plot.py	Skript zpracování výstupů simulace dle vytížení ICT
Q_cool_rack_profile.py	Skript zpracování profilu příkonu ICT

Označení	Popis
Q_heat_admin_profile.py	Skript zpracování profilu odběru administrativní budovy
Q_heat_resid_profile.py	Skript zpracování profilu odběru rezidenčních budov
Složka TRNSYS	
Složka DCV OptoNet	Simulační model DC včetně výstupů simulace
Složka VOT-AB	Simulační model VOT pro administrativní budovu včetně výstupů simulace
Složka VOT-RBsou	Simulační model VOT pro rezidenční budovu soudobé zástavby včetně výstupů simulace
Složka VOT-RBst	Simulační model VOT pro rezidenční budovu starší zástavby včetně výstupů simulace

I Technická dokumentace: klimatizační jednotka



Balení jednotky

Jednotka upevněna na paletě a obalena kartonem.

Technická data vnitřní jednotka

Selekce

BRUTTO celkový výkon	kW	67.3
BRUTTO citelný výkon	kW	67.3
NETTO celkový výkon	kW	64.0
NETTO citelný výkon	kW	64.0
Odvlhčovací výkon	kW	0.0
Poměr citelného tepla		1.00
Výkon zpětného chlazení	kW	84.9
Účinnost EER		3.06

Stav vzduchu

Teplota vstupního vzduchu	°C	35.0	
Relativní vlhkost vstupního vzduchu	%		25
Měrná vlhkost vstupního vzduchu	g/kg	8.8	
Výstupní teplota	°C	23.2	
Měrná vlhkost výstupního vzduchu	g/kg	8.7	

Obecné

Vedení vzduchu Downflow (spodní výfuk)

Filtr

Typ filtru Filtr G4

Zvlhčovač

Zvlhčovací výkon	kg/h	8.0
Příkon	kW	6.0
Jmenovitý proud	A	8.7
Maximální spotřeba proudu	A	11.3
Vodivost	μS/cm	350-750

Ventilátor

Typ		EC ventilátor
Množství vzduchu	m ³ /h	16900
Externí statický tlak	Pa	20
Odpadní teplo motoru ventilátoru	kW	3.3
Otáčky	1/min	1263
Příkon	kW	3.3
Jmenovitý proud	A	5.1
Maximální spotřeba proudu	A	10.8

Chladicí okruh

Typ chladiva		R410A
Počet kompresorů na chladivový okruh		2
Počet chladících okruhů		1
Kondenzační teplota	°C	54.2
PED kategorie		CAT I

Kompresor

Typ		Inverter + Inverter
Příkon	kW	17.8
Jmenovitý proud	A	26.0
Maximální spotřeba proudu	A	45.0

CombiCool

BRUTTO celkový výkon	kW	56.3
BRUTTO citelný výkon	kW	56.3

NETTO celkový výkon	kW	53.0	
NETTO citelný výkon	kW	53.0	
Chladicí médium			Voda / Ethylen-Glykol
Koncentrace glykolu	%	38.0	
Vstupní teplota chladicího média	°C	14.0	
Výstupní teplota chladicího média	°C	20.0	
Hmotnostní průtok chladicího média	m ³ /h	8.93	
Tlaková ztráta ventilu	kPa	7	
Tlaková ztráta jednotky	kPa	34	
Elektřina			
Napájení			3~400V, N, PE, 50Hz
Příkon v režimu chlazení	kW	22.0	
Příkon maximální	kW	28.0	
Spotřeba proudu v režimu chlazení A	A	33.0	
Maximální spotřeba proudu	A	73	
Doporučená hodnota jističe typu D A	A	80	
Připojovací rozměry			
CombiCool			
Typ			Závitové připojení BSP
Chladicí médium vstup	"	2	
Chladicí médium výstup	"	2	
Chladivo			
Typ			Pájené připojení
Výtlačné potrubí	"	7/8	
Kapalinové potrubí	"	7/8	
Různé			
Připojení zvlhčovače	mm	15	
Odvod kondenzátu	mm	2x22	
Trasa Cu mezi vnitřní a venkovní jednotkou			
Výtlačné potrubí	mm	28	
Kapalinové potrubí	mm	22	
Celková délka	m	26	
Převýšení	m	+6	
Počet 90° kolen	ks	10	
Rozměry a hmotnost jednotky			
Délka	mm	1992	
Šířka	mm	780	
Výška	mm	1968 + 200 podstavec	
Hmotnost	kg	610	
Zvuková data			
Hladina akustického tlaku ve volném poli			dB(A) 69
Akustický tlak vzdálenost	m	2.0	
Hladina akustického výkonu			dB(A) 90
NR křivka			65

Výrobek FläktGroup
Typ DMA065DLCIS4PN1

II Technická dokumentace: suchý chladič



Date: 28.1.2022

Part load calculation for GFHV FD 080.2NF/13A-45-0NPF.28RM

Zadání pro částečný výpočet

Výpočet

Pevný výkon a kondenzační teplota

Calculate air volume flow, fan speed and sound pressure (not recommended)

Parametry média

Výkon: 110 kW

Parametry zadání: Vstupní/výstupní teplota

Vstupní teplota: 20.8 °C

Výstupní teplota: 15.5 °C

Sound limitation requirements

ve vzdálenosti: 10 m

Rozsah teplot vzduchu

Min. teplota vzduchu: -2 °C

Max. teplota vzduchu: 8 °C

Velikost kroku: 1 K

Vypočítány byly následující výsledky:

Teplota vzduchu [°C]	Výstupní tepl. vzduchu [°C]	Průtok média [m³/h]	Air flow [m³/h]	Otáčky [min-1]	Hladina akust. tlaku [dB(A)]	Motor capacity per motor [kW]
8.0	16.5	19	39840	645	44 dB(A)	1.03 kW
7.0	16.8	19	34670	561	41 dB(A)	0.68 kW
6.0	17.1	19	30666	496	38 dB(A)	0.47 kW
5.0	17.3	19	27670	448	36 dB(A)	0.35 kW
4.0	17.5	19	25281	409	34 dB(A)	0.26 kW
3.0	17.7	19	23240	376	32 dB(A)	0.20 kW
2.0	17.8	19	21552	349	30 dB(A)	0.16 kW
1.0	18.0	19	20059	324	29 dB(A)	0.13 kW
0.0	18.2	19	18791	304	27 dB(A)	0.11 kW
-2.0	18.4	19	16732	271	25 dB(A)	0.08 kW
-1.0	18.3	19	17711	286	26 dB(A)	0.09 kW

III Charakteristika chladicí sestavy DX

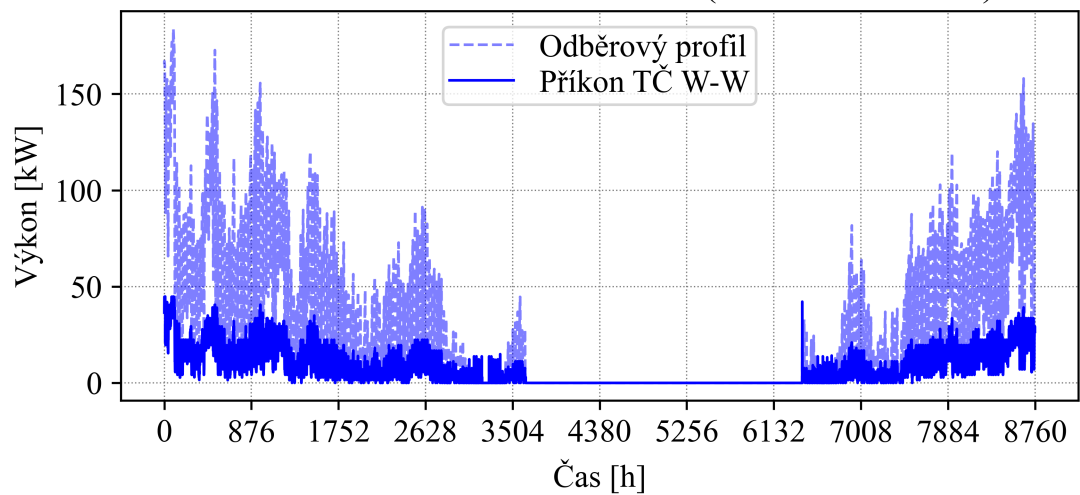
T_in [°C]	T_out [°C]	T_ext [°C]	Chl. výkon [kW]	Příkon [kW]
35	23,2	40	55	17,1
35	23,2	37	55	16,3
35	23,2	36	55	16,1
35	23,2	35	55	15,8
35	23,2	34	55	15,5
35	23,2	33	55	15,2
35	23,2	32	55	13,7
35	23,2	31	55	13,5
35	23,2	30	55	13,2
35	23,2	29	55	13,0
35	23,2	28	55	12,7
35	23,2	27	55	12,5
35	23,2	26	55	12,3
35	23,2	25	55	12,1
35	23,2	24	55	11,9
35	23,2	23	55	11,8
35	23,2	22	55	11,7
35	23,2	21	55	11,7
35	23,2	20	55	11,6
35	23,2	19	55	11,7
35	23,2	18	55	11,7
35	23,2	17	55	11,7
35	23,2	16	55	11,7
35	23,2	15	55	11,7
35	23,2	14	55	11,7
35	23,2	13	55	11,7
35	23,2	12	55	11,7
35	23,2	11	55	11,7
35	23,2	10	55	11,7
35	23,2	9	55	11,7

IV Skript VBA

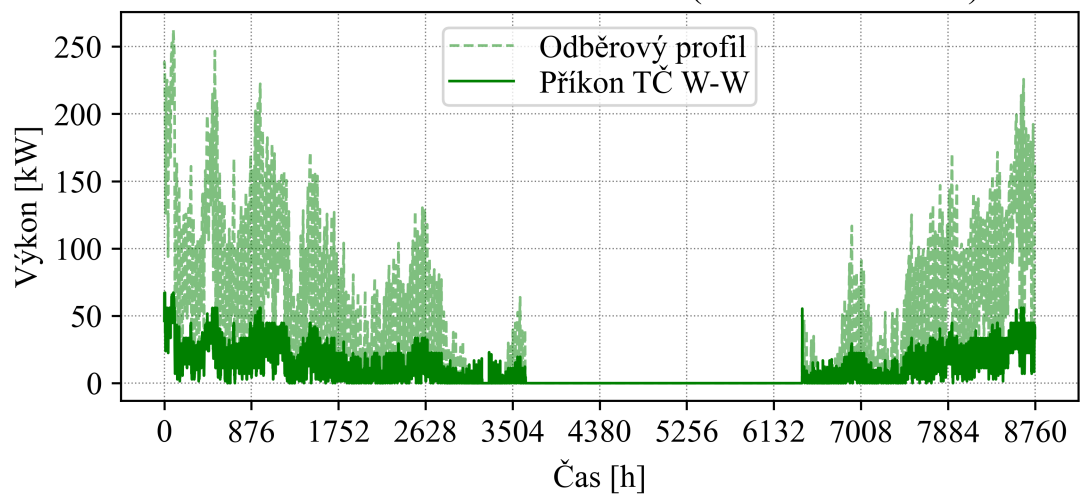
```
Sub TRNSYS(Optional Input1 As Variant, _  
    Optional Input2 As Variant, _  
    Optional Input3 As Variant, _  
    Optional Input4 As Variant, _  
    Optional Input5 As Variant, _  
    Optional Output1 As Variant, _  
    Optional Output2 As Variant, _  
    Optional Output3 As Variant, _  
    Optional Output4 As Variant, _  
    Optional Output5 As Variant)  
  
    Range("_Inp1") = Input1    *Prutok vyparnikem  
    Range("_Inp2") = Input2    *Vstupni teplota vyparniku  
    Range("_Inp3") = Input3    *Vstupni teplota kondenzatoru  
    Range("_Inp4") = Input4    *Prutok kondenzatorem  
    Range("_Inp5") = Input5    *Vystupni teplota kondenzatoru  
    Range("_Inp6") = Input6    *Pocet vykonovych stupnu  
  
    *Vystupy:  
    *1 - Vystupni teplota na vyparniku  
    *2 - Prikon TC W-W  
    *3 - Vystupni teplota na kondenzatoru  
    *4 - Ridici signal cernadla vyparniku  
    *5 - Ridici signal cernadla kondenzatoru  
  
End Sub
```

V Výstupy ověření modelu

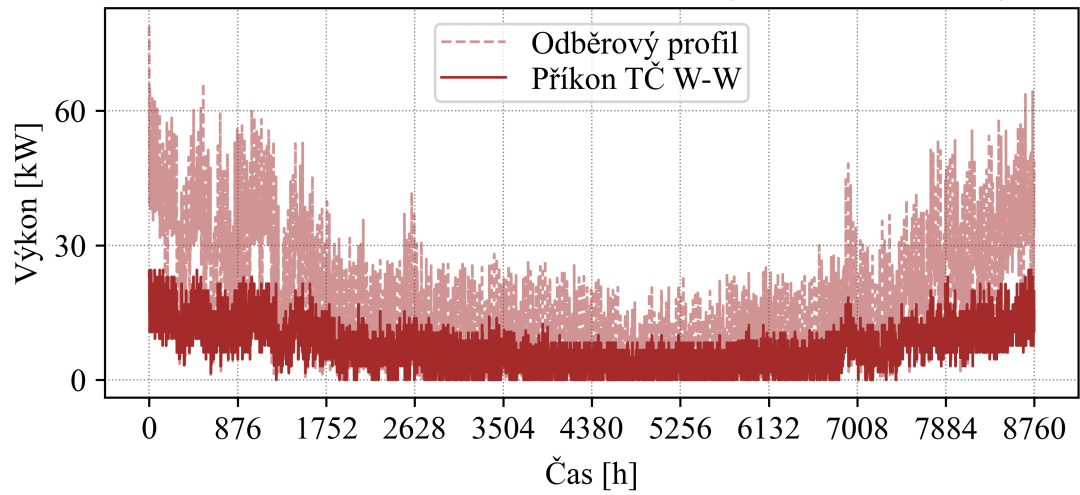
Ověření TČ W-W: AB scénář 2 (VOT 35 % z ICT)



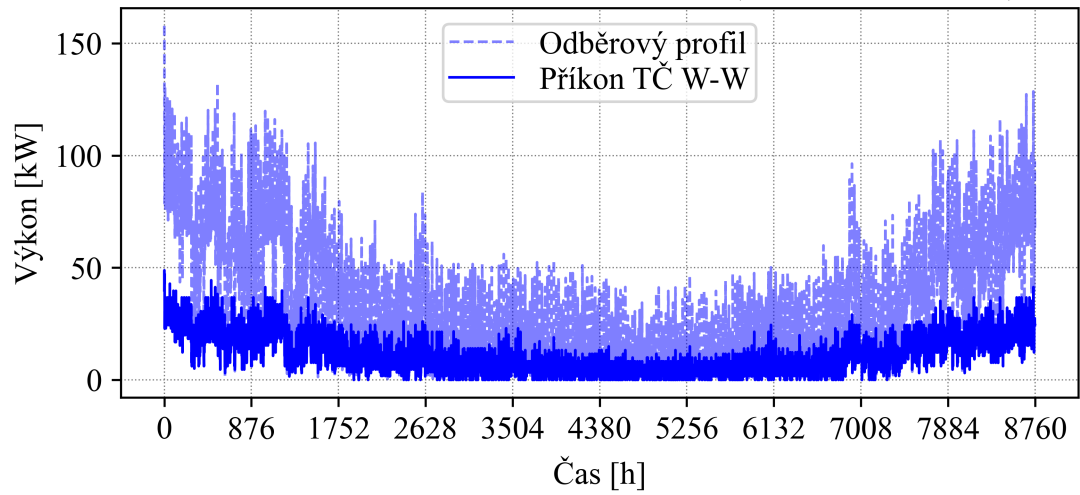
Ověření TČ W-W: AB scénář (VOT 50 % z ICT)



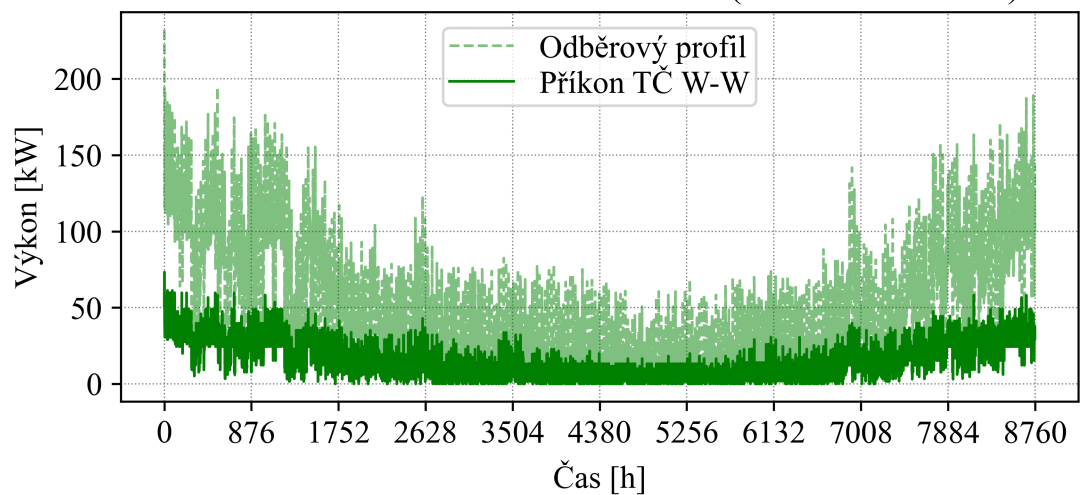
Ověření TČ W-W: RBsou Scénář 1 (VOT 20 % z ICT)



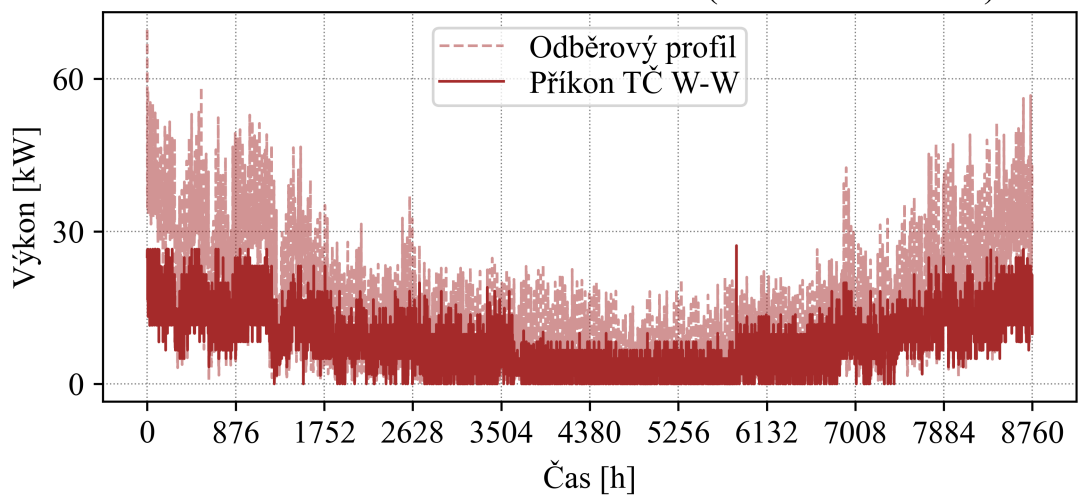
Ověření TČ W-W: RBsou Scénář 2 (VOT 35 % z ICT)



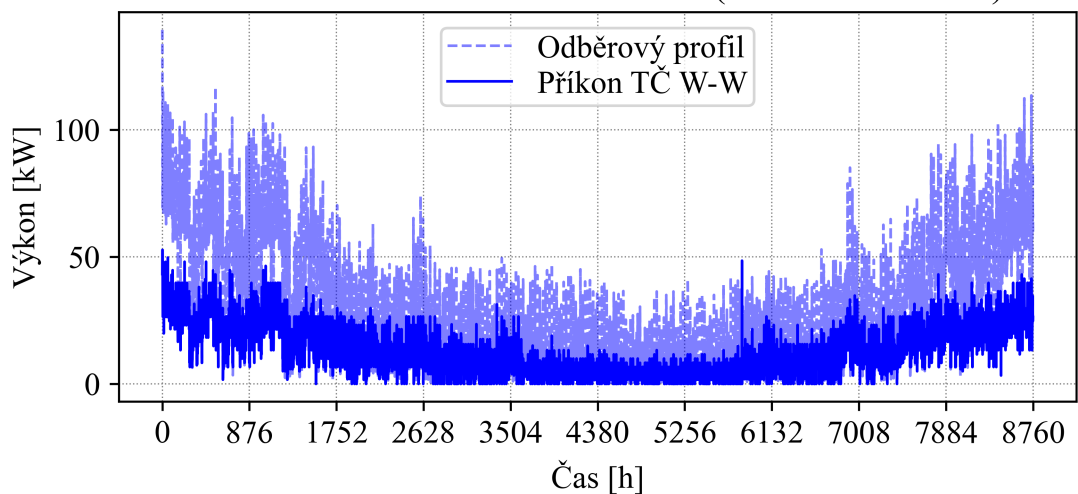
Ověření TČ W-W: RBsou Scénář 3 (VOT 50 % z ICT)



Ověření TČ W-W: RBst Scénář 1 (VOT 20 % z ICT)



Ověření TČ W-W: RBst Scénář 2 (VOT 35 % z ICT)



Ověření TČ W-W: RBst Scénář 3 (VOT 50 % z ICT)

