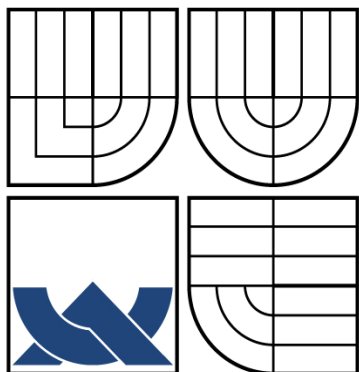




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

CHLAZENÍ DATOVÉHO CENTRA

COOLING OF DATA CENTER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. JAKUB OSTREZI

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. JOSEF ŠTĚTINA, PH.D.

BRNO 2011

Místo této stránky přijde vložit zadání práce

Anotace

Cílem této práce je navrhnout datové centrum umístěné do přepravního ISO kontejneru. Důraz je kladen na maximální využitelnost daného prostoru a minimální provozní náklady. Součástí práce je i praktické měření výkonu jednotlivých komponent datového centra, CFD model datacentra, simulace vnějších tepelných zisků, 3D model a základní výkresová dokumentace.

Klíčová slova

server, serverovna, datové centrum, DC, cluster, rack, kontejner, odpadní teplo, volné chlazení, efektivita, vnější zisky.

Annotation

The aim of this work is to design data center placed into an ISO container used for transportation. Maximization of the space efficiency and minimization of the running costs are primary. This work also contains a measurement of data center electronic parts power consumption, a computational fluid dynamics model, a simulation of external thermal gains and a 3D model with basic technical drawings.

Keywords

server, data center, DC, cluster, rack, container, waste heat, freecooling, efficiency, thermal gains.

Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Chlazení datového centra vypracoval samostatně, bez cizí pomoci. Vycházel jsem při tom pouze ze svých znalostí, odborných konzultací a čerpal jsem pouze z pramenů v práci uvedených.

V Brně dne 27.05.2011

.....

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval svým rodičům, kteří mi svou podporou umožnili studium na této škole.

Dále děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Obsah

Úvod.....	13
2. Výpočet tepelné bilance.....	14
2.1 Měření výkonu a příkonu serverových komponent.....	14
2.2 Vliv jednotlivých komponent na celkový výkon serveru.....	21
2.3 Kalorimetrické měření výkonu procesorů.....	23
2. Kontejnerové datové centrum.....	26
2.1 Volba kontejneru a vnitřního uspořádání komponent.....	26
2.2 Tepelná izolace kontejneru.....	30
2.3 Výběr rackových skříní.....	32
2.4 Návrh chladicího zařízení.....	33
2.5 Návrh prostorového uspořádání zařízení.....	37
2.6 Návrh větracího zařízení.....	39
2.7 Návrh chlazení záložních zdrojů elektrické energie.....	40
2.8 Možnosti dalšího využití odpadního tepla.....	41
3. CFD Simulace.....	42
3.1 Popis projektovaného datového centra.....	42
3.2 Geometrie a vlastnosti jednotlivých částí.....	43
3.3 Vytvoření vhodné sítě.....	45
3.4 Nastavení fyzikálních modelů.....	47
3.5 Nastavení okrajových podmínek.....	47
3.6 Provedení simulace.....	48
3.7 Simulace technologické místnosti.....	52
3.8 Zhodnocení simulace.....	52
4. Výpočet tepelných zisků programem TrnSYS.....	53
4.1 Vnější vlivy působící na datové centrum.....	53
4.1.1 Působení vzduchu.....	53
4.1.2 Působení vody.....	53
4.1.3 Působení slunečního záření.....	54
4.2 Sestavení modelu datového centra.....	54
4.3 Nastavení jednotlivých výpočetních objektů.....	56
4.4 Výpočet chladicího výkonu.....	58
4.5 Výpočet solárních zisků.....	62
4.6 Závěr simulace.....	63
Závěr.....	64
Seznam použitých zdrojů.....	65
Seznam symbolů.....	67
Seznam příloh.....	69
Seznam obrázků.....	71
Seznam tabulek.....	73

Úvod

Současný věk je často nazýván věkem informatiky. Žádné odvětví lidské činnosti nezaznamenalo za jednu dekádu takový vzestup, jako právě výpočetní technologie. Před deseti lety by jen málokdo pomyslel, že výpočetní technika se stane nedílnou a naprosto nepostradatelnou součástí našich životů. Dnes už ale víme, že je tomu právě naopak. Tyto technologie pronikly do všech sfér našeho života. Další mezník započal s nástupem internetu. Ten dokázal tyto technologie propojit do jedné celosvětové sítě. Koncovými prvky této sítě jsou naše telefony, netbooky, notebooky anebo stolní počítače. Internet jako takový však není tvořen pouze jimi. Srdcem celého internetu jsou především datová centra (DC). Ty zajišťují nejen propojení mezi jednotlivými částmi internetu, ale také obrovská datová úložiště a výpočetní kapacity.

V současné době jsou po celém světě budována nová datová centra, která mají za úkol rozšířit kapacity internetu a přinést tak koncovým uživatelům nové možnosti. Datové centrum, jako takové, sestává ze značného množství jednotlivých serverů, jejichž účel je různorodý. Některé mají za úkol ukládat a archivovat uživatelské data, jiné disponují vysokým výpočetním výkonem. Nároky uživatelů ovšem rapidně rostou, proto rychle roste i počet budovaných datacenter. Minulost i současnost se nese v duchu budování datacenter výhradně uvnitř staveb. Datové centrum je v takovém případě umístěno v místnosti, nebo ve více místnostech. Servery jsou nejčastěji umístěny ve formě racků do rackových skříní. Veškeré technologické zázemí datového centra se nachází buď ve stejné místnosti jako servery, popřípadě v místnosti přilehlé.

Hlavní nevýhodou takového datového centra je především časová a finanční náročnost jeho vybudování. Buďto je nutno postavit budovu novou, nebo kvůli normám (zateplení, hluk, napájení, chlazení) rekonstruovat již stojící prostory. Pokud jsou možnosti tohoto datového centra vyčerpány, je nutno opět stavět anebo rekonstruovat. Toto se vždy negativně projeví na počátečních investicích do nového datového centra. Výhodnou alternativou je tedy umístit datové centrum jinam, než do budovy. Řešením je právě instalovat kompletní obsah datového centra do přepravního kontejneru, což několikanásobně sníží pořizovací náklady a poskytne nové možnosti. Mezi ně patří především rychlé vybudování a mobilita. Hlavní je ovšem možnost použít unifikovaný kontejner jako základní stavební blok a skládáním více a více kontejnerů rozšiřovat kapacity takového datového centra.

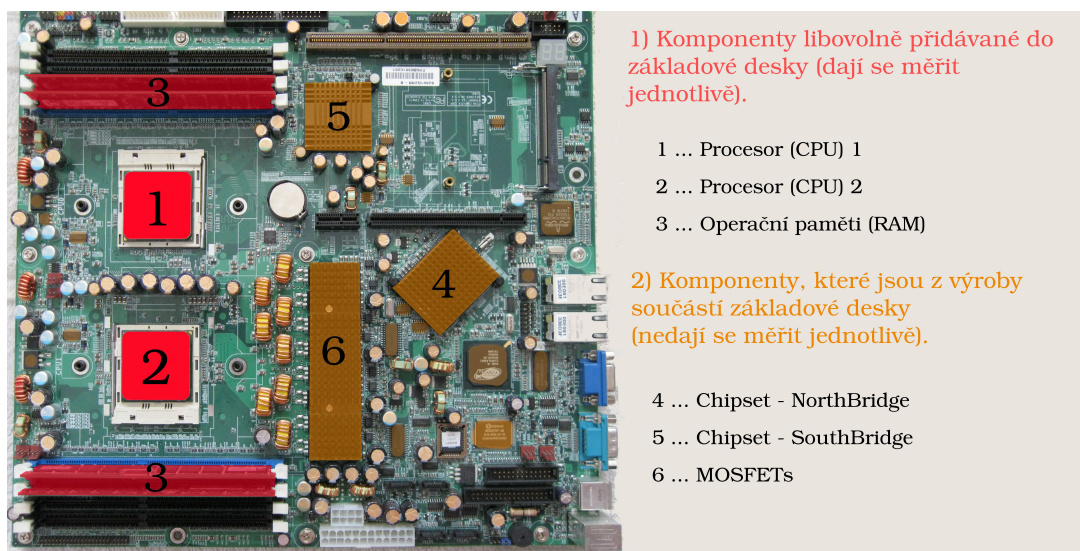
Kontejnerové datové centrum může hostit různé typy zařízení. Díky rackovým stojanům je možné do nich umístit výpočetní cluster (xU racky, blade servery), disková pole, síťová zařízení, případně záložní zdroje energie UPS. Díky vysoké koncentraci výkonu na objem místnosti je také možné s vysokou účinností takové datové centrum chladit a obsluhovat. Tato práce se zabývá jak návrhem a výpočtem kontejnerového datového centra, tak způsoby jeho následného využití a provozu.

Cílem této práce je v následujících kapitolách popsat a rozebrat:

- energetickou spotřebu jednotlivých komponent v rámci serveru a DC,
- technologický návrh a tepelný výpočet DC umístěného v kontejneru,
- simulaci proudění tepla a hmoty v navrhovaném datovém DC za pomoci CFD.

2. Výpočet tepelné bilance

Pro přesné určení energetické náročnosti datového centra je v první řadě nutno vědět, jakou funkci bude plnit a jaké komponenty bude tudíž obsahovat. Jinou náročnost bude mít DC určené pro zálohování dat, oproti DC určenému primárně pro výpočty. Je tedy nezbytné zaměřit se na jednotlivé komponenty, které jsou používány, a jejichž energetické vlastnosti jsou potřeba znát.



Obrázek 1: Komponenty umístěné na serverové základové desce.

Na prvním místě jsou komponenty obsažené v šasi samotné: zdroj, základová deska, CPU, RAM, pevné disky, případně i grafická karta. Dále musí datacentrum obsahovat síťové prvky (switche, routery) a záložní zdroje energie (UPS). Na následujících stranách budou tyto jednotlivé komponenty rozebrány a bude určen jejich podíl na energetické (a tudíž i tepelné) bilanci. Teoretické výsledky udávané výrobcí komponent budou porovnány s provedenými měřeními.

2.1 Měření výkonu a příkonu serverových komponent

Žádná z běžně používaných počítačových komponent není schopna sama měřit svoji vlastní spotřebu energie. Nejpřesnějšího měření bychom dosáhli, pokud by bylo možno měřit napětí na komponentě a proud jí protékající. Za předpokladu stejnosměrného napětí by se celkový výsledný výkon určil dle následujícího vztahu.

$$\dot{Q} = P = U \cdot I = R \cdot I^2 = \frac{U^2}{R} \quad (1)$$

Takto spotřebovávaná elektrická energie se všechna disipuje na energii tepelnou. Jedná se o takzvané jouleovo teplo.

Vzhledem k propojení komponent a komplikovanosti napájecích obvodů není ovšem takovéto měření možné. Procesor je například pevně umístěn v socketu základní desky, kterým je i napájen. Propojení sestává z tisíce jednotlivých kontaktů, proto je nemyslitelné měřit na každém z nich příslušné napětí a protékající proud. Toto platí i u všech dalších základních komponent jako RAM anebo grafické karty. Tento typ měření lze použít jen pro zjištění příkonu disků, viz. Konec této kapitoly. Pokud je třeba zjistit spotřebu CPU, RAM anebo základové desky, je na místě zvolit přístup jiný.

Realizovatelné by bylo měření napětí a proudů přímo za zdrojem. Tím by se dokázala přesně určit spotřeba základové desky a všech komponent na ni připojených. U serveru by si takovéto řešení vyžádalo měřit napětí a proudy na 24 základních větvích (20+4 pinové ATX napájení) a 8-18ti přidaných větvích (EPS12V, 4-pin 12 V, případně 6-pin 12 V). Celkem by se tedy v každém momentě musel monitorovat proud a napětí až na 42 větvích. Měření by bylo velmi přesné a eliminovala by se spotřeba zdroje ovlivněná jeho účinností. Opět by nám ale takové měření neřeklo nic o jednotlivých komponentách na základové desce a především by nebylo technicky proveditelné v domácích podmínkách.

Proto bude provedeno jednoduché a technicky nenáročné měření serveru za pomoci wattmetru. Výsledky nám ukáží výkon a příkon celé sestavy, který bude součtem dílčích výkonů všech komponent obsažených v sestavě. Aby byl zjištěn přibližný výkon jednotlivých částí, budou v průběhu měření odebírány nebo přidávány. U každé jednotlivé konfigurace bude měřena spotřeba elektrické energie a výsledným porovnáním všech konfigurací bude přibližně určen výkon použitých komponent.

Tabulka 1: Seznam použitých komponent

Základová deska:	TYAN Transport GT24	Socket 940 E-ATX, NVIDIA nForce4 Prof.
Procesory 1:	2 × AMD Opteron 246	Single-Core, 2,0 Ghz, Troy, TDP 85 W
Procesory 2:	2 × AMD Opteron 285	Dual-Core, 2,6 Ghz, Italy, TDP 95 W
Paměti RAM:	4 × Kingston 1 GB	PC3200, DDR, 400 Mhz, ECC, Registered
Zdroj:	Fortron 400 W	FSP400-60GHN, Active PFC
Pevný disk:	Western Digital Raptor	40 GB, 16 MB Cache, 10 000 rpm
Operační Systém:	Unix, Ubuntu	Maverick Meerkat (10.10), 64-bit

Testovací sestava je reálný server používaný pro náročnější výpočty CFD simulací. Je postaven na kvalitní serverové desce, kterou je možno osadit až dvěma CPU, a to jak jedno-jádrovými, tak dvoj-jádrovými. Při testech byly použity oba typy.

Podmínky měření a měřicí přístroje

- Wattmetr: VOLTCRAFT Energy Check 3000 (třída přesnosti ± 1 %).
- Ampérmetr: RE92-A RANGE (třída přesnosti ± 2 %).
- Voltmetr: FKtechnics FK8400 (třída přesnosti $\pm 0,5$ %).
- Síťové napětí: 233 V.
- Teplota v měřicí místnosti: 21 °C.

Měření probíhalo za daných podmínek, byl měřen výkon a příkon celého serveru, přičemž byly měněny jednotlivé komponenty. Základní měření proběhlo na jednoprocessorové a jedno-jádrové sestavě. Byl použit procesor AMD Opteron 246 s 1 GB operační pamětí. Následovalo měření při přidání 1 GB paměti a měření při přidání dalších 2 GB. Paměť byla poté snížena na 2 GB a proběhlo měření s dvou-jádrovým procesorem AMD Opteron 268. Poslední měření byly provedeny s dvěma dvou-jádrovými procesory v sestavení s 2 GB a 4 GB pamětí. Disk a na něm nainstalovaný operační systém nebyl během měření měněn.

Pro měření byly použity 3 stupně zatížení systému. První bylo měření ve stand-by režimu, kdy byla sestava pouze zapojena do sítě a nebyla spuštěna. Druhé měření zjišťovalo hodnoty výkonu a příkonu při zapnutém serveru v rozhraní BIOS. Bylo zamýšleno měřit i hodnoty při nabootovaném operačním systému bez zatížení, ty se ale ukázaly jako přibližně totožné s hodnotami naměřenými při načteném BIOSu. Poslední měření se konalo při plném zatížení všech osazených jader.

Toho bylo dosaženo pomocí programu Kalkulačka. Byl zadán dostatečně složitý výpočet faktoriálu z vysokého čísla ($10^8!$). Pro každé jádro byl spuštěn výpočet stejný, čímž došlo k vytížení procesorů na 100 % a tak i k nejvyšší dosažitelné spotřebě za běžných výpočetních podmínek. Vyšších výkonů by mohly procesory dosáhnout pouze při použití speciálních syntetických testů, což už by ovšem bylo nad rámec tématu této práce.

Měřicí přístroj dovozoval jak měření příkonu, tak výkonu. Výkon je udáván ve Wattech a je roven energii, která se v serveru disipuje na teplo. Příkon má jednotku VA (volt ampér) a je to součin napětí a proudu, který protéká serverem. Jelikož se jedná o měření střídavého proudu a vektory napětí a proudu jsou vzájemně posunuty, určuje vztah mezi výkonem a příkonem takzvaný účinník ($\cos \phi$). Příkon je důležitý zejména pro správnou volbu záložních zdrojů energie, jelikož jejich výrobci udávají hodnoty těchto zařízení právě ve VA.

Výsledky měření jsou uvedeny v následující tabulce:

Tabulka 2: Měření spotřeby serveru v různých konfiguracích

Měření	CPU	Počet CPU	Počet jader	RAM	Stand-by	BIOS – OS	Full Load
[-]	[-]	[-]	[-]	[GB]	[W] / [VA]	[W] / [VA]	[W] / [VA]
1	Opteron 246	1	1	1	5 / 7	86 / 92	96 / 102
2	Opteron 246	1	1	2	5 / 7	92 / 98	98 / 104
3	Opteron 246	1	1	4	5 / 7	92 / 98	102 / 107
4	Opteron 246	2	2	2	6 / 8	150 / 160	180 / 185
5	Opteron 285	1	2	2	5 / 7	119 / 124	139 / 146
6	Opteron 285	2	4	2	6 / 9	173 / 178	236 / 243
7	Opteron 285	2	4	4	6 / 9	189 / 196	243 / 250

Výkon ve stand-by režimu u jednoho serveru je poměrně zanedbatelné číslo, ovšem při použití desítek, či dokonce stovek takovýchto serverů se jedná o stovky wattů až jednotky kilowattů stand-by výkonu. Hodnoty pro provoz v BIOS režimu a při plném zatížení v OS jsou již řádově výše. Porovnáním výsledků jednotlivých měření lze nyní přibližně určit výkony jednotlivých komponent a jejich vliv na celkový výkon serveru.

1) Procesor (CPU)

Z měření jasně vyplynulo, že největší vliv na spotřebu serveru má počet a typ použitých procesorů. Pro výpočty budeme uvažovat výkon, protože právě ten nám říká, kolik elektrické energie se plně přeměnilo na energii tepelnou.

První porovnání bylo provedeno pro druhé a čtvrté měření dle tabulky 2. Byl použit nejdříve jeden a posléze dva stejné jedno-jádrové Opterony 246. Ostatní komponenty zůstaly během měření nezměněny. Rozdíl výkonů v nezatíženém (BIOS/OS) režimu byl 58 W, což můžeme se značnou jistotou považovat právě za výkon jednoho procesoru.

- Výkon CPU 2×58 W (116 W pro oba CPU).
- Výkon ostatních komponent: 34 W.

Při plném zatížení je pak rozdíl po přidání druhého CPU roven 82 W.

- Výkon CPU: 2×82 W (164 W pro oba CPU).
- Na ostatní komponenty tedy připadá: 16 W.

Druhý výpočet byl proveden obdobně, ale s dvou-jádrovými Opterony 268. Při prvním měření byl rozdíl mezi jednoprocesorovým a dvouprocesorovým provozem roven 54 W v BIOS/OS režimu, výsledek výpočtu byl tedy následující.

- Výkon CPU: 2×54 W (Pro oba CPU tedy 108 W).
- Ostatní komponenty: 65 W.

Dvou-jádrové procesory byly poté vytíženy naplno s následujícími výsledky.

- Výkon CPU: 2×97 W (196 W pro dva dvou-jádrové procesory).
- Ostatní komponenty: 40 W.

Výsledky měření byly pro přehlednost uvedeny v tabulce 3.

Tabulka 3: Spotřeby procesorů při různých kombinacích

		BIOS		Full Load	
Procesor		Opteron 246	Opteron 285	Opteron 246	Opteron 285
Celkový výkon s jedním CPU	[W]	92	119	98	139
Celkový výkon se dvěma CPU	[W]	150	173	180	236
Rozdíl výkonu	[W]	58	54	82	97
Odhadovaný výkon komponent	[W]	34	65	16	40
Odhadovaný výkon $2 \times$ CPU	[W]	116	108	164	196
Odhadovaný výkon $1 \times$ CPU	[W]	58	54	82	97
Výrobce udávaný TDP výkon	[W]	-	-	85	95

V tabulce byly také vypsány hodnoty TDP udávané přímo výrobcem procesorů. Tento údaj značí takzvanou Thermal Design Power, což je hodnota výkonu, kterého procesor dosahuje při plném zatížení standardními aplikacemi. Někteří výrobci udávají u svých procesorů také hodnotu TTP (Total Thermal Power).

Ta udává maximální možný výkon, kterého je možno s procesorem dosáhnout při použití speciálních syntetických testů. TDP a TTP jsou vztaženy k běhu procesorů v jejich firemních specifikacích, pokud jsou procesory taktovány zvýšením jejich základních frekvencí, jsou tyto maximální hodnoty vyšší.

Pro použité Opterony 246 a 285 udává výrobce (dle [1]) TDP výkony 85 W a 95 W. Naše měření se těmito hodnotám přiblížilo více než uspokojivě, proto lze námi zjištěné výkony považovat za správné a použitelné při dalších výpočtech datového centra. Pro sestavy s jinými CPU je vhodné řídit se informacemi výrobce ohledně TDP jejich procesorů. V segmentu serverových procesorů je preferován maximální výkon, proto právě serverové procesory dosahují nejvyšších tepelných výkonů. Kvůli ekonomičnosti a ekologičnosti provozu datacenter se výrobci v dnešní době snaží spotřeby serverových procesorů snížit. I přes to se stále energetické nároky serverových CPU pohybují v rozmezí 70-140 W.

2) Operační paměť (RAM)

Z výsledků je zřetelné, že paměti mají velmi nízkou spotřebu energie. Jedná se pouze o několik procent výkonu CPU, avšak z výsledků měření je možno tuto hodnotu určit poměrně přesně. Z testů 1-3, kde byly paměti RAM postupně přidávány, jde jednoduše určit, že s přidáním každého 1 GB modulu vzroste spotřeba elektrické energie o 2 W (Full Load režim).

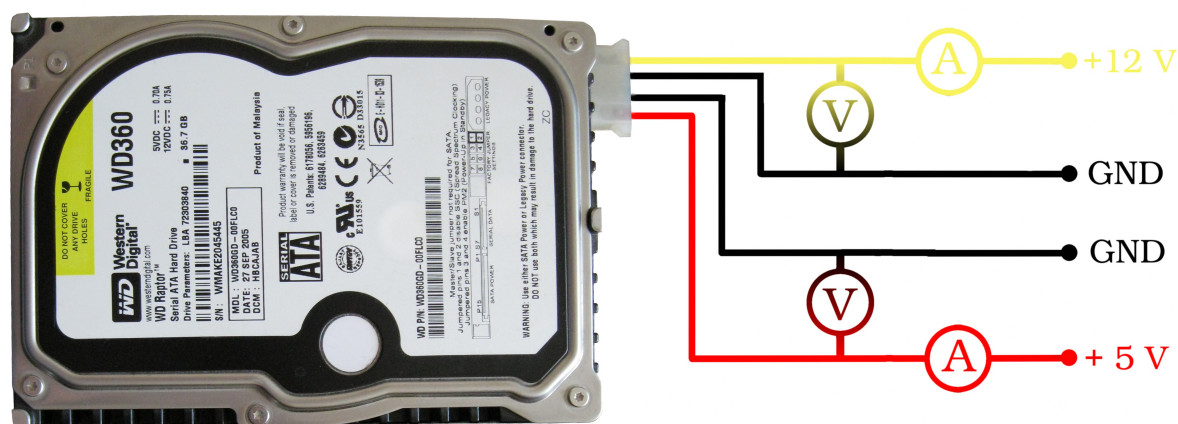
Výkon u použití dvou-jádrových procesorů je poněkud vyšší. Příčinou nejspíše bude fakt, že řadič paměti je u Socket 940 desek integrován přímo do procesoru, takže při použití jiného procesoru se také mění přístup k paměti, což může způsobit odchylku v měření s dvou-jádrovými procesory. V rámci řádů lze říct, že paměti spotřebovávají jednotky Wattů při plné zátěži.

3) Základová deska

Určení výkonu základové desky lze označit za achillovu patu celého měření. Deska jako taková sestává z velkého množství čipů (viz obr. 1), jejichž funkce (a tudíž i spotřeba) závisí na konkrétní činnosti, kterou vykonávají. Desku jako takovou není možné na spotřebu otestovat, protože bez procesoru nebo paměti nenastartuje do BIOSu, kde by bylo možno směrodatně výkon změřit. Pokud budeme opět hovořit v řádech, lze obecně říct, že základová deska spotřebovává desítky wattů, ne však více, než 50 W.

4) Pevný Disk (HDD)

Měření disku jeho odpojením nebylo možno provést při plném zatížení, jelikož by nebylo možno bootovat operační systém, ve kterém byly zátěžové testy prováděny. Proto byl disk pokusně odpojen při načtení BIOSu při zachování všech ostatních komponent, rozdíl se pohyboval kolem 7 W. Díky napájení disku přímo ze zdroje bylo ovšem možno provést přímé měření napětí a proudu na přívodních větvích. Schéma zapojení je patrné z následujícího obrázku 2.



Obrázek 2: Schéma zapojení pro měření výkonu disku

Měření bylo prováděno na disku Western Digital Raptor, který se běžně používá do serverových sestav. Disponuje sice malou kapacitou, zato díky rychlosti otáčení ploten $10\,000\text{ min}^{-1}$ dosahuje velmi dobré přístupové doby kolem $3,5\text{ ms}$. Obecně platí, že serverové disky (vysokootáčkové SATA, SCSI, SAS) mají vyšší spotřebu energie než běžné disky do osobních počítačů anebo notebooků.

Napětí a proud byly měřeny současně voltmetrem a ampérmetrem. Poprvé bylo měřeno při nečinnosti disku v BIOSu, poté při běhu operačního systému. Aby bylo dosaženo maximálního zatížení disku, byla kopírována data z jedné části disku na druhou, což simulovalo současné čtení i zápis. Naměřené výsledky jsou uvedeny v tabulce 4. Měření probíhalo na obou větvích, $+12\text{ V}$ a $+5\text{ V}$. Napětí je stejnosměrné, proto byl výkon na větvi spočítán jako součin napětí na této větvi a proudu jí protékajícím (viz (1)). Výsledný výkon disku byl roven součtu výkonů na obou větvích.

Tabulka 4: Měření spotřeby disku

	Napětí	Proud	Výkon	Celkový výkon
	[V]	[mA]	[W]	[W]
Bez zátěže	5,1	530	2,7	7,2
	12,2	370	4,5	
Maximální zátěž	5,1	720	3,6	8,8
	12,2	420	5,1	

Ten nakonec vyšel $7,2\text{ W}$ v klidu a $8,8\text{ W}$ při plném zatížení. Předchozí měření v BIOSu připojením a odpojením disku prokázalo taktéž 7 W rozdíl výkonů. Rozdíl $1,6\text{ W}$ mezi klidem a zátěží se dá považovat za výkon, který je používán na pohyb mechanických částí disku při čtení a zápisu a na provoz elektronických komponent disku např. vyrovnávací paměti. Proto můžeme u tohoto disku počítat průměrný výkon kolem 8 W .

Pokud je disk umístěn samostatně, ochlazuje se pasivně konvekci. Pokud ale do datového centra umístíme disky těsně vedle sebe, například do diskového pole nebo NAS úložiště, může lehce dojít k přehřátí disků a ke ztrátě nenahraditelných dat.

Proto je potřeba takováto úložiště chladit aktivně, nejlépe použitím ventilátorů. Je také třeba mít na paměti, že už jen dlouhodobě zvýšená teplota disku výrazně zkracuje jeho životnost.

5) Grafická karta

Na použité sestavě byla použita grafická karta integrovaná přímo na základové desce. Přídavná karta do PCI nebo PCI-E slotu nebyla použita. Serverová zařízení nejsou primárně určena k přímé práci uživatele, nepotřebují tedy výrazný grafický výkon. Pro servisní potřeby je plně dostačující nevýkonná integrovaná grafická karta se základní grafickou pamětí. Pokud by byla do testovací sestavy grafická karta přidána, její výkon by se dal opět lehce měřit pomocí rozdílu spotřeby systému s kartou a výkonu bez ní.

6) Zdroj

V měření celkové spotřeby sestavy je započítána i spotřeba zdroje. Ten při transformacích a usměrňování napětí nefunguje se 100% účinností, část energie se v něm přeměňuje na odpadní teplo. V serverech se používají kvalitní zdroje vyznačující se vysokou účinností a spolehlivostí. Často se používá redundantní zálohy, takže pro jeden server jsou k dispozici 2 zdroje pro případ, že by jeden z nich selhal. Účinnost kvalitních zdrojů se pohybuje v rozmezí 80-95 %.

Pokud by se měla určit účinnost zdroje měřením, bylo by nejrychlejší měřit příkon vstupující do zdroje a výkon z něj vystupující. Nejlépe při plném zatížení. Pro měření příkonu by se dalo použít wattmetru, vystupující výkon by se musel měřit viz začátek této kapitoly, čili na každé výstupní větvi zvlášť. Výsledek by ovšem byl velmi přesný a použitelný pro výpočty chlazení zdroje.

U námi testovaného zdroje udává výrobce účinnost 82-85 % [2]. Při maximálním zatížení (243 W) u dvou-jádrové, dvouprocesorové sestavy tak spotřeba samotného zdroje vyjde teoreticky na 22,5-27,5 W.

7) Síťové prvky

Ke každému datovému centru neodmyslitelně patří také propojení jednotlivých serverů, a to jak navzájem, tak s okolním světem. K tomuto účelu se používají nejrozumnější routery, případně switche. Tato zařízení ke svému provozu taktéž vyžadují napájení a veškerou spotřebovanou elektrickou energii přeměňují na teplo. Toto teplo je taktéž nutno přičíst k celkové tepelné zátěži datového centra.

Tyto síťové prvky jsou napojeny na síťové napětí a disponují svými vlastními zdroji pro transformaci a usměrňování napětí. Celková spotřeba takového prvku je pak součet ztráty zdroje a disipace elektrické energie v čípech tohoto zařízení. Vzhledem k rozmanitosti těchto zařízení se jejich reálná spotřeba různí typ od typu, lze ale vyslovit předpoklad, že se bude pohybovat v jednotkách a desítkách wattů.

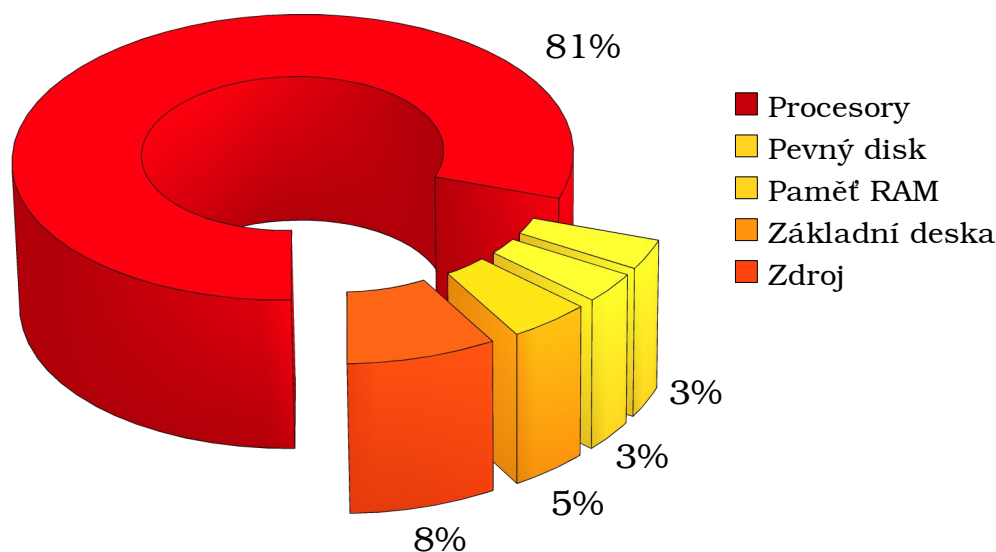
8) Záložní prvky (UPS)

Jedná se o zařízení schopná krátkodobě napájet servery při výpadku elektrické energie ze sítě. Jejich elektronika je schopna v řádu milisekund zaznamenat výpadek síťové elektřiny a zásobovat servery ze svých vlastních zdrojů. Ty jsou většinou tvořené bateriemi, které dokáží dodávat dostatečný proud pro napájení datového centra. Proudů a výkonů datacenter bývají ovšem značné, takže tato zařízení mohou suplovat síťové napětí jen několik málo minut.

Pokud dodávka elektrické energie ze sítě není přerušena, je spotřeba zařízení minimální. Běží pouze napájení elektroniky, která řídí celou záložní jednotku a kontroluje stav napájení ze sítě. Výkon se může pohybovat v řádech wattů. Při výpadku sítě a plném vytížení se účinnost jednotky pohybuje kolem 95 %, čili 5 % jejího výkonu se proměňuje na ztráty v podobě odpadního tepla. Příčinou je především vnitřní odpor baterií, kvůli němuž se zahřívají a mají tak účinnost menší než 100 %.

2.2 Vliv jednotlivých komponent na celkový výkon serveru

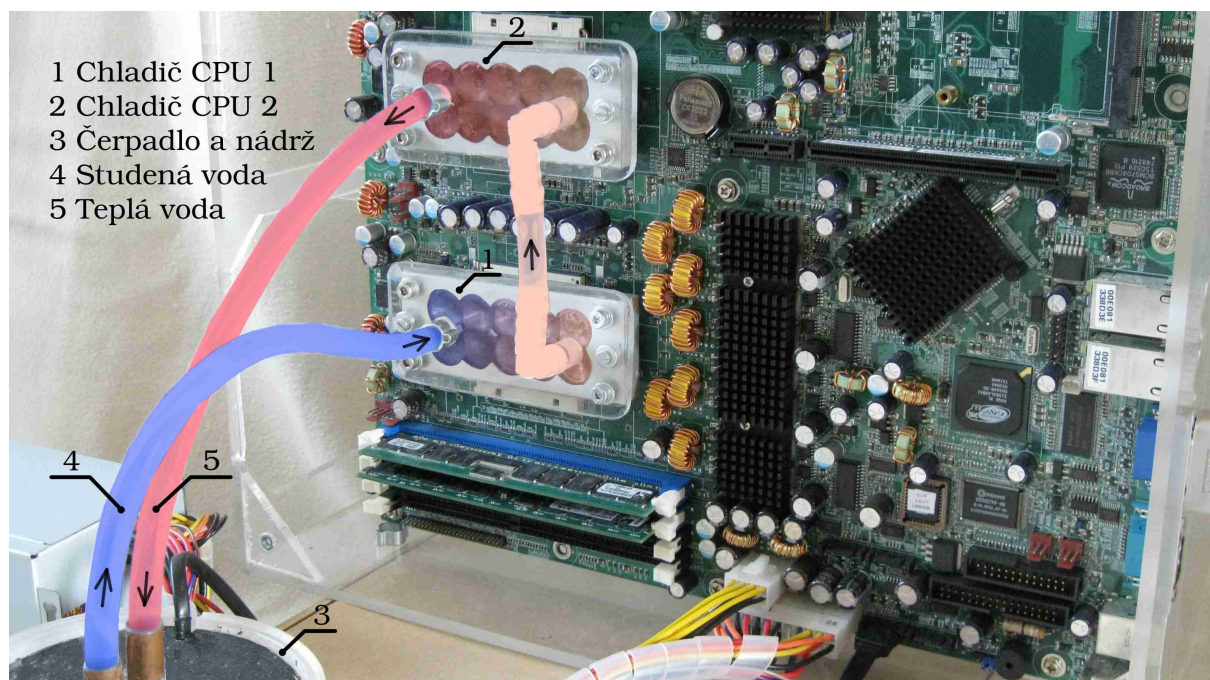
Z provedených měření na testovacím serveru lze výsledky graficky interpretovat do grafu na obrázku 3. Vyznačen je test při nejvyšší možné spotřebě, čili dva dvoujádrové procesory doplněné plnými 4 GB RAM, při plné zátěži. Celková spotřeba této sestavy je 243 W. Největší podíl na spotřebě mají procesory, které spotřebovávají 81 % (196 W) z celkového výkonu. Z ostatních komponent má nejvyšší spotřebu zdroj (8 %, 20 W), základní deska (5 %, 11 W) a nejmenší spotřebu vykazují paměti a pevný disk, které mají shodně 3 %, čili 8 W.



Obrázek 3: Výkony komponent (GT24, 2 × Opteron 268, 4GB, Raptor)

Správná volba procesorů použitých v datovém centru je tedy nejdůležitějším krokem pro hospodárný a ekonomický provoz. Test prokázal, že poměr spotřeby procesorů ku ostatním serverovým komponentám je přibližně 4:1. V testu se také ukázalo, že je mnohem výhodnější použití více-jádrových procesorů než více procesorů jedno-jádrových. Z měření 4 a 5 z tabulky 2 na straně 16 je patrné, že dvouprocesorový, jedno-jádrový server má spotřebu 180 W. Kdežto jednoprocessorový dvou-jádrový server disponuje při obdobném výpočetním výkonu spotřebou jen 139 W. Tento trend by zajisté potvrdily i testy s čtyř- a šesti-jádrovými procesory.

Vzhledem k provozním nákladům je proto jednoznačně lepší použít servery obsahující procesory s co nejvíce jádry a základové desky, které dovolí umístění co největšího počtu CPU na jednu desku. Pořizovací náklady na více-jádrové procesory jsou sice vysoké, ovšem je potřeba menší množství fyzických serverů a při dlouhodobém provozu se úspory značně projeví. U více-jádrových řešení jsou logicky také nižší náklady na chlazení datového centra.



Obrázek 4: Měření tepelného výkonu procesorů kalorimetricky

2.3 Kalorimetrické měření výkonu procesorů

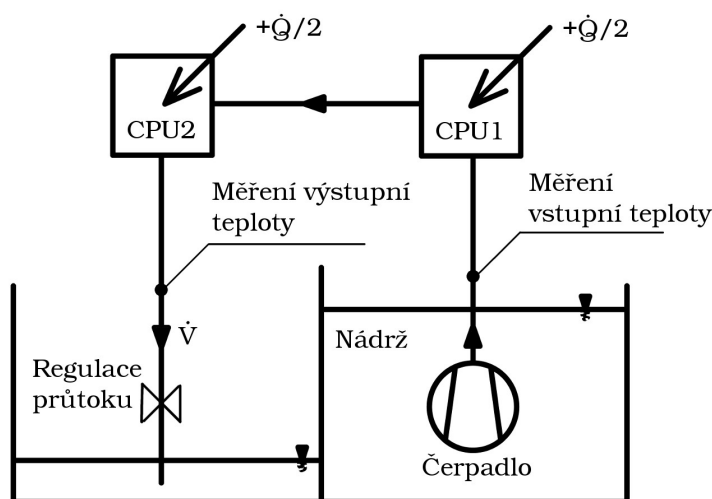
Při předchozích měřeních byla poměrně přesně určena spotřeba procesorů při různých konfiguracích a zatíženích testované sestavy. Všechny testy vycházely z výsledků měření spotřeby elektrické energie serverem. Pro ověření výsledků bylo provedeno dodatečné měření, založené na měření energie vyprodukované procesory. Toto měření vycházelo ze zákonů termomechaniky, především z kalorimetrické rovnice vyjádřené vztahem

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_v \cdot (t_2 - t_1) \quad (2)$$

kde se výsledný tepelný tok (výkon) rovná součinu hmotnostního průtoku vody, měrné tepelné kapacity vody a rozdílu teplot na výstupu a vstupu.

Speciální měřicí aparaturu pro tento experiment lze vidět na obrázku 4. Schéma je zobrazeno na obrázku 5. Měření jsou dva Opterony 246 spolu s 4 GB pamětí při plném výpočetním zatížení. Teplo vyprodukované procesory je pomocí hliníkových výměníků přiváděno do chladicí vody. Ta cirkuluje v uzavřeném okruhu pomocí ponorného čerpadla, které je umístěno v nádrži o objemu 2 l. Chladná voda je čerpadlem pumpována do výměníků, kde se ohřívá a vrací se zpět do nádrže. Chladicí voda protéká přes dva výměníky nasazené na obě CPU, přičemž přebírá teplo jimi vyprodukované a ohřívá se.

Proto je možno měřit rozdílné teploty na výstupu a vstupu do nádrže. Ta je rozdělena přepážkou, která odděluje vstupní a výstupní vodu. Pokud by se promíchávaly ve společné nádrži, došlo by k ohřevu vstupní vody a měření by bylo nepřesné. Měrná tepelná kapacita vody se dá považovat za konstantní; k určení výkonu procesorů je tedy nutno znát ještě průtok chladiva.



Obrázek 5: Schéma měření výkonu procesorů kalorimetricky

Při použití daného čerpadla byl průtok příliš vysoký a nedal se tak dostatečně přesně měřit rozdíl teplot na výstupu a vstupu z nádrže.

Proto byl průtok na výstupu přiškrčen, čímž došlo k jeho radikálnímu snížení. V tomto stavu byl průtok měřen za pomoci stopek a cejchované odměrné nádoby. Výsledky jsou uvedeny v následujícím výpočtu. Při tomto průtoku byl již teplotní spád mezi výstupem a vstupem v řádek jednotek stupňů Celsia. To umožnilo měření bez značné chyby měřicího přístroje a z naměřených hodnot byla přibližná hodnota tepelného výkonu procesorů dopočítána.

Teploty na vstupu a výstupu byly měřeny termočlánkem, který byl napojen na měřicí sběrnici OMB-DAQ-54. Ta byla připojena k osobnímu počítači přes USB rozhraní. Teplotní data byla zaznamenávána pomocí programu LabVIEW, který byl zapůjčen spolu se sběrnicí. Termočlánky byly umístěny přímo do proudící vody, byly ovšem zabaleny do tenké fólie, aby nebyly v přímém kontaktu s vodou. To by znatelně ovlivnilo měřené hodnoty. Byl měřen časový interval 200 s a teploty byly zapisovány s frekvencí 0,1 Hz, čili 1× za 10 sekund. Výsledkem tak bylo 20 hodnot pro každý termočlánek. Ty byly vyneseny do tabulky 5.

- Měření průtoku (dva různé objemy, dva měřené časy):

$$\begin{aligned} 1) \tau_1 &= 165 \text{ s} , V_1 = 100 \text{ ml} \rightarrow \dot{V}_1 = 0,006 \text{ ls}^{-1} \\ 2) \tau_2 &= 330 \text{ s} , V_2 = 200 \text{ ml} \rightarrow \dot{V}_2 = 0,006 \text{ ls}^{-1} \end{aligned} \quad \dot{V}_1 = \dot{V}_2$$

- Výpočet hmotnostního toku.

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho \quad (3)$$

$$\dot{m} = 0,006 \cdot 0,998 \rightarrow \dot{m} = 0,006 \text{ kgs}^{-1}$$

- Měření teploty (zaznamenáváno do PC).

Tabulka 5: Teploty na vstupu a výstupu měřící aparatury

Čas	τ	[s]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Teplota na vstupu	t_1	[°C]	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,3	21,2	21,2	21,2
Teplota na výstupu	t_2	[°C]	25,7	25,7	25,8	25,7	25,7	25,7	25,6	25,6	25,6	25,6
Rozdíl	t	[°C]	4,4	4,4	4,5	4,4	4,4	4,4	4,3	4,4	4,4	4,4

Čas	τ	[s]	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Teplota na vstupu	t_1	[°C]	21,3	21,3	21,3	21,2	21,3	21,3	21,2	21,3	21,3	21,3
Teplota na výstupu	t_2	[°C]	25,6	25,7	25,7	25,7	25,7	25,6	25,6	25,6	25,7	25,7
Rozdíl	t	[°C]	4,3	4,4	4,4	4,5	4,4	4,3	4,4	4,3	4,4	4,4

- Výpočet střední hodnoty rozdílu teplot.

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \quad (4)$$

$$\bar{t} = 4,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Směrodatná odchylka měření (nejistota typu A).

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (5)$$

$$u_a = 0,06 = 6 \%$$

- Výpočet produkovaného tepelného výkonu.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_v \cdot \bar{t} \quad (6)$$

$$\dot{Q} = 110,1 \text{ W}$$

Při měření výkonu v kapitole 2.1 pomocí přidávání a odebrání procesorů byl zjištěný výkon 164 W, viz tabulka 3. Tento výkon je blíže TDP výkonu, který udává výrobce. V případě měření výkonu procesorů kalorimetrickou metodu byl dopočítán výkon předávaný procesory chladicí vodě 110 W. Tento výsledek je o třetinu nižší (33 %). Měření se tak značně odchyluje od předchozího měření a od TDP udávaného výrobcem, nelze ho však považovat za chybné. Měření jako takové proběhlo správně, hodnoty průtoků i teplot byly určeny korektně a s tolerovatelnými chybami.

Důvodem nízké naměřené hodnoty výkonu je fakt, že není možné zaručit, aby 100 % tepla vyprodukovaného procesory přešlo přímo do vody. Tepelný výměník osazený na procesoru má dobrou účinnost, avšak i on sám předává teplo nejen do cirkulující vody, ale i do okolního vzduchu. Procesory jsou v celém okruhu nejteplejší tělesa a teplo z nich proudí nejen do výměníku, ale je také částečně převáděno do základové desky, z níž přestupuje do okolního vzduchu konvekci. Svůj podíl může mít i ztráta tepla do okolí v důsledku radiace.

Toto měření je tedy nutno považovat za orientační, ukazuje však odlišný přístup k měření tepelného výkonu elektronických součástek, než je ten, který byl použit v kapitole 2.1. Pokud by byla měřicí aparatura dobře izolována a tepelný výměník lépe zkonstruován, byl by procentuální podíl do vody převedeného tepla mnohem vyšší. V laboratorních podmínkách by se tedy dalo docílit přesných výsledků.

2. Kontejnerové datové centrum

2.1 Volba kontejneru a vnitřního uspořádání komponent

Prvním krokem pro instalaci datového centra do přepravního kontejneru je seznámení se se základními specifikacemi kontejneru samotného. V celosvětové přepravě se používá nepřeberné množství kontejnerů různých typů a velikostí, v závislosti na oblasti, zemi, anebo na konkrétním přepravci. Existují také ale unifikované kontejnery řady ISO, které se staly standardem po celém světě. Jejich rozměry a vlastnosti jsou pevně dané a neměnné, je proto možno přepravovat je lodí, železnicí nebo po silnici.

Tabulka 6: Rozměry přepravních kontejnerů základní řady

Normalizovaná řada	Vnější maximální rozměry			Vnitřní minimální rozměry		
	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]	Výška [mm]	Šířka [mm]	Délka [mm]
ISO 1 DD 10'	2591	2438	2991	2326	2338	2844
ISO 1 CC 20'	2591	2438	6058	2326	2330	5867
ISO 1 AA 40'	2591	2438	12192	2326	2330	11998

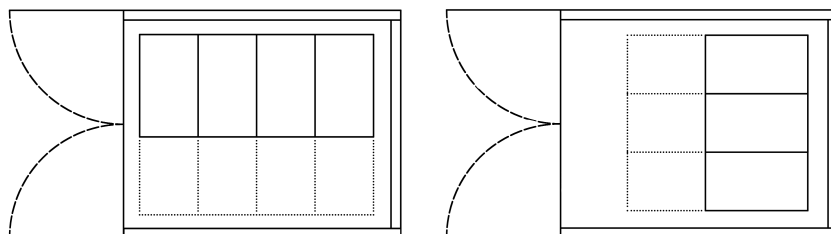
Pokud má být datové centrum umístěno do kontejneru, měl by to být právě normalizovaný ISO kontejner, u kterého budou zaručeny rozměry a dobrá přepravitelnost odkudkoliv kamkoliv. V mezinárodní přepravě se rozlišuje široká škála takovýchto kontejnerů, základní řadu však tvoří kontejnery uvedené v tabulce 8.

Vnější výška kontejnerů je ve všech případech 2591 mm. Vnější šířka je také shodná, všechny kontejnery v základní řadě mají 2438 mm. Důvody jsou zřejmé, kontejnery se skládají vedle sebe a na sebe (terminály, dopravní lodě) a proto musí být všechny stejných rozměrů. Podle potřeby je možné vybírat pouze z různých délek, které se pohybují od 10' do 40' (v základní řadě). Jak je vidět, délky jsou vzájemnými násobky, čili nejčastěji používaný kontejner AA je 2× delší než CC a 4× delší než DD.

Kontejner o délce 40 stop by byl pro umístění datového centra dostatečně prostorný, ovšem pro tuto práci bude vhodnější zvolit kontejner kratší, na kterém bude možno lépe demonstrovat využití co nejvyššího výkonu na co nejmenším prostoru. Nabízí se tak možnost použít nejmenší kontejner ze základní řady. Na obrázku 7 je znázorněno možné uložení rackových skříní do 10-ti stopového kontejneru.



Obrázek 6: Kontejner použitý pro navrhované datové centrum [3]

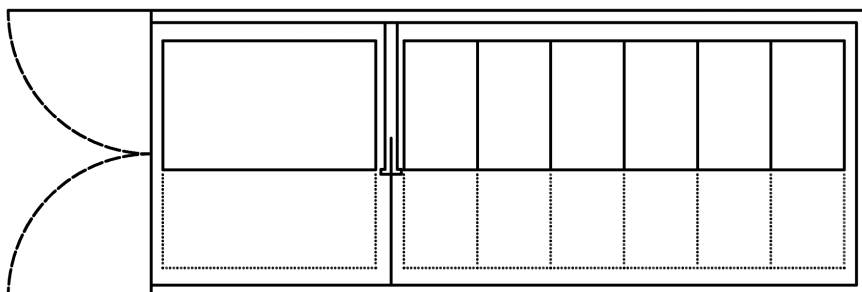


Obrázek 7: Umístění rackových skříní v 10' kontejneru

Náčrt vpravo ukazuje naprosto nevhodné umístění rackových skříní. Ty se na šířku vlezou do kontejneru pouze tři, navíc většinu místa zabere servisní prostor pro vysouvání a zasouvání komponent ze skříní (prostor vyznačen tečkovaně). Při takovémto rozmístění rackových skříní není možno do kontejneru umístit žádné další zařízení, jako kompresor chlazení anebo záložní zdroje energie.

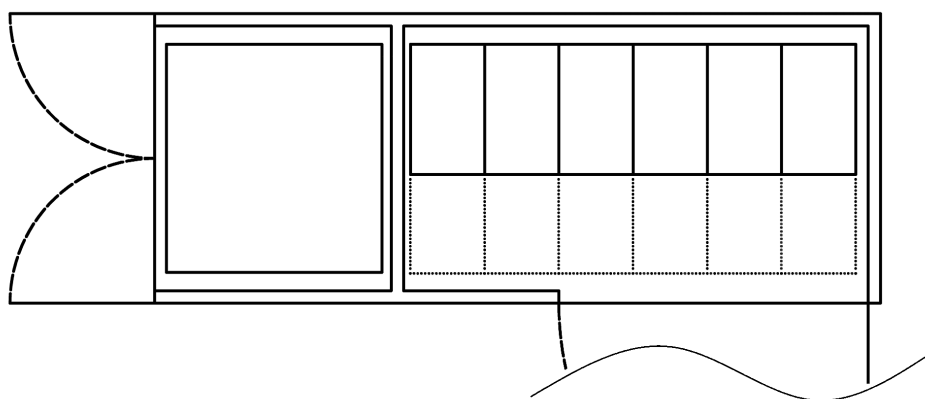
Náčrt vlevo je již přijatelnější, do malého prostoru se povedlo umístit 4 rackové skříně, místo před nimi musí však zůstat volné jakožto servisní prostor. Opět, na další zařízení, jako je především chlazení, místo nezbývá. Jedinou možností je vynechat jednu rackovou skříň a na její místo usadit chladicí a záložní zařízení. Takovéto datové centrum by zajisté našlo své místo v soukromém sektoru, a to především mezi malými a středními firmami. Nabídlo by přes 100U pozic a bylo by schopno (dle použitého kompresoru a typu chlazení) uchlazit až 10-20 kW.

Jako nejvhodnější volba se tedy jeví umístění datového centra do kontejneru o rozměrech 20'. Jeho vnitřní i vnější rozměry jsou vypsány v tabulce 8 a vyznačeny tučně. Obdélníkový půdorys vnitřního prostoru kontejneru by bylo vhodné rozdělit na plochu datové části a na plochu technologické části. Půdorys tak můžeme zpočátku rozdělit na 3 stejné plochy, z nichž 2 budou obsazeny racky a jedna poslouží pro technologickou místnost. Zaokrouhleně, datová část bude mít šířku 2,1 m a délku necelé 4 m. Technologická část pak zaujme zbytek, čili délku necelé dva metry při stejné šířce, jako datová část. Možnosti využití takto vzniklého prostoru je znázorněno na obrázku 8, 9 a 10.



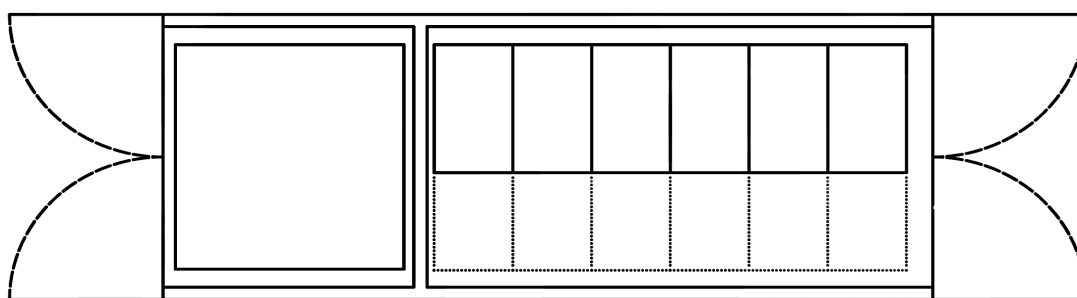
Obrázek 8: 1. návrh prostorového řešení kontejneru 20'

Na prvním schématickém návrhu je vlevo umístěna technologická část, vpravo datová. Ta sestává ze 6ti rackových skříní (zaokrouhlené rozměry jedné - v × š × h: 1,7 × 0,6 × 1,0 m). Skříně jsou poskládány těsně vedle sebe, za nimi je prostor pro cirkulaci teplého vzduchu a před nimi je ponechán servisní prostor. Datová část je od technologické oddělena přepážkou, která je vybavena zásuvnými dveřmi. V technologické části je možno umístit dostatečný počet zařízení (chladicí systém, rozvod elektrické energie, MaR systém, větrání, atd.). Omezením je, že v této části je nutno ponechat volné místo pro průchod do datové části.



Obrázek 9: 2. návrh prostorového řešení kontejneru 20'

Další návrh (obr. 9) vychází z úplného oddělení obou základních oblastí pevnou stěnou. Přístup k technologické části je zajištěn jako v prvním případě, čili dvoukřídlovými dveřmi. K datové části se přistupuje přes jednokřídlové dveře na boční části kontejneru. Tato úprava kontejneru je stále v rámci ISO specifikace. Výhodou tohoto řešení je lepší přístup k datové části. Nevýhodou je, že není možno skládat více takovýchto kontejnerů těsně vedle sebe.



Obrázek 10: 3. návrh prostorového řešení kontejneru 20'

Nedostatek druhého návrhu je vyřešen u návrhu posledního (obr. 10). Obě části datového centra zůstávají odděleny, přístup ke každé z nich je zajištěn dvoukřídlovými dveřmi na každé straně kontejneru. Rozšiřování datového centra je možné provést přidáváním kontejnerů vedle sebe. Jediná nevýhoda se skrývá v tom, že musí být zaručen přístup ke kontejneru z obou stran.

2.2 Tepelná izolace kontejneru

Stěny kontejneru jsou tvořeny ocelovým plechem o tloušťce v řádu milimetrů, který dobře vede teplo a je tedy velice špatným izolantem. Pokud by bylo DC umístěno do kontejneru, který by nebyl izolovaný, nastaly by v průběhu roku dvě extrémní situace.

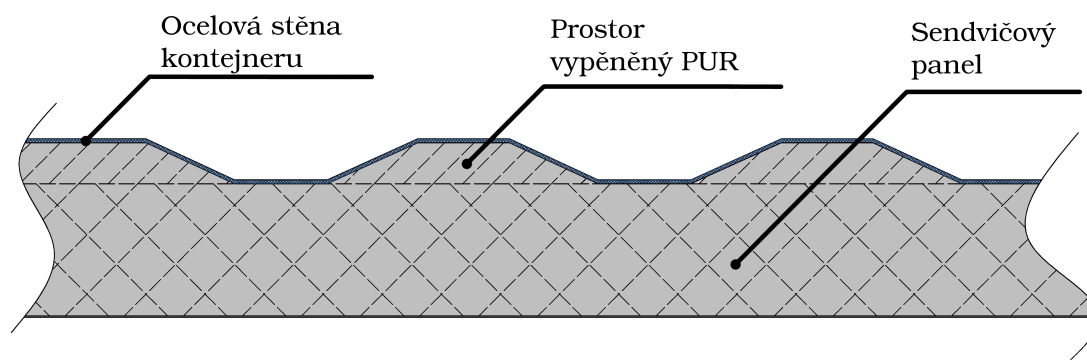
- V létě by kvůli vysoké vnější teplotě a vysokým solárním ziskům dosahovala teplota vnějšího povrchu až 60 °C (viz kapitola 4.4). Díky dobré tepelné vodivosti oceli by se tato teplota dala očekávat i na vnitřní stěně kontejneru. Rozdíl teplot mezi chlazeným prostorem a stěnou by tak byl až 40 °C. Konvekcí by se pak toto teplo předávalo ze stěny do rychle proudícího cirkulačního vzduchu a znamenalo by značnou tepelnou zátěž. Její přesná hodnota by se dala vypočítat nebo nasimulovat, odhadem by se ve špičkách jednalo o řády kilowatt, možné by byly i hodnoty nad 10 kW.
- V zimě by byl naopak tepelný efekt pozitivní, stěny kontejneru by byly velmi chladné a ochlazovaly by tak vnitřní vzduch. Při extrémních zimních teplotách až -20 °C by byl chladicí efekt značný a zařízení by mohlo pracovat s nižším výkonem. S nízkou teplotou je ovšem velmi úzce spojen další pojem, rosný bod.

K tomu dochází, pokud se teplota sníží na teplotu rosného bodu a vodní pára obsažená ve vzduchu dosáhne nasycení. Kondenzuje pak na chladných plochách ve formě vody, což je pro vnitřní prostor datacentra naprosto nepřijatelné. Pokud by ke kondenzaci docházelo v zimních měsících, vzniklá voda by pak mohla na některých místech uvnitř kontejneru dokonce zamrznat. Ke kondenzaci by docházelo i v letních měsících, pokud by byla vlhkost vzduchu vysoká a snížila by se teplota pod rosný bod (večery, rána), kondenzace vlhkosti by se opět projevila.

Kvůli výše uvedeným problémům je tedy nezbytně nutné provést zateplení stěn kontejneru materiálem s dobrými izolačními vlastnostmi. Jako první varianta se nabízí zateplení kontejneru zvenčí. Tento typ zateplení je běžný v oblasti civilních staveb, teplota vnitřních částí stěn je díky zateplení zvýšena a prostup tepla stěnou s izolací je několikanásobně menší. Pokud by bylo datové centrum zatepleno zvenčí, znamenalo by to zvětšení jeho vnějších rozměrů, které by už nebyly dle normy a kontejner by nevyhovoval specifikacím pro přepravu a pro stohovatelnost.

Z těchto důvodů je nutno datové centrum izolovat zevnitř. Sníží se tak vnitřní rozměry kontejneru a tím i využitelný prostor, ovšem z výše zmíněných důvodů je použití dostatečné izolace nevyhnutelné. Aby bylo zaručeno, že se prostory uvnitř kontejneru nebudou v zahřívát, nebo že bude při jejich ochlazení docházet ke kondenzaci, je zvolena izolace dostatečné tloušťky 100 mm na všech obvodových stěnách. Takto silná izolace je umístěna i na strop datového centra, aby izolovala především tepelné zisky dopadající na střechu kontejneru. Na dno kontejneru byla zvolena izolace o tloušťce 30 mm.

Byly použity sendvičové panely, které jsou tvořeny izolantem, na jehož povrchu je ocelový plech malé tloušťky. Ten zaručí dobré mechanické vlastnosti povrchu panelu a ochrání ho proti poškození. Panely jsou lepeny přímo na stěny kontejneru, viz. obrázek 11. Vzhledem k profilu boční stěny kontejneru lze panely přilepit pouze k vystouplým částem, mezi panelem a ponořenou částí profilu tak vzniká vzduchová mezera. Ta je velmi nebezpečná, jelikož teplota v ní bude jistě klesat i pod rosný bod a bude docházet ke kondenzaci vlhkosti. Tomu je nutno zabránit. Nejjednodušším způsobem je vyplnit prostor materiálem, aby nemohlo dojít k cirkulaci vlhkého vzduchu u chladných stěn a tím ke kondenzaci vodních par ve vzduchu obsažených.



Obrázek 11: Řez zaizolovanou stěnou kontejneru

Nejllepší by tedy bylo použít sendvičový panel z polyuretanu (PUR) a nalepit ho na vystupující části stěny. Prostory mezi stěnami a panelem by byly vyplněny taktéž polyuretanem, který by byl do nich nafoukán. Při foukání polyuretanové pěny se její objem zvětšuje, čím by byly všechny prostory těsně vyplněny. Polyuretan má výborné přilnavé schopnosti, díky kterým by se pevně přichytil ke stěně kontejneru. Po jeho vytvrzení by tak tvořil pevnou vrstvu s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi. Ty jsou uvedeny v tabulce 8 na straně 54.

Na dno kontejneru by bylo použito vícevrstvého sendvičového panelu, který by měl dostatečnou pevnost a zajišťoval by potřebnou nosnost. Na trhu je k dostání značný sortiment takovýchto panelů, vhodný by byl například panel sestávající z vrstev PVC, extrudovaného polystyrénu a vrchní dřevotřískové desky. Ten by měl být ke dnu kontejneru přilepen, aby nemohlo docházet ke kondenzaci vodní páry.

V datovém centru jsou umístěny prvky se značnou hmotností (rackové skříně, chladičové zařízení), které by mohly svojí hmotností panel poškodit. Tato zařízení jsou většinou umístěna na nastavitelných nohách, bylo by proto výhodné v místě noh odvrtnout do panelu díry, takže nohy samotné by přenášely zatížení přímo na ocelové dno kontejneru. Bylo by tak dosaženo i lepšího využití prostoru, jelikož takto umístěná zařízení by nebyla tak vysoká, jako zařízení postavená přímo na podlahový panel.

Zaizolovat je nutno i dveře kontejneru, nejlépe obdobným způsobem, jako stěny. Na dveře je tedy nalepen sendvičový panel tloušťky 100 mm a vzduchové prostory jsou opět zapěněny polyuretanovou pěnou. Panel je nutno vhodně zařezat, aby otevírání a zavírání dveří bylo bezproblémové a aby nemohlo dojít k nedovírání dveří.

2.3 Výběr rackových skříní

Skříně do datových center jsou vyráběny mnohými výrobci v různých myslitelných provedeních. I přesto jejich základní parametry odpovídají normě, která určuje vnitřní rozměry skříní pro uložení jednotlivých zařízení. Dle této normy mají zařízení do skříní vkládaná jednotnou šířku 19" (cca 480 mm). V praxi je také možno potkat zařízení o šířce 23" (cca 585 mm). Délka zařízení není nijak pevně stanovena, pohybuje se od 500 mm do 1200 mm. Vzhledem k použitým zařízením je nutno vybrat správný typ skříně, aby měla dostatečnou hloubku pro uložení dlouhých zařízení.

Výška jednotlivých zařízení je taky pevně dána [6] a udává se v násobcích základní jednotky U. Ta má rozměr 1,75", čili 44,45 mm. Serverové racky mívají nejmenší výšku 1U, větší servery jsou ve velikosti 2U, diskové pole a záložní systémy mají velikosti přes 3U nebo 4U, blade-server systémy jsou uloženy v blocích o velikosti přes 10U. Stejně tak je normou dáno i umístění a uchycení jednotlivých zařízení v rackové skříní.

Nejpoužívanější výška rackových skříní je 42U, která odpovídá přibližně nejmenší mu možnému rozměru 1850 mm. Pokud je připočten rám a stavitelné nohy skříně, dosahuje skříň výšky přes 2 m. Šířky skříní se různí dle výrobce a typu, různé skříně nabízejí různé možnosti (např. pro cable-management) a tím pádem mají různé šířky. Nejčastěji se v praxi vyskytuje šířka 600 mm, můžou se ale použít i skříně o šířce 600-1200 mm, v závislosti na individuálních potřebách datového centra.

Pro datové centrum navrhované v této práci budou dostačující skříně o šířce 600 mm a hloubce 1000 mm. Optimální výška by byla plných 42U, ale vzhledem k tomu, že prostor mezi podlahou a stropem má po zaizolování výšku 2220 mm, nebude možno takto vysokou skříň použít. Důvodem je chladičové zařízení, které je umístěno mezi stropem a rackovými skříněmi. To má výšku přibližně 300 mm a tudíž by se nad skříň neveslo.



Obrázek 12: Racková skříň HP 10642 G2 [8]

Proto je volen další nejbližší rozměr rackové skříně, 36U. Konkrétním požadovaným rozměrům vyhovuje racková skříň firmy HP, typ 10642 G2 [7]. Skříň dále vyhovuje i po stránce provedení; její čelní dveřová část je vyrobena z děrovaného plechu, který umožní dobrý přístup vzduchu do skříně, viz fotografie 12. Velké množství skříní je vyrobeno v provedení s prosklenou čelní částí, které je pro navrhované kontejnerové datové centrum naprosto nevhodné. Chladný vzduch je třeba čelní části nasávat a přivádět přímo k chlazeným komponentám, což není u prosklené skříně možné.

Vybraná skříň má tedy rozměry $1735 \times 1015 \times 597$ mm. Výška je v pořádku a zaručuje dostatek prostoru pro tepelné výměníky. Šířka je také optimální, ponechává mezi skříněmi 3 mm mezeru, což je dostatečná rezerva pro dobrou instalaci skříně do datového centra. Hloubka skříně by měla být dostačující jak pro většinu instalovaných komponent, tak pro bezproblémové umístění kabeláže do její zadní části.

Do datového centra se tedy při rozměrech skříně 600 mm a při plánovaném rozměru datové části 4 m vejde celkem 6 kusů. Pokud by bylo ubráno na rozměrech technologické části a byla by zvětšena datová část, mohlo by datové centrum obsahovat 7, maximálně 8 takovýchto rackových skříní. Zůstává se ale u původního konceptu datové oblasti 4 m a tudíž se počítá se 6ti skříněmi. Při tomto počtu je tedy celková kapacita datového centra 216U.

Při volbě skříně byl také vzat v úvahu požadavek na uzamykatelnost, tzn. aby každá skříň mohla být uzavřena a uzamčena, především z bezpečnostních důvodů. Do plánovaného datového centra by ovšem bylo nejlepší použít skříně sestávající pouze z rámu. Jednak by se snížila hmotnost skříně, zjednodušila by se její montáž a i cena by byla znatelně nižší. Hlavní předností by ale bylo, že chladný vzduch z výměníku by mohl být výstřiky směřován přímo na jednotlivé racky. Tím by došlo k výraznému zvýšení efektivity chlazení. Navíc by mohly být největší proudy vzduchu nastaveny na nejvíce výkonné části rackových skříní, viz CFD simulace, kapitola 3.

2.4 Návrh chladicího zařízení

Chlazení datového centra je hlavním cílem této práce. V první kapitole jsou určeny přibližné tepelné výkony používaných komponent, především pak komponent nacházejících se v serveru samotném. Třetí kapitola se zaměřuje na proudění studeného a teplého vzduchu uvnitř kontejneru, poslední kapitola popisuje vliv okolní teploty a solární zátěže na teplotu uvnitř datového centra. Tato kapitola má za úkol navrhnout systém, který udrží vnitřní teplotu na stále hodnotě tím, že bude odvádět veškeré vyprodukované odpadní teplo mimo kontejner.

První návrh vyniká především svojí jednoduchostí a minimálními počátečními a provozními náklady. Jeho podstata spočívá v chlazení datového centra jen pomocí nuceného větrání. Do technologické místnosti by se tak umístily rozměrné ventilátory, které by neustále do místnosti vháněly čerstvý vzduch a odváděly by vzduch ohřátý. Toto řešení ale naráží na překážky vypsane dále.

- Množství větracího vzduchu by muselo být enormní. Pokud by byl uvažován tepelný výkon všech komponent 35 kW a rozdíl teploty vzduchu na vstupu a výstupu 1 °C, dosahovala by výměna vzduchu v místnosti přes 5000 h⁻¹. Vychází to z objemu datové části 20 m³ a nutného minimálního objemového průtoku 30 m³s⁻¹. Obrazně řečeno, datové centrum by muselo být „profukováno“ vzduchem o rychlosti až 10 ms⁻¹.
- Dalším problémem je teplota venkovního vzduchu, která by v letních dnech byla vyšší než požadovaná vnitřní teplota, nebylo by tedy možné ji pouhým větráním dosáhnout. Vzhledem k fluktuaci teploty během roku by musel být celý systém vybaven přesným měřicím zařízením, které by regulovalo průtok vzduchu tak, aby byla teplota udržena na stálých 20 °C.
- Naprosto zásadním problémem ale je, že větrací vzduch sebou přináší i vlhkost a nečistoty. Vlhkost by se nedala nikterak ovlivnit, čili vnitřní vlhkost by byla stejná jako venkovní, což je nepřijatelné. Při výše uvedeném průtoku vzduchu by se do datového centra také dostávala značná množství nečistot obsažených ve vzduchu. Ty by zanášely jednotlivé tepelné výměníky a snižovaly by tak jejich účinnost.

Kvůli těmto zásadním důvodům je tento typ chlazení pro datové centrum zcela nevhodný. V krajním případě by se dal tento systém použít jako havarijní; při výpadku primárního chladicího systému by se nuceného větrání využilo k odvodu přebytečného tepla do doby, než by byly všechny komponenty v datovém centru bezpečně odstaveny.

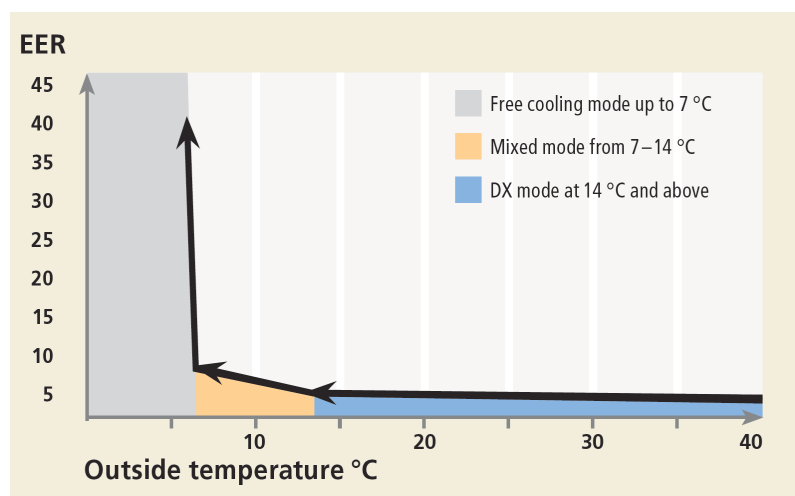
Další návrh počítá s použitím chladicího zařízení, které by odebíralo odpadní teplo pomocí kompresorové jednotky a odvádělo by ho do okolního prostředí. Teplo by bylo z cirkulačního vzduchu odebíráno výměníky, kompresorové chladicí zařízení by zajistilo vyšší teplotní spád a do okolního prostředí by bylo teplo převáděno pomocí vnějších tepelných výměníků.

- Výhoda tohoto systému by byla v oddělení vnitřního a venkovního vzduchu. Vlhkost by se tak dala regulovat a zamezilo by se pronikání škodlivin do prostoru datového centra.
- Nevýhodou by ovšem bylo, že chladicí zařízení by muselo být v provozu neustále, čili jak v zimních, tak letních měsících. Pokud by byl koeficient EER (Energy Efficiency Ratio) daného chladicího zařízení v rozmezí 3-5, znamenalo by to, že k výkonu datového centra by bylo nutno připočíst 20-33 % navíc, jako příkon potřebný na provoz zařízení. U datového centra o výkonu 30 kW by se tak jednalo o 6-10 kW potřebných na samotné chlazení.

Jelikož se výkon kompresoru dá regulovat jen těžko (vypínáním a zapínáním zařízení, frekvenčním měničem), bylo by k udržení konstantní teploty zapotřebí složitějšího řídicího systému.

Pro zařízení, která je nutno chladit v průběhu celého roku se proto nejčastěji používá systém takzvaného volného chlazení (freecooling) [9]. Ten funguje obdobně jako výše popsany systém, ovšem používá chladicího zařízení v závislosti na venkovní teplotě. Základním předpokladem tedy je, že pokud je venkovní teplota dostatečně nízká, může být veškeré odpadní teplo převedeno teplotonosným médiem přímo do okolí, čili bez použití chladicího zařízení. V průběhu roku funguje tedy volné chlazení ve třech režimech:

- 1) Mechanické chlazení: Pokud jsou venkovní teploty nad 15 °C, funguje systém stejně jako v předchozím případě; základ tvoří kompresor, odpadní teplo je odebíráno výparníkem a předáváno do okolí kondenzátorem.
- 2) Smíšené chlazení: Funguje při teplotách 5-15 °C, kdy část odpadního tepla je pomocí výměníku vzduch/voda odváděna přímo do okolního vzduchu a kompresor se zapíná jen pro potřeby dochlazování.
- 3) Volné chlazení: Pokud je venkovní teplota dostatečně nízká, je veškeré odpadní teplo z datového centra odváděno do okolního vzduchu jen pomocí výměníků vzduch/voda. Kompresor je tudíž vypnutý a energie potřebná na chlazení jako takové je rovna nule. Energii spotřebovávají pouze oběhová čerpadla a ventilátory.



Obrázek 13: Závislost koeficientu EER na venkovní teplotě při volném chlazení [9]

Na obrázku 13 je možno vidět graf závislosti koeficientu EER na venkovní teplotě. Při teplotách nad 15 °C se používá kompresoru chladicího zařízení a koeficient EER se pohybuje v rozmezí 3-5. V režimu smíšeného chlazení koeficient roste až na hodnotu 10 a při venkovní teplotě nižší než 5 °C nabývá vysokých hodnot, jelikož kompresor se zapíná jen zřídka, nebo vůbec.

Právě systém volného chlazení by měl být použit i pro kontejnerové datové centrum. Možnost ponechat v chladných dnech kompresor chladicího zařízení vypnutý přináší razantní úsporu energie. Jedná se o speciální způsob chlazení.

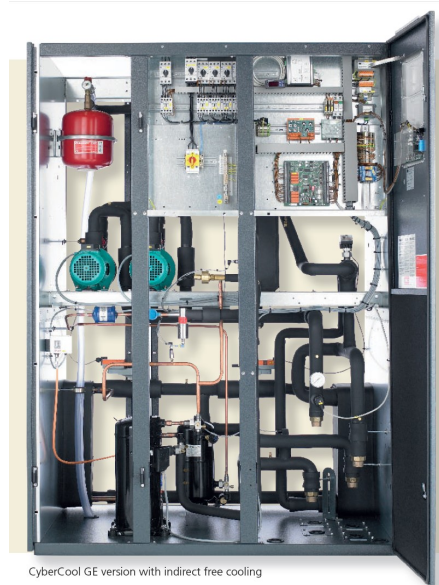
Ten může být použit především u zařízení, které produkují teplo celoročně, je počet výrobců omezen. Pro navrhované datové centrum byla vybrána chladicí jednotka firmy STULZ.

Z jejich nabídky (obr. 15) se jedná konkrétně o model CSI401GE. Ten disponuje nejvyšším chladicím výkonem 41,8 kW, má kompaktní rozměry a systém ovládající volné chlazení je plně automatický. Jak je z nabídky vidět, k dispozici jsou jednotky pro chlazení až do výkonu 100 kW.

CyberCool indoor data chiller			GE					A/G				
CSxxxxGE/A/G			201	401	601	801	1,001	201	401	601	801	1,001
Cooling capacity ¹⁾	kW		24.0	41.8	61.2	77.3	98.6	20.8	48.5	65.0	80.0	100.0
Refrigerant circuit												
Type of compressor			Scroll									
Refrigerant R407C ²⁾	kg		6.0	10.7	12.5	12.5	12.6	2.3	3.5	6.8	7.0	9.0
Chilled water circuit												
Water flow	m ³ /h		3.4	5.9	8.7	11.0	14.0	3.0	6.9	9.2	11.4	14.2
No. of pumps			1									
Available pump pressure	kPa		150	214	149	185	167	210	210	200	200	220
Unit data												
Power input DX mode	kW		7.2	12.0	18.6	22.2	26.7	5.8	13.3	17.3	22.0	26.4
Power input FC mode	kW		0.7	1.4	1.5	2.0	2.4	-	-	-	-	-
Dimensions (WxHxD)	mm		1,400 x 1,980 x 890					1,000 x 1,980 x 890				
Weight ³⁾	kg		454	513	627	702	745	295/310	365/380	465/490	480/505	570/595

Tabulka 7: Katalog chladicích zařízení pro volné chlazení firmy STULZ

Díky svým rozměrům 1400 × 1980 × 890 mm je zařízení velmi kompaktní a je tedy více než vhodné pro umístění do technologické místnosti kontejnerového datového centra. Z tabulky 7 lze také vyčíst, že je v zařízení použit scrollový kompresor a chladivo R407C. Nejdůležitějšími údaji jsou však Power input DX mode a Power input FC mode. První z nich udává spotřebu energie na chlazení v režimu mechanického chlazení (12 kW) a druhý v režimu volného chlazení (1,4 kW). Vnitřní uspořádání jednotky lze vidět na obrázku 14.



Obrázek 14: Jednotka volného chlazení CSI418GE firmy STULZ [10]

O rozvod chladu v datové místnosti se starají tepelné výměníky. Ty jsou umístěny v prostoru nad rackovými skříněmi po celé jejich délce. Sortiment nabízí jednotky nástěnné, parapetní nebo kazetové, pro použití do projektovaného datového centra jsou však nejvýhodnější jednotky kanálové. Ty jsou určeny k zabudování např. do podhledů, mají tedy malou výšku a není u nich důležitá estetika, proto nejsou opatřeny plastovými obaly atd.. Jednotky sestávají většinou z cirkulačních ventilátorů, výměníku (většinou výparníku), plechového obalu a záchytné vany na případný kondenzát. Pro přibližný výpočet jsou vybrány jednotky typu SDV firmy Sinclair.

Cílem je vybrat jednotky s co nejvyšším chladicím výkonem za předpokladu, že se musí umístit vedle sebe a jejich celkový délkový rozměr nesmí překročit 4 m. V nabídce [11] jsou jednotky o délkových rozměrech 955 mm, 1000 mm a 1350 mm. Aby bylo dosaženo maximálního výkonu, byly vybrány dvě jednotky délky 1350 mm (SDV-140DA) a jedna jednotka 1000 mm (SDV-140DA). Delší jednotky disponují maximálním chladicím výkonem 14 kW, kratší 8 kW. Z toho plyne, že maximální uchlazitelný výkon datového prostoru je 36 kW.



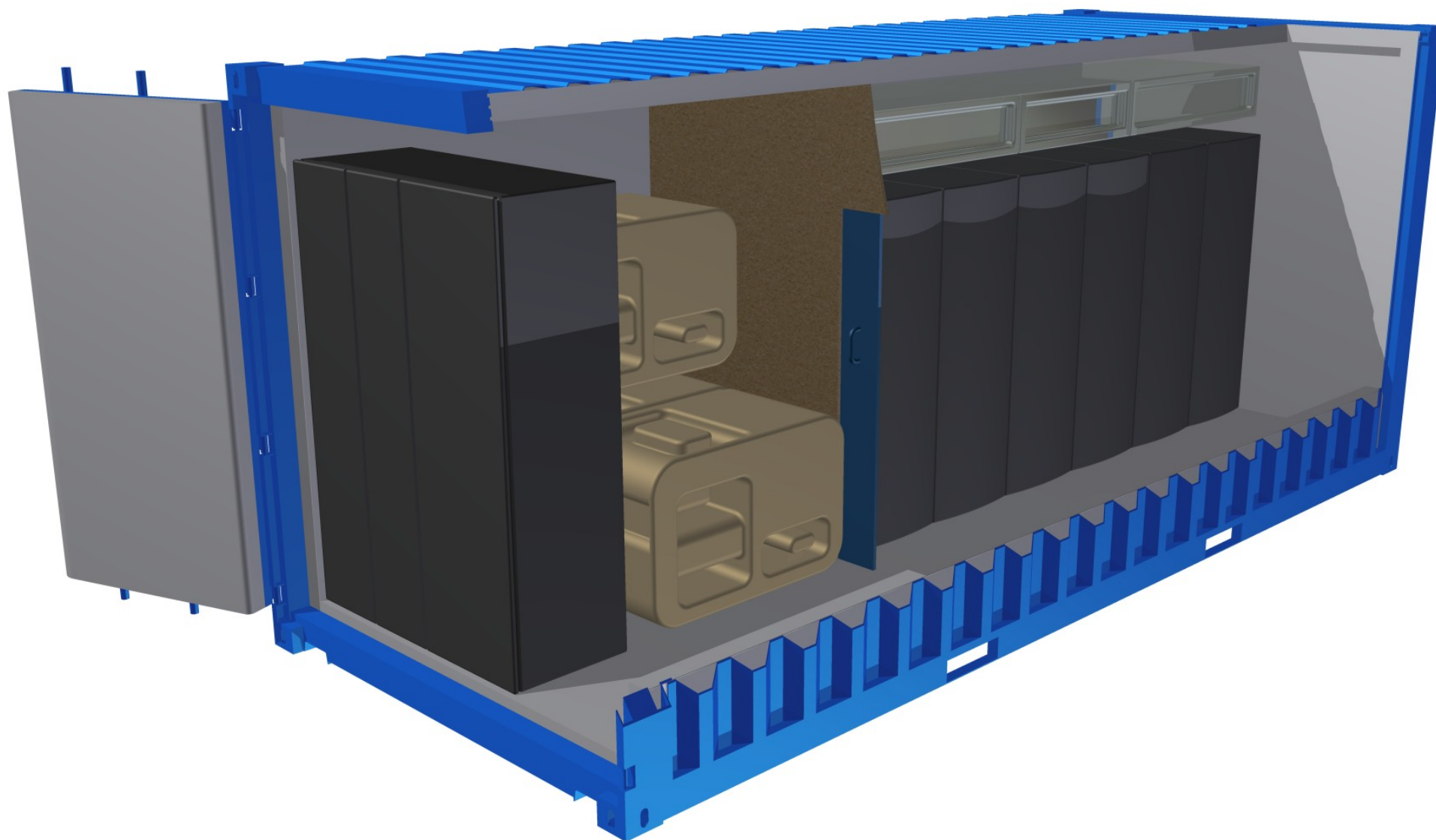
Obrázek 15: Kanálová jednotka

Kanálové jednotky jsou ale určeny především pro klimatizační provoz v obydlených budovách, jsou proto konstruovány na nízké úrovni hluku a na menší objemové průtoky. V datovém centru není nutno tyto limity dodržovat, proto by po dohodě s výrobcem bylo možno tyto jednotky upravit pro vyšší průtoky vzduchu a získat tak ještě vyšší chladicí výkony.

Je velmi výhodné umístit do oblasti před kanálovými jednotkami výustky, kterými by bylo možno směřovat proud vzduchu přímo na nejvíce výkonné části rackových skříní, viz kapitola 3. Takovéto výustky nejsou v nabídkách výrobců, bylo by proto nutno vyrobit je na zakázku.

2.5 Návrh prostorového uspořádání zařízení

Pro dobrou představu o rozmístění jednotlivých zařízení v rámci datového centra byl vytvořen názorný 3D model. Bylo použito programu Autodesk Inventor 2011. Základ tvoří model přepravního kontejneru [3], který je uvnitř obalen izolací dle kapitoly 2.2. Díky dobře zvoleným zařízením bylo možno použít rozložení dle obrázku 8 z kapitoly 2.1. Jedná se tedy o variantu s jedněmi vstupními dveřmi a průchozí technologickou částí.



Obrázek 16: Prostorové rozložení jednotlivých komponent

Obě části jsou od sebe odděleny přepážkou, která by měla být co nejtenčí, aby zabírala co nejméně prostoru. Doporučeným materiálem je dřevotřísková deska, nebo tenký sendvičový panel. V přepážce je vyřezán prostup spojující obě části datového centra, který je vybaven dveřmi. Pro co největší úsporu místa jsou tyto voleny jako zásuvné. V konkrétním návrhu jsou rackové skříně o několik centimetrů kratší, než výměníky nad nimi, proto je možné do takto vzniklého prostoru dveře zasouvat. Je požadována co nejlepší izolace mezi oběma prostory, proto by měly být dveře dobře utěsněné a při provozu datového centra vždy zavřené.

Do kontejneru se vchází pravou polovinou vstupních dveří. Za levou polovinou se nachází chladicí zařízení firmy STULZ. Po otevření levé poloviny vstupních dveří je tak zaručen plný přístup k tomuto zařízení. Prostor mezi chladicím zařízením a přepážkou je určen záložním diesel-agregátům, viz kapitola 2.7. Volný prostor nad třetím agregátem může být použit k libovolným účelům. Může zde být uložena například jednotka bateriových záložních zdrojů UPS.

Zařízení MaR a elektrické rozvody je možno umístit na dělicí přepážku do horní části. K úplnému využití prostoru v technologické místnosti dojde při umístění větrací jednotky do horního prostoru přímo nad vstupními dveřmi. Pokud by bylo místo v technologické místnosti nedostačující, bylo by nutno obsadit i prostor průchozí uličky a zvolit variantu z obrázku 9 nebo 10.

2.6 Návrh větracího zařízení

Kontejner je navržen tak, aby míra infiltrace venkovního vzduchu byla co možná nejmenší. S venkovním vzduchem by totiž mohla do kontejneru pronikat i nežádoucí vlhkost a škodliviny. Datové centrum je ale i přesto nutno větrat, výměna cirkulačního vzduchu za čerstvý je totiž nutná v každém uzavřeném prostoru. Elektronické součástky jsou pod určitým elektrickým napětím, které způsobuje ionizaci okolního vzduchu. Silně ionizovaný vzduch je považován za škodlivinu a je proto nutno ho odvádět ven z datového centra a přivádět vzduch čerstvý.

Přesné množství iontů obsažených ve vzduchu lze předem spočítat jen stěží, předpokládá se proto, že bude dostačující vyměnit celý objem místnosti několikrát za den. Výměna vzduchu je zabezpečena řídicím systémem a je prováděna nuceně radiálním nebo axiálním ventilátorem. Jelikož datové centrum neobsahuje odvlhčovací zařízení a chladiče pracují nad rosným bodem, je potřeba zabezpečit, aby nebyl nasáván vzduch o příliš vysoké vlhkosti. Větrání by se tudíž nespouštělo, pokud by byla vlhkost vnějšího vzduchu vyšší než 70 %.

Systém řídicí větrání by měl tedy sestávat z vlhkoměru, řídicího obvodu a ventilátoru. Před ventilátor je nutno umístit filtr pevných částic, aby nedošlo k nasávání škodlivin z okolí. Taktéž by na vstupu měly být umístěny elektromechanicky řízené žaluzie, které by dokázaly oddělit technologickou místnost od venkovního prostředí a zamezit tak nechtěné infiltraci.

Druhé větrací zařízení by mělo být umístěno mezi datovou a technologickou oblastí. Jeho účelem by bylo chlazení technologické místnosti nasáváním chladného vzduchu z datové místnosti. Řízení by mělo měřit teplotu v technologické místnosti a při jejím zvýšení přivést chladný vzduch z datové oblasti.

2.7 Návrh chlazení záložních zdrojů elektrické energie

Pokud by se datové centrum ocitlo bez dodávky elektrické energie ze sítě, je nutno tento výpadek ihned kompenzovat dodávkou energie z jiných zdrojů. K tomu jsou určeny zařízení UPS (Uninterruptible Power Supply). Ty se skládají ze tří částí. První část má za úkol sledovat dodávku energie ze sítě a v případě jejího výpadku zareagovat v řádech milisekund a přepnout na záložní zdroj. Tím bývají baterie umístěné v UPS zařízení, které získávají elektrickou energii z chemické reakce. Třetí část má za úkol převést bateriové napětí na napětí síťové.

Bateriové UPS se vyrábí v různých výkonech, od stovek wattů až po jednotky kilowattů. Jsou navrženy tak, aby udržely napětí v síti po dobu několika minut, během kterých může být vše bezpečně uloženo a vypnuto, nebo může dojít k nahození jiného záložního zdroje. Pro potřeby navrhovaného datového centra musí být k dispozici 36 kW výkonu na provoz výpočetních zařízení, plus 12 kW na pokrytí plného výkonu chladicího zařízení. Ostatní zařízení (osvětlení, ventilátory) se při výpadku energie odstavují. Celkem je tedy potřeba přes 45 kW výkonu UPS zařízení.

Pokud by tedy byly použity nejvýkonnější krabicové nebo rackové záložní zdroje UPS od firmy APC (Smart-UPS 3000VA) [12], bylo by jich zapotřebí celkem 17 kusů. Každý z nich dodává maximální výkon 2,7 kW a to po dobu nejdéle 3 minut. Během této doby musí být obnovena dodávka. V kapitole 1.1 je uvedeno, že zařízení UPS během svého provozu produkují teplo, které vzniká při zahřívání se baterií průtokem proudu. Při účinnosti 95 % by to v tomto případě znamenalo, že UPS zařízení budou produkovat 2,25 kW odpadního tepla. Za normálních okolností by bylo nutné i toto teplo odvádět, při výdrži baterií v řádu minut však lze vyprodukované teplo zanedbat, došlo by pouze k tolerovatelnému zvýšení teploty v technologické místnosti.

Bateriové jednotky jsou schopny dodávat energii pouze několik minut, proto je potřeba do datového centra umístit ještě dlouhodobý záložní zdroj elektrické energie. Tím jsou dieselové elektrocentrály, které jsou osazené dieselovým motorem, který roztáčí alternátor a vyrábí tak elektrickou energii neomezeně dlouho. Pro potřeby navrhovaného datového centra je potřebný záložní výkon 45 kW. Pro inspiraci může posloužit nabídka diesel-agregátů firmy Kipor.

Původní plán počítal s jedním agregátem o výkonu 50 kW, ovšem takový nebylo možno kvůli jeho délce přesahující 2 m umístit do technologické části. Proto se zvolilo řešení použít dvě elektrocentrály o výkonu 2×25 kW, ovšem pokud by byly takovéto dva agregáty umístěny na sebe, opět by se do technologické části nevešly. Konečným řešením bylo použití tří elektrocentrál o výkonu 3×15 kW.

Dieselový motor ovšem produkuje jak spaliny, tak teplo, s čímž se musí v uzavřeném prostoru technologické místnosti počítat. Co se týče spalin, nejjednodušší způsob je prodloužit výfukové potrubí všech agregátů a vyvést ho mimo datové centrum. Přívod spalovacího vzduchu a odvod tepla produkovaného motory je zajištěn ventilací popsanou v kapitole 1.8. Při naběhnutí diesel-agregátů se automaticky (za jakýchkoliv venkovních podmínek) spouští ventilátor nuceného větrání, který přivádí do technologické místnosti dostatek vzduchu jak pro spalování, tak pro chlazení dieselových motorů.

2.8 Možnosti dalšího využití odpadního tepla

Celkové teplo vyprodukované navrhovaným datovým centrem se skládá ze základní části 36 kW, která je stabilně během celého roku produkována elektronickými zařízeními. K tomuto teplu je nutno přičíst příkon chladicího zařízení, který se pohybuje v rozmezí 1,4-12 kW. Na osvětlení a větrání je nutno započítat příkonu 1 kW. Datové centrum tak v průběhu roku stabilně generuje 38,4-49 kW tepelného výkonu. Nejedná se o výkon zanedbatelný, pokryl by totiž tepelné ztráty 5ti nízkoenergetických rodinných domů. S vyprodukovaným teplem může být naloženo několika způsoby.

Prvním je použití venkovních tepelných výměníků, které všechno vzniklé teplo převádějí do okolního vzduchu. Tyto výměníky je možno umístit kdekoli do blízkosti datového centra, jako nejlepší možnost se nabízí jejich umístění na střechu kontejneru. Jedná se o nejpoužívanější a investičně nejméně náročný způsob, ovšem po stránce ekonomiky a ekologie o nejhorší možný.

Nabízí se proto další alternativy, jak s vyprodukovaným teplem naložit. Nejdůležitější je si uvědomit, že datové centrum je umístěno v kontejneru, jehož hlavní předností je mobilita. Je tak možno takové centrum jednoduše naložit a převézt na libovolné místo v rámci země, kontinentu, nebo celého světa. Jako základ ke svému provozu potřebuje pouze připojení na dostatečně výkonou elektrickou síť a připojení k internetové anebo jiné datové síti.

Jelikož je teplo produkováno po celý rok, jako první možnost jeho využití se nabízí predehřev TUV. Podmínkou musí být dostatečný průtok chladné vody v průběhu celého dne, čehož není problém dosáhnout například u velkých firem, školských zařízení, velkých ubytovacích zařízení, nebo u bytových čtvrtí. V nočních hodinách je možno odpadní teplo shromažďovat v akumulčních nádržích. V chladných dnech je odpadní teplo možné kromě ohřevu TUV použít i k ohřevu otopné vody.

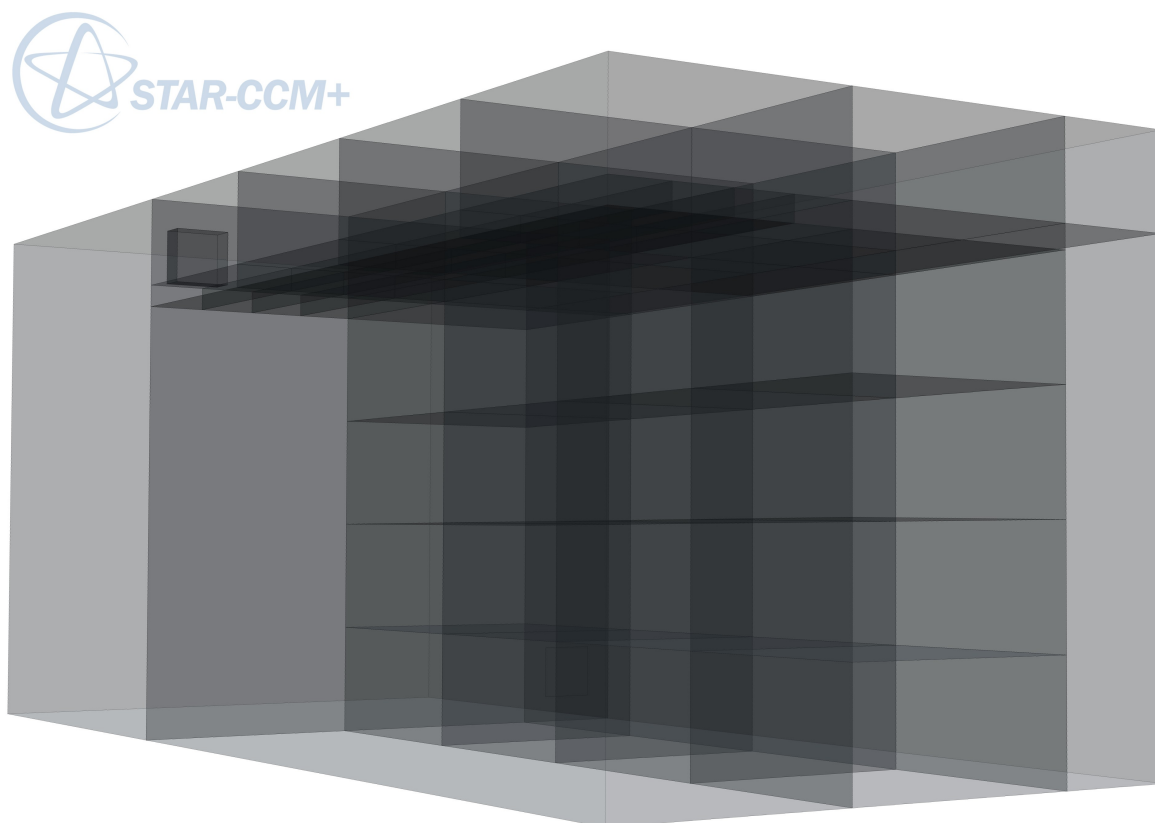
Možností využití odpadního tepla je tedy několik, vždy se odvíjejí od místa umístění datového centra a můžou značně ušetřit náklady například na vytápění, anebo ohřev TUV. Každý projektant datového centra by měl zvážit, zda-li bude teplo bez užitku vypouštět do okolí, nebo jestli ho využije k dalším účelům a dlouhodobě tak sníží finanční náklady na provoz datového centra.

3. CFD Simulace

Součástí této práce je i vytvoření podrobného modelu projektovaného datového centra a provedení základních simulací k ověření funkčnosti tohoto modelu. Cílem je tedy vytvořit geometrii datového centra ve formátu parasolid (*.x_t), správně propojit všechny funkční oblasti, vytvořit vhodný síťový model (Mesh), nastavit správný fyzikální model a provést numerický výpočet za určitých okrajových podmínek.

3.1 Popis projektovaného datového centra

V této práci je navrhováno kontejnerové datové centrum, jehož hlavním posláním je provádění CFD výpočtů. Specifický důraz je kladen především na celkový výpočetní výkon. Předpokládejme proto, že v kontejneru jsou umístěny vysoce kompaktní blade-servery, osazené více-jádrovými procesory. Nezbytné je také osadit tyto servery dostatkem fyzické paměti a dostatečným úložným prostorem. Síťové prvky a záložní zdroje jsou v datovém centru umístěné taktéž.



Obrázek 17: Pohled na geometrii datového centra v perspektivě

Datové centrum bude umístěno v normalizovaném kontejneru, jehož vnitřní rozměry jsou dány platnou ISO normou na 5898 mm × 2350 mm × 2392 mm (délka × hloubka × výška). DC je rozděleno na dvě části v poměru 1:2. Menší část je zabrána technologickou místností, větší část je určena pro rackové skříně. Pro 20“ kontejner pak na technologickou část případnou necelé 2 m délky a pro výpočetní část necelé 4 m. Do výpočetní části se vejde celkem 4-6 rackových stojanů, které jsou schopny pojmout značné výpočetní výkony. Počet umístitelných rackových skříní je závislý na jejich rozměrech.

Budeme uvažovat skříň o rozměrech 1000 mm × 1000 mm × 2000 mm. Přesné rozměry vyráběných skříní jsou rozličné dle typu anebo výrobce. Takováto idealizovaná skříň disponuje objemem 2 m³. Pokud do skříně osadíme výkonné výpočetní prvky, můžeme počítat s výkony v desítkách kilowatt, v tomto případě budeme uvažovat na jednu skříň základní výkon 10 kW. Pro potřeby zadávání do simulace se tedy bude jednat o tepelný výkon 5 kWm⁻³.

Stojany jsou pro co nejlepší využití prostoru seřazeny do řady vedle sebe. Skříně tak vytvářejí stěnu, která hraje zásadní roli pro proudění vzduchu v místnosti. Zařízení umístěná ve stojanech předávají výše uvedené odpadní teplo do vzduchu, který je vyfukováno za rackové stojany. Ohřátý vzduch pak stoupá vzhůru, kde v prostoru nad rackovými skříněmi prochází výměníkem a je ochlazen (zobrazeno například v kapitole 3.6, obrázek 22). V prostoru výměníků jsou také umístěny ventilátory, které dodávají vzduchu potřebnou rychlost proudění.

Chladný vzduch pak opět cirkuluje směrem k rackovým skříním, směr jeho proudění je určen výustkami. Ty jsou nastavitelné, čili je možno s nimi přesně směřovat proud vzduchu k jednotlivým skříním, nebo je možno je zcela uzavřít. Nastavovány jsou manuálně, případně automaticky elektricky řízenými servopohony. Uzavírání nebo směřování výustek má zásadní dopad na chlazení jednotlivých komponent umístěných ve skříních; hlavní vzduchové proudy musí směřovat k výpočetním serverům. A naopak, místa ve skříních, které nejsou osazeny zařízeními, není nutno ofukovat vůbec. Ofukování stěn místnosti je taktéž zbytečné a tudíž nechtěné.

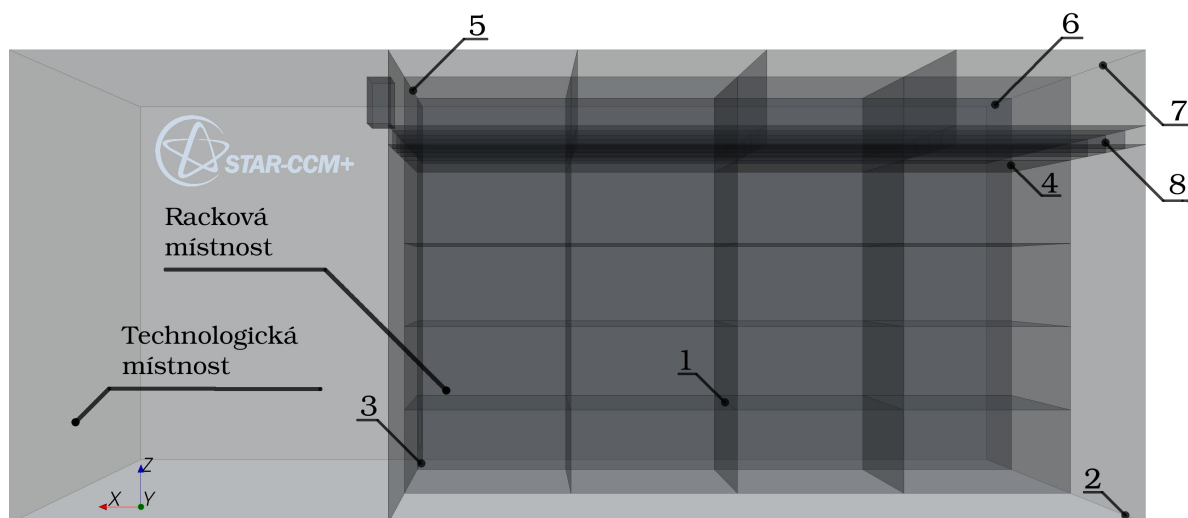
Technologická část musí být chlazena taktéž. Nemá svůj vlastní výměník, takže využívá chladicího výkonu výměníků v rackové části. Chladný vzduch je ventilátorem vháněn do technologické místnosti a tím je udržena odpovídající teplota pro provoz příslušných zařízení.

3.2 Geometrie a vlastnosti jednotlivých částí

Kontejner je modelován jako kvádr, jehož rozměry jsou (kvůli lepší práci se souřadným systémem) zaokrouhleny na 6000 × 2500 × 2500 mm. Technologická místnost má délku 2000 mm a výpočetní místnost 4000 mm.

Technologická místnost je jedno body. Může mít vlastnosti Porous a Energy Source. V technologické místnosti je i umístěn ventilátor (na vnitřní stěně) který funguje jako Momentum Source.

Racková místnost je rozdělena do 8mi základních oblastí, které jsou názorně očíslovány ve schématickém zobrazení na obrázku 18.



Obrázek 18: Popis jednotlivých oblastí v modelu datového centra

1. Rackové skříně (Racks)

Jsou rozděleny do jednotlivých oblastí (různá Bodies), každá skříň sestává ze 4 oblastí o rozměrech 1000 × 500 mm. Celkem je tak namodelováno 16 kvádrových rackových oblastí, v každé z nich se dá individuálně měnit Porosity a Energy Source okrajová podmínka.

Kvůli dobré přehlednosti byl zaveden systém číslování všech oblastí. Je schématicky znázorněn na obrázku 19 a začíná se počítat od racku, který je nejblíže k technologické místnosti. Rackové oblasti jsou číslovány směrem od shora dolů. Oblasti jsou označeny zkratkou R. Poslední racková oblast nejdále od technologické místnosti, dole u podlahy, má tedy označení R44.

	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4
	P1	P2	P3	P4
	R1	R2	R3	R4
	V11	V21	V31	V41
	V12	V22	V32	V42
	V13	V23	V33	V43
	V14	V24	V34	V44

	Ex1	Ex2	Ex3	Ex4
	P1	P2	P3	P4
	R11	R21	R31	R41
	R12	R22	R32	R42
	R13	R23	R33	R43
	R14	R24	R34	R44

Obrázek 19: Systém popisování všech oblastí v datové místnosti

2. Prostor před rackovými skříněmi (FrontDown)
Volný prostor pro cirkulaci chladného vzduchu, jedno body.
3. Prostor za rackovými skříněmi (BackDown)
Volný prostor pro cirkulaci horkého vzduchu, jedno body.
4. Nepoužívaný prostor mezi racky a výměníky
Je značen jako P a číslován stejně jako racky, nad kterými se nacházejí.
5. Výměník nad rackovými skříněmi (Exchanger)
Rozdělen do 4 bodies, každé má rozměry jako racková skříň, nad kterou se nachází. Pomocí podmínky Energy Source se jim dá přiřadit libovolný chladicí výkon, pomocí Porosity se dají směřovat nebo uzavřít.
6. Horní prostor za racky (BackTop)
Volný prostor pro cirkulaci horkého vzduchu.
7. Horní prostor mezi výustkami a výměníky (FrontTop)
Rozdělen do 4 oblastí. Označeny jsou opět 1-4, první je nejbližší k technologické místnosti. Značeny jsou písmeny FT. Jednotlivým interfaces mezi oblastmi je možno přidávat nebo odebírat podmínku Wall a tím jednotlivé prostory spojovat, nebo rozpojovat.
8. Horní prostor nad racky (Výustky)
Prostor rozdělen do několika oblastí, každé body představuje směrovatelnou výstku. Směrování proudu vzduchu je docíleno pomocí Porous okrajové podmínky. Výustek je 4×4 , tedy 16 ks. Výustky se dají libovolně spojovat odebráním okrajové podmínky Wall a jsou značeny V. první z nich je nejbližší k technologické místnosti a nejbližší k rackové skříni číslo 1.

3.3 Vytvoření vhodné sítě.

Nejdříve je nezbytně nutné nastavit všechny potřebné Interfaces. Ty se musí nastavit pro všechny oblasti, jelikož jinak by nebylo možné měnit podmínku Baffle nebo Internal Interface pro změnu průchodnosti stěny mezi sousedícími oblastmi.

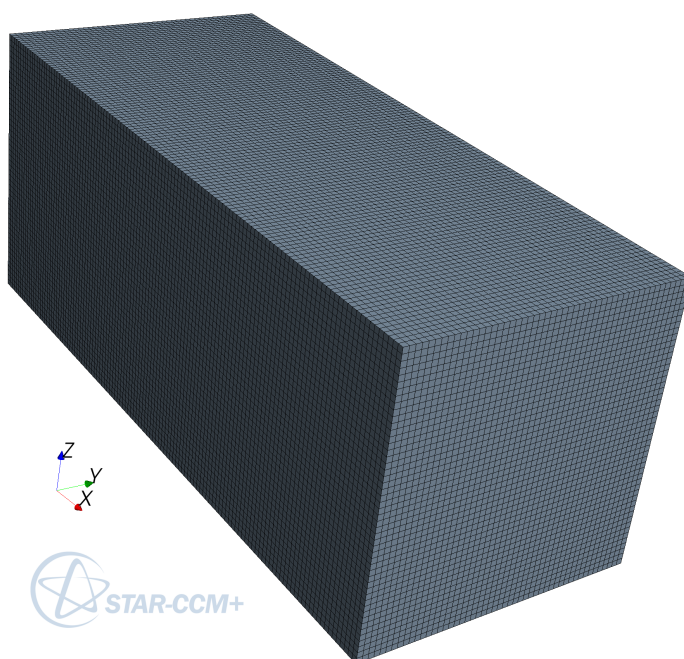
Tam, kde jedna oblast přiléhá k více jiným, je nutno už při modelování na takovouto oblast (Body) vytvořit příslušné Rectangle Faces. Ty se za pomoci funkce Imprint otisknou na stěny Body a jen tak je možno tvořit všechny Interfaces. Je nutno na toto pamatovat už při modelování, jelikož po importu modelu už není možno takovéto Faces přidávat.

Jelikož jsou všechny prostory, ze kterých se kontejnerové datové centrum skládá, tvořeny obdélníky, nabízí se jako nejvhodnější řešení rozdělit celý prostor taktéž pravoúhlými obdélníky. Proto je jako meshovací model zvolen Trimmer a pro vymeshování povrchu taktéž Surface Remesher. Použití sítě z tetragonů nebo polygonů by vedlo ke zbytečně náročnějšímu výpočtu.

Při meshování byla zvolena podmínka Per-Region Meshing, která zaručí, že každé

body se bude meshovat zvlášť. Bez této možnosti nebylo ani možné Mesh vytvořit, proces meshování se z neznámých důvodů nebyl schopný dopočítat výsledku v určité fázi výpočtu. Per-Region Meshing byl tedy v tomto případě nevyhnutelný a ukázal se jako správná volba. Pokud by bylo požadováno měnit základní rozměr buňky v určitých bodies zvlášť, přiřadil by se takovýmto bodies vlastní Mesh.

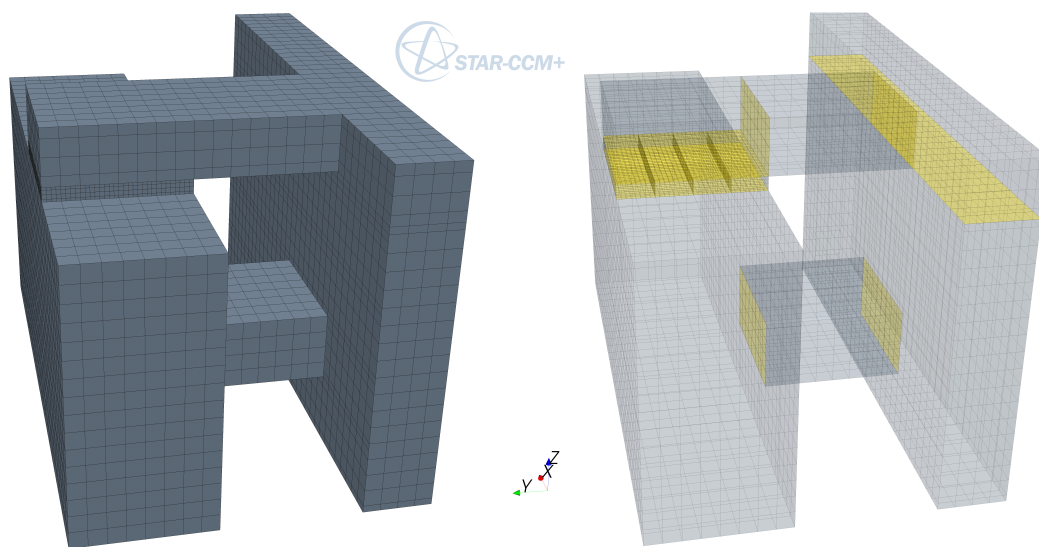
Vzhledem k rozměrům jednotlivých oblastí v datovém centru, které jsou v celých desetinách metru, je vhodné volit základní rozměr buňky právě po 0,5 m, 0,25 m, 0,1 m nebo 0,05 m. Pro dostatečně jemnou síť je proto použito Base Size rovno 0,05 m. Jemnost takovéto sítě lze pozorovat na obrázku 20. Obecně platí, že čím jemnější síť, tím přesnější výpočet a lepší dosažení konvergence výpočtu. Nevýhodou je, že s volbou jemnější sítě drasticky také rostou nároky na výpočetní HW a tím i nároky na výpočetní čas.



Obrázek 20: Objemová síť při Base Size rovné 0,05 m

To se také projevilo ihned po spuštění simulace, jedna iterace na použitém HW trvala řádově desítky sekund a po určité době nedostačovala operační paměť, která začala přetékat, viz kapitola 3.6. Bylo tedy nutno provést rapidní zjednodušení sítě. Base Size byla nastavena na 0,25 m, přičemž bylo opět použito podmínky Per-Region Meshing. Byla tak vytvořena síť, která striktně nerespektuje Base Size a velice dobře se přizpůsobuje prostorové geometrii.

Oblasti, ve kterých nebyly umístěny aktivní racky byly z meshování vynechány, stejně tak jako nepoužité výměníky a výustky. Vznikla tak zjednodušená síť, která sestávala pouze z jednoho rackového prostoru, jednoho výměníku a výustek. Byly ponechány také prostory před a za rackovými skříněmi, kterými mohl vzduch volně cirkulovat. Zjednodušení je vidět na obrázku 21. Vlevo je vidět povrchová síť, vpravo je zapnuta průhlednost a je možno vidět celkové uspořádání sítě.



Obrázek 21: Zjednodušená objemová síť použitá pro finální výpočet.

3.4 Nastavení fyzikálních modelů

Simulace bude prováděna v Three Dimensional prostoru. Základní model bude Stationary. Nejdříve bude výpočet proveden v ustáleném režimu, čili vybereme podmínku Steady. Ve všech Bodies bude fyzika stejná, čili pracovní látkou bude plyn (Gas). Vybereme nejlépe Ideal Gas.

Jako řešič je vybrán Segregated, vzhledem ke zkoumání teplotních polí je nutné mít zapnuté řešení energie, čili Segregated Fluid Energy

Typ proudění bude, vzhledem k rozměrům, rychlostem a Reynoldsovu číslu, laminární (Laminar). Pro vyšší rychlosti proudění by muselo být přepočítáno Reynoldsovo číslo a bylo by zvoleno proudění Turbulentní. Charakteristický rozměr je volen dle vyskytujících se průřezů jako 0,25 m.

3.5 Nastavení okrajových podmínek

V simulaci se nastavují v zásadě 4 hlavní okrajové podmínky.

1. Pomocí nastavení Interfaces na hodnotu Baffle se z Interface vytvoří neprůchozí stěna. Defaultní podmínka je adiabatic, čili takováto stěna nepřenáší teplo mezi sousedícími bodies. Při nastavení podmínky Internal Interface se počítá s otevřeným průchozím rozhraním. Tímto je možné spojovat rackové Bodies, Exchangery, FrontTop prostor nad výuskami a především výustky samotné. Možné by také bylo pro částečnou průchodnost nastavovat třetí typ Interface – Porous Baffle.
2. Druhou možnou okrajovou podmínkou, kterou je možno jednotlivým Bodies přiřadit, je Energy Source. Využije se především pro rackové skříně produkující teplo (kladný objemový výkon) a na výměníky (Exchangery), které naopak chladí (záporný objemový výkon).

Pro každou oblast je možno nastavit libovolný výkon, což simuluje použití různých výkonných zařízení v různých pozicích rackových skříní.

Je nezbytně nutné, aby součet všech výkonů v prostoru byl roven nule. Místnost je od okolního prostředí adiabaticky izolována a pokud by nebyly všechny výkony v rovnováze, prostor by se nekonečně zahříval, nebo nekonečně ochlazoval. To by se rychle projevilo divergencí energetického residua.

Proto by bylo při rozsáhlejších simulacích vodně nastavit výkon Exchangeru jako záporný součet výkonů jednotlivých rackových oblastí v racku, který se pod ním nachází.

3. Dalším možným nastavením je přidání podmínky Momentum Source, kdy se bodies chovají jako zdroje hybnosti. Opět se použije pro Bodies Racks a Exchangers, touto okrajovou podmínkou se nahrazují ventilátory, které v reálné situaci zajišťují proudění vzduchu.
4. Poslední okrajovou podmínkou pro Bodies je velice důležité nastavení Porous Region. Toto nastavení umožňuje směřovat proudění vzduchu uvnitř Bodies, používá se především pro nasměrování proudu vzduchu v oblasti FrontTop, které nahrazuje použití reálných směrovacích přepážek. Nejdůležitější roli ovšem toto nastavení hraje u výustek, kde určuje, jakým směrem bude vzduch z výustky proudit. Je pro celou simulaci zásadní, neboť právě natačením výustek je možné směřovat proudy vzduchu na rackové oblasti s nejvyšším výkonem (a tudíž s největší potřebou zásobování chladným vzduchem).

3.6 Provedení simulace

Simulace byla prováděna na následujícím HW a SW:

- CD-Adapco Star-CCM+ 4.04 32-bit / 64-bit
- Microsoft Windows XP 64-bit
- 2 × AMD Opteron 285 (DualCore, 2,6 GHz)
- 4 × 1GB RAM (DDR 400 MHz, ECC, Registered)
- 1 × Western Digital Raptor (37 GB, 10k rpm)

Při provedení simulace v celém objemu rackové místnosti byla rychlost výpočtu 2 iterace za minutu při využití všech 4 jader. Použití 32-bit verze programu CCM+ však s nejvyšší pravděpodobností nedovolilo adresovat plné 4 GB operační paměti, výpočet tak po několika stovkách iterací zaplnil všechnu použitelnou paměť a začal používat disk jako swapovací paměť. To mělo za následek několikanásobné zpomalení výpočtu a simulaci bylo rozumnější ukončit.

Bylo proto nevyhnutelné celou simulaci zjednodušit a přizpůsobit ji tak dostupným výpočetním možnostem. Z celkového počtu 16ti pozic (4 skříně × 4 pozice) byla hardwarem obsazena jen jedna, zbylé zůstaly nevyužité a byly uzavřeny, aby přes ně neproudil vzduch. Stejně tak bylo použito i jednoho výměníku, umístěného nad obsazeným rackem. Původní síť byla zjednodušena, viz kapitola 3.3. Energetické a teplotní stavy byly sice zkoumány, výpočet se ale zaměřil

především na proudění vzduchu a na správné nastavení Porous Region u oblasti nad výustkami a na výustkách samotných. Tímto bylo simulováno naklopení lopatek výustek pro požadované směřování proudu vzduchu.

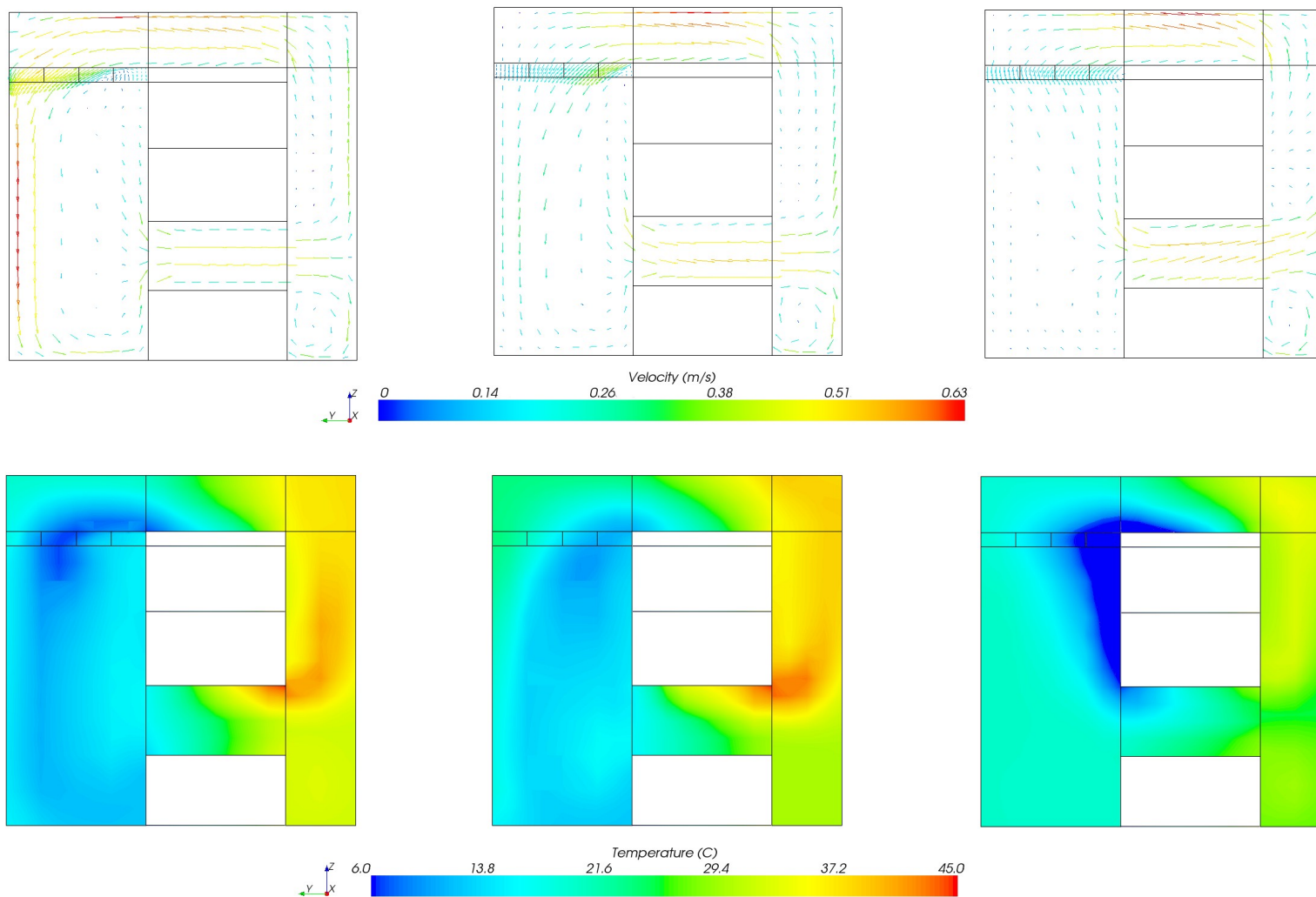
K rozproudění vzduchu v kontejneru byla použita okrajová podmínka Momentum Source Option v oblastech části rackové skříně (napodobení funkce ventilátorů v racku) a v oblasti výměníku nad ní (cirkulační ventilátor výměníku). Hodnoty byly nastaveny tak, aby se rychlost proudu vzduchu z výustek pohybovala mezi $0,5\text{--}1\text{ ms}^{-1}$. Síť byla nastavena na 0,25 m Base Size a byla opět zvolena podmínka Per-Region Meshing. Síť byla tedy vytvořena pouze v místech, kde probíhalo proudění a tepelá výměna. Po spuštění simulace na oba procesory a všechny jádra byla rychlost iterování přibližně 1 iterace za sekundu. Takto vysoká rychlost iterování umožnila při spuštěném výpočtu libovolně měnit hodnoty Porous u oblastí FrontTop a na jednotlivých výustkách.

Na zvolených Scalar a Vector Scenes bylo pak možno v příčném průřezu sledovat vektory rychlostí a rychlostní pole. Porous Region v numerickém řešiči funguje tak, že průtok vzduchu je libovolným směru postaven odpor, který vzduch v tomto směru „brzdí“. V rámci souřadného systému je možné tento odpor nastavit do všech myslitelných směrů. Nastavuje se za pomoci Porous Viscous Resistance ve Physical Values a je možno vybrat několik způsobů jeho zadávání. Ty jsou vybírány v závislosti na tom, jaký je požadovaný směr proudění.

Pro směřování vzduchu v oblasti FrontTop stačilo zavést odpor ve směru osy Y přes zadání pomocí Principal Tensor. To mělo za následek potřebné nasměrování vzduchu z Exchangeru na výustky. Odpor ve směru osy Y byl volen postupně a jeho optimální hodnota byla nastavována manuálně v závislosti na průtoku vzduchu jednotlivými výustkami. Cílem bylo, aby byl průtok vzduchu každou výustkou přibližně stejný. Pro potřeby sledování průtoku byly vytvořeny 4 Reports, která přes Area Averaged zaznamenávaly Mass Flow přes jednotlivé výustky. Výsledky byly vyneseny do jednoho grafu pro co nejjednodušší vizuální porovnání.

Směr proudění vzduchu přes výustky byl taktéž směřován pomocí Porous okrajové podmínky. V tomto případě nebylo možné použít nastavení odporu v základní souřadné soustavě, bylo proto použito zadání odporu jako Composite Symmetric Tensor. Použity byly směry ZY a YZ a postupným nastavováním hodnot bylo možno měnit směr výfuku vzduchu z výustky. Cílem bylo nasměrovat co největší proud vzduchu přímo na obsazenou část rackové skříně a zajistit jí tak co nejlepší podmínky pro chlazení.

Byly provedeny celkem tři simulace, jejichž grafické výsledky jsou zobrazeny na obrázku 22. Jejich cílem bylo vypočítat rozložení teplot a rychlostí ve všech místech datového centra. Pro sledování byla vybrána rovina proložená středem 3. rackové skříně. Obrázky byly pořízeny po zkonvergování výpočtu, tzn. že všechna residua dosáhla přijatelných hodnot 10^{-2} až 10^{-3} a zároveň teplota v objemu sledovaného racku dosáhla ustálené hodnoty. Ta byla vykreslována do grafu pomocí funkcí Report, Monitor, Plot. Na obrázku 22 jsou tedy zachyceny 3 možnosti směřování proudění chladného vzduchu na rackové skříně.



Obrázek 22: Výsledné grafické zobrazení výpočtu

1) První simulace

Vzduch byl hnán skrze výpočetní část rackové skříně, která ho ohřívala a zároveň mu udávala rychlost, jelikož fungovala i jako zdroj hybnosti. Dodávaný výkon byl 2500 W a zdroj hybnosti $0,1 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$ proti směru osy y. Po ustálení proudění byla průměrná teplota vzduchu na vstupu do racku $16,5^\circ\text{C}$ a na výstupu $31,6^\circ\text{C}$. Ve sledovaném objemu racku byla průměrná teplota $26,2^\circ\text{C}$. Průměrná rychlost proudění skrze rack byla $0,38\text{ms}^{-1}$, což odpovídá objemovému toku 190 ls^{-1} ($685 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$).

Ohřátý vzduch poté stoupal vzhůru prostorem za rackovými skříněmi a byl nasáván do výměníku, ve kterém byl výkonem -2500 W ochlazen. Výměník mu opět dodal hybnost ($0,3 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$ ve směru osy y) a chladný vzduch pokračoval do horní části oblasti před racky, jedná se o oblast mezi výměníkem a výustkami. V této oblasti nebyla definována žádná okrajová podmínka a tak se vzduch stočil směrem k výustkám. Ty také neměly nadefinovanou žádnou okrajovou podmínku a dovolili proudění vzduchu volně protéci.

V oblasti před racky tak vzniklo proudění, které nebylo ničím usměrněno. Na obrázku je tedy vidět, že nejchladnější vzduchu proudí středem oblasti a nejvyšší rychlost proudění je dosažena u zdi kontejneru. Tento stav je nevyhovující, protože není nutno ochlazovat zeď, nýbrž je třeba chladný vzduch distribuovat přímo na rackové skříně. Pokud se zaměříme na rack jako takový, zjistíme, že teplota vzduchu není v celém objemu rovnoměrně rozmístěna a v horním pravém rohu dosahuje až 45°C . Lze předpokládat, že pokud by do takového proudění byly osazeny všechny 4 rackové oblasti, nejvyšší průtok by byl u nejspodnějšího racku, naopak nejhornějšího racku by docházelo k vážnému přehřívání.

2) Druhá simulace

Prostřední situace je obdobná jako ta výše popsaná, jediný rozdíl je v oblasti nad výustkami, do které byl přidán odpor. Ten je kladen vzduchu protékajícímu touto oblastí a má za úkol nasměrovat proudění více do prostoru před rackovými skříněmi. Pro celou tuto oblast (pracovně pojmenovaná jako FrontTop) byl změněn fyzikální model z Fluid na Porous Region. V okrajových podmínkách byl pak nadefinován Porous Inertial Resistance – Principal Tensor – YY Axis – $[0.0, 1.0, 0.0]$. Tento odpor je tedy ve směru osy y a funguje proti směru proudění, které je tak směřováno do směru osy z. V praxi by byly do dané oblasti umístěny přepážky anebo lamely, které by směr vzduchu měnily mechanicky.

Výsledek je vidět na prostředních zobrazeních z obrázku 22. Proudění v horní oblasti nad výustkami je stáčeno do směru osy z a dochází k rovnoměrnému rozložení rychlostí v oblasti před racky. Stále ovšem není dosaženo nasměrování proudu chladného vzduchu přímo na racky.

3) Třetí simulace

V posledním simulovaném stavu jsou k nasměrování proudu vzduchu použity výustky. Ty jsou celkem 4 a jsou umístěny nad prostorem před rackovými skříněmi.

Nastavení oblasti nad výustkami zůstalo stejné, jako v předchozím případě. Stejně tak byl i u nich nastaven Porous Region, ovšem bylo použito jiného způsobu definování odporu.

Situace je komplikovanější, jelikož není možné stavět odpor pouze v základních souřadných osách, ale je potřeba směr odporu stanovit více obecněji. K tomu posloužila okrajová podmínka Porous Viscous Resistance, konkrétně způsob zadání přes Composite Tensor. Odpor pak může být směřován v libovolném směru. Pro potřeby nasimulování úhlu výustek byl odpor nastaven ve směru YZ na hodnotu $-4,0 \text{ kgm}^3\text{s}^{-1}$.

Jak lze vidět na vektorovém zobrazení rychlostí, došlo přesně k požadovanému efektu a proud chladného vzduchu byl nasměrován přímo na rackové skříně. Nejvýše umístěné racky by byly na rozdíl od předchozího případu ofukovány mnohem lépe. Lze to vidět na rozložení teplotních polí uvnitř sledovaného racku, oproti předcházejícím dvěma případům byla teplota rozložena rovnoměrně a v žádném místě nedosahovala výrazně vyšších hodnot.

3.7 Simulace technologické místnosti

Ve výpočtu nebyla nakonec použita, ovšem je plně připravena k zakomponování do simulace. Vstup vzduchu do této místnosti zajišťuje ventilátor, který je tvořen jednou oblastí. Tomuto body je nutno na vstupu a výstupu nastavit Internal Interface okrajovou podmínku (pro proudění vzduchu skrze) a nastavit ho jako zdroj hybnosti (Momentum Source). Ventilátor vhání do technologické místnosti chladný vzduch z FrontTop oblasti. Tento vzduch ochlazuje komponenty v technologické místnosti a je vracen průduchem do prostoru za rackovými skříněmi (DownBack). Pro nastavení celkového tepelného výkonu všech zařízení v technologické místnosti (chladicího kompresoru, diesel-agregátů, MaR zařízení, zabezpečení, přídavných ventilátorů a zařízení pro výměnu vzduchu) je nejlepší použít podmínku Energy Source pro celou oblast technologické místnosti.

3.8 Zhodnocení simulace

Cíle této části práce byly splněny v rámci možností výpočetního hardwaru a softwaru. Byla vytvořena kompletní geometrie s kompletními možnostmi nastavení pro simulovanou situaci. I přes všechna použitá zjednodušení jsou možnosti řešení více než bohaté; je možno libovolně spojovat a rozpojovat jednotlivé oblasti, je možno definovat pro každou oblast tepelný výkon (jak pro chlazení prostoru, tak pro ohřev prostoru), zdroj hybnosti (pro jednotlivé racky, ventilátory výměníků atd.) anebo porozitu (pro směřování proudů vzduchu).

Vytvořený model je tedy univerzální a dá se na něm simulovat jakékoliv myslitelné rozložení jednotlivých prvků v rámci kontejnerového datového centra. Pro simulaci všech komponent s odpovídající přesností je ovšem nutno použít značného hardwarového výkonu.

4. Výpočet tepelných zisků programem TrnSYS

Datové centrum umístěné v kontejneru má oproti jiným typům datových center výhodu, že nemusí být umístěno v budově. Velmi reálnou představou je jeho umístění na firemním parkovišti, na střeše budovy, nebo v extrémním případě na ropné plošině. Proto je nutno uvažovat i podnebné vlivy, které na venku umístěný kontejner působí.

4.1 Vnější vlivy působící na datové centrum

Uvažují se tři základní činitelé: vzduch, voda a sluneční záření.

4.1.1 Působení vzduchu

U vzduchu jsou sledovány tři základní veličiny: teplota, rychlost proudění a vlhkost. Tato kapitola je věnována prvním dvěma veličinám, vlhkostí se zabírala kapitola 2.6. Teplota vzduchu vně kontejneru má za následek kladný nebo záporný tepelný tok skrz stěnu datového centra. Pokud bude teplota venkovního vzduchu nižší než teplota vzduchu vnitřního, dojde k ochlazení datového centra. Tepelný výkon tak poteče směrem ven a sníží se tak potřeba chladicího výkonu.

Jestliže bude teplota vně vyšší než uvnitř, bude teplo procházet směrem dovnitř a bude tak datové centrum zahřívat. Toto je velice důležitý poznatek, při navrhování výkonu chladicího zařízení je potřeba jej vzít v úvahu a výkon navýšit o tepelný zisk prostupem tepla stěnami kontejneru. Pokud by nebyl zisk připočítán, došlo by ke zvýšení teploty uvnitř datového centra, což by mohlo vést k přehřátí a poškození komponent v něm obsažených. Cílem této kapitoly tedy bude pomocí simulačního programu zjistit průběhy venkovních teplot v průběhu roku a dopočítat příslušné tepelné toky, které budou buď chladit, nebo zahřívat kontejner datového centra.

Druhou zmíněnou veličinou je rychlost proudění vzduchu, kterou lze v tomto případě chápat jako vítr foukající na kontejner. V použitém programu TrnSYS 16 nebyla simulace proudění větru kolem kontejneru použita, jelikož nebyly dostupné data o rychlosti a směru větru pro zkoumanou oblast. I tak by rychlost a směr větru ovlivnili pouze koeficient přestupu tepla na vnější stěně kontejneru, což by vzhledem k jejímu materiálovému složení ovlivnilo výsledný tepelný tok stěnou jen málo.

Kontejner je konstruován jako vzduchotěsný, čili je snaha naprosto zamezit infiltraci okolního vzduchu do vnitřního prostoru. Díky absenci oken a pouze jednomu vstupním dveřím je zamezení nechtěné infiltrace poměrně snadné.

4.1.2 Působení vody

Kontejner je taktéž konstruován jako vodotěsný. Není možné dopustit, aby se voda z okolního prostředí dostala do vnitřního prostoru datového centra. Nedestilovaná voda je elektricky vodivá a má proto při kontaktu s elektronickými součástkami většinou fatální následky. Zvýšená vlhkost je pro komponenty také problematická, obzvláště pokud může dojít vlivem snížení teploty anebo tlaku k její kondenzaci.

Vlhkost taktéž nebyla řešena, věnuje se jí kapitola 2.6 zaměřená na větrání. V simulaci byla zadána konstantní relativní vlhkost 50 %. Působení deště a sněhu je taktéž zahrnuto do zmíněné kapitoly.

4.1.3 Působení slunečního záření

Tento činitel je zkoumán právě pomocí simulace v programu TrnSYS 16. Pokud je datové centrum umístěno ve venkovním prostředí a není nikterak stíněno, na všechny jeho stěny dopadá sluneční záření, a to jak přímé tak rozptýlené. Toto záření zvyšuje teplotu stěn kontejneru a způsobuje tak tok tepla do datového centra, čímž zvyšuje výkon potřebný na jeho chlazení.

Je tedy potřeba znát přesnou polohu slunce nad obzorem (výška, azimut) v průběhu dne, a to po celý rok. Taktéž je potřeba mít k dispozici data o čistotě oblohy, jelikož jasná obloha propustí více solárního záření, než zatažená. Tyto data má simulační program k dispozici a dokáže s nimi počítat.

Naopak v noci se solární zisk rovná nule, ovšem kontejner má určitou teplotu stěn (a na základě Stefanova–Boltzmannova zákona) se tak chová jako zářič a sám vyzařuje teplo do oblohy. I s tímto program TrnSYS počítá.

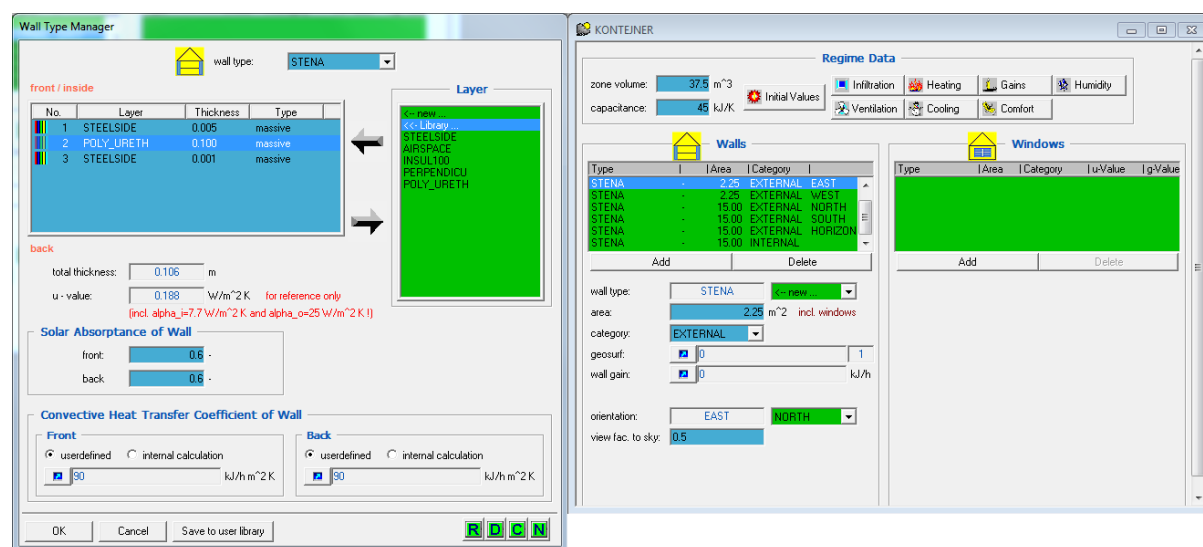
4.2 Sestavení modelu datového centra

Prostorový model datového centra byl vytvořen v programu TRNBuild, který je součástí TrnSYS 16. Nejprve bylo potřeba nadefinovat materiálové složení stěn kontejneru. To je podrobněji rozebráno v kapitole 2.2, v modelu bylo nadefinováno složení stěn dle tabulky 8. Všechny stěny měly pro zjednodušení stejné parametry a dveře byly zanedbány.

Tabulka 8: Vlastnosti materiálů použitých v modelu

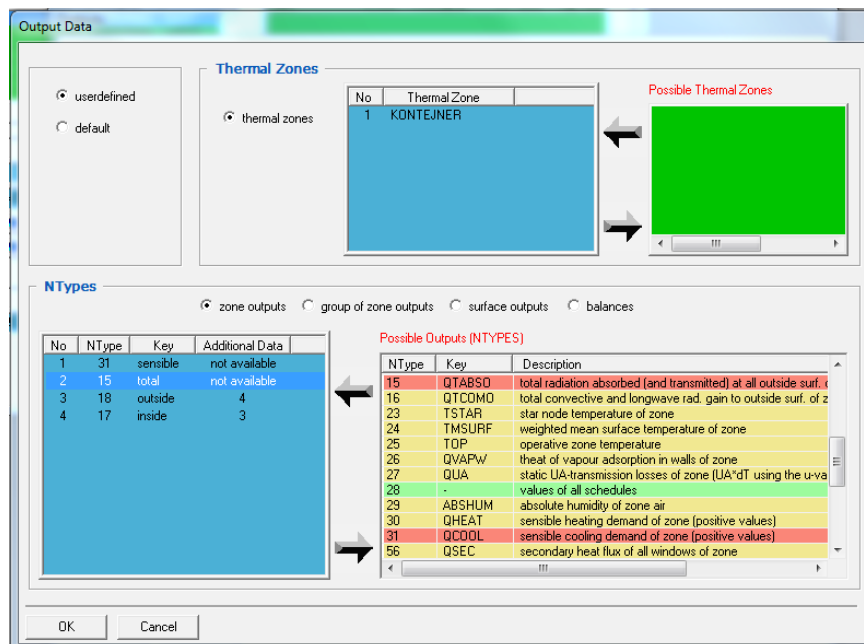
Materiál	Tloušťka	Tepelná vodivost		Tepelná kapacita	
		[kJh ⁻¹ m ⁻¹ K ⁻¹]	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	[kJkg ⁻¹ K ⁻¹]	[Jkg ⁻¹ K ⁻¹]
Ocel	5	161,96	44,99	0,42	420
Polyuretan	100	0,07	0,02	2,09	2090
Ocel	1	161,96	44,99	0,42	420

Důležitou roli hraje také vhodné nastavení koeficientů přestupu tepla na obou stranách stěny. Na vnější i vnitřní ocelové stěně byl nastaven $\alpha_{se} = \alpha_{si} = 25 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (Do programu se zadávají hodnoty $90 \text{ kJh}^{-1}\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$). Tato hodnota je typická pro vnější stěny, pro vnitřní stěnu byla použita takto vysoká hodnota z toho důvodu, že uvnitř kontejneru je značné proudění vzduchu s vysokými rychlostmi, čili je nutno volit koeficient přestupu tepla větší. Finální nastavení materiálů a modelu celého kontejneru je zobrazeno na obrázku 23.



Obrázek 23: Nastavení materiálu a modelu

V poslední řadě je potřeba nastavit, které hodnoty se mají v rámci datového centra měřit. Toto se opět provede v TrnBuilt prostředí, kde se vyberou požadované výstupy (outputs). Možností je celá řada, pro prováděnou simulaci jsou potřeba především typy 31, 15, 18 a 17. Jejich výběr je na obrázku 24.



Obrázek 24: Výběr výstupních dat

První dva výstupy (15, 31) jsou vztaženy na celou oblast kontejneru:

- 31 – QCOOL – celkový chladicí výkon oblasti,
- 15 – QTABSO – celková přijatá a vyzářená radiace na povrchu kontejneru.

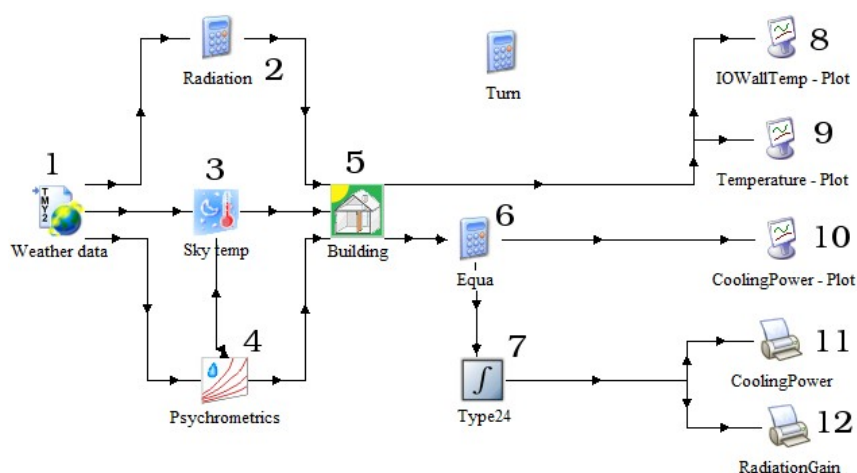
Zbývající dva výstupy (17, 18) jsou vztaženy na jednu stěnu kontejneru a zobrazují

- 17 – TSI – průměrnou teplotu vnitřní stěny a
- 18 – TSO – průměrnou teplotu vnější stěny.

Tímto je celá budova nadefinována a je potřeba ji napojit na ostatní části simulace.

4.3 Nastavení jednotlivých výpočetních objektů

Dále bylo třeba nastavit jednotlivé objekty přímo v programu TrnSYS 16. Výpočtové objekty zajišťují různé funkce a jejich možnosti jsou rozsáhlé. Jsou zobrazeny na obrázku 25 včetně jejich vzájemného propojení.



Obrázek 25: Schéma propojení výpočetních objektů

1) Weather Data

Tento objekt obsahuje meteorologické údaje pro zvolenou lokalitu. V nabídce je možno najít data z měřicích stanic po celém světě, pro potřeby této simulace byla zvolena oblast měření nejbližší městu Brnu, obec Kuchařovice. Pro tuto simulaci jsou nejdůležitější údaje o průběhu průměrných venkovních teplot a o solárních ziscích v průběhu celého roku.

2) Radiation

Z Weather data jsou údaje o solárních ziscích předány do tohoto objektu, který je vyhodnocuje a určuje tepelný tok dopadající na libovolnou plochu v libovolném dni roku.

3) Sky temp

Používá se pro určení teploty oblohy, která slouží k určení tepla vyzářeného z kontejneru.

4) Psychrometrics

Provádí psychrometrické výpočty, čili závislosti tlaku, teploty a vlhkosti.

5) Building

Nejdůležitější část, do které je načtený model kontejneru z programu TRNBuild. Obsahuje veškeré informace o budově, čili geometrii, vytápění, chlazení, větrání, vnitřních zisků, atd..

6) Equa

Funguje jako kalkulačka, v tomto případě se používá na převod $[\text{kJh}^{-1}]$ na $[\text{kW}]$.

7) Type24

Integrátor. V závislosti na časovém intervalu počítá množství dané veličiny. Vstupními hodnotami mohou být například $[\text{kW}]$ a integrací přes hodinový časový interval se na výstupu získávají $[\text{kWh}]$.

8) IOWallTemp – Plot

Vykresluje graf požadovaných veličin, v tomto případě průměrnou teplotu vnitřní stěny (Inner Wall) a vnější stěny (Outer Wall).

9) Temperature – Plot.

Vykresluje průměrnou teplotu uvnitř datového centra.

10) CoolingPower – Plot

Vykresluje do grafu potřebný chladicí výkon, který je potřeba k udržení teploty v datovém centru na konstantní teplotě.

11) CoolingPower

Pomocí integrátoru (Type24) vypisuje do souboru energii potřebnou k chlazení datového centra. Jako časový krok je možno zvolit sekundu, minutu, hodinu, den, nebo jiný nestandardní časový krok. Viz kapitola 4.4.

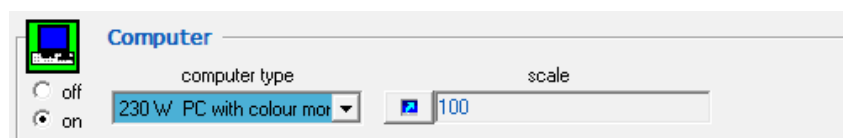
12) RadiationGain

Stejně jako předchozí objekt, i tento vypisuje do souboru integraci energie za časový interval, tentokrát se jedná o množství dopadající energie na kontejner datového centra v jednotlivých dnech roku. Viz kapitola 4.5.

4.4 Výpočet chladicího výkonu

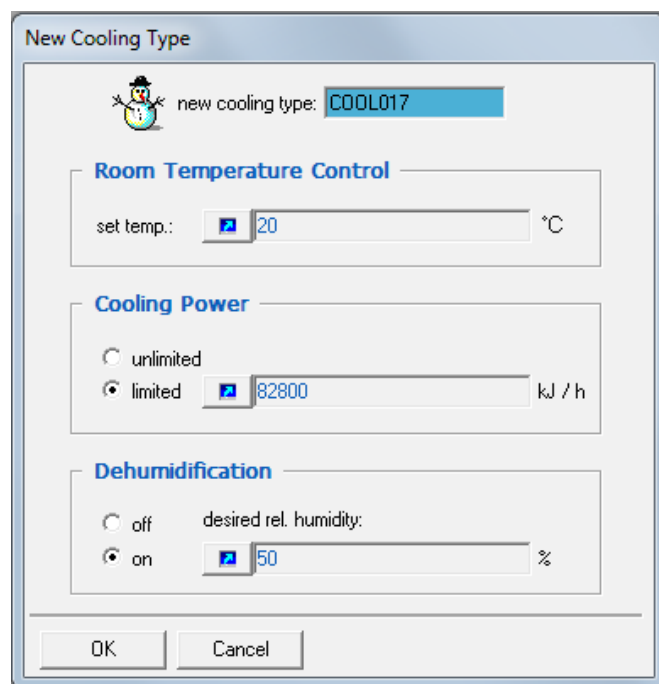
Pokud je dobře nastaven model kontejneru, jednotlivé objekty jsou vhodně umístěny a především správně propojeny, půjde simulace spustit bez hlášení chyby. Jelikož není zapnuto ani větrání, ani infiltrace, bude se teplota vzduchu v místnosti měnit pouze prostupem tepla skrze stěny. Teplota na vnější stěně bude dána jak venkovní teplotou, tak solárním ziskem. Dá se očekávat, že v zimních měsících budou teploty hluboko pod nulou, naopak v létě lze čekat uvnitř kontejneru velmi vysoké teploty.

Tato situace není pro tuto práci důležitá, proto bude do kontejneru zaveden tepelný zisk produkovaný zařízeními. Bude počítáno s obsazením dvou rackových skříní, čili s výkonem $2 \times 10 \text{ kW}$. Pokud bude k tomuto výkonu přičten i výkon neustále zapnutého osvětlení a výkon ventilátorů chlazení, bude celková uvažovaná tepelná zátěž rovna 23 kW . Tato hodnota se zadává přímo v TrnBuild do modelu budovy, jak je možno vidět na následujícím obrázku 26.



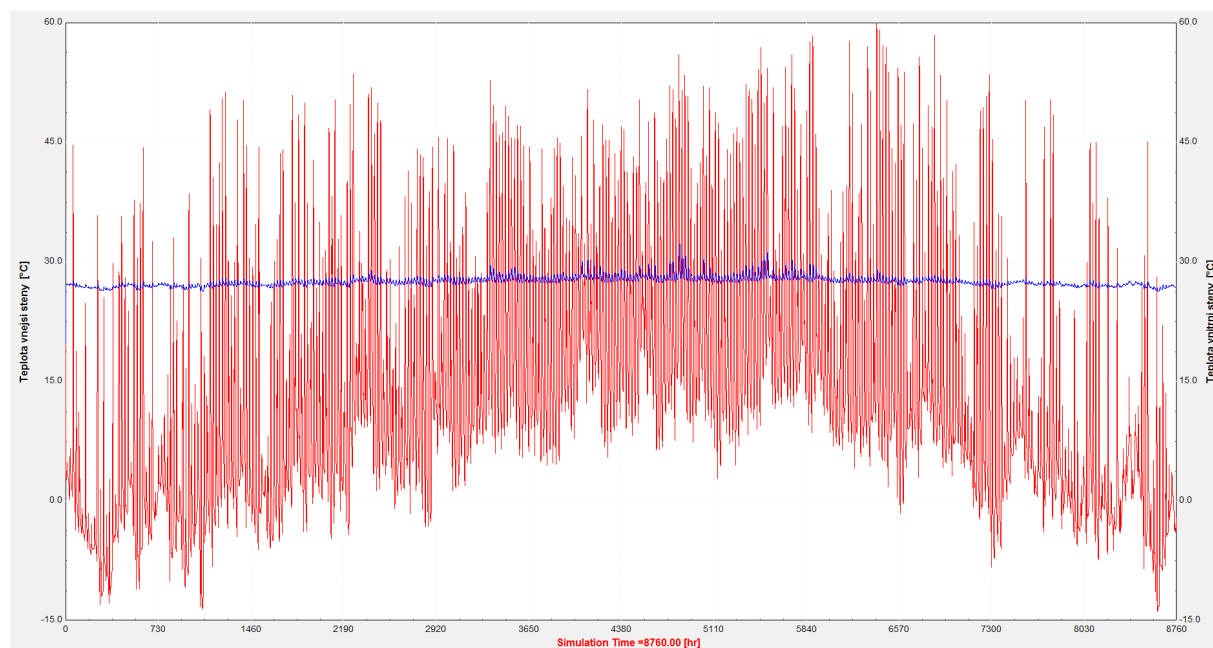
Obrázek 26: Nastavení tepelného zisku 23 kW z elektronických zařízení

Před spuštěním simulace je také potřeba nastavit adekvátní chladicí výkon. Jelikož není nastaveno ani větrání, ani infiltrace, docházelo by k ochlazování vnitřního prostoru pouze vedením skrze stěny. Vzhledem k velikosti tepelné zátěže, malým plochám stěn kontejneru a dobré tepelné izolace by teplota uvnitř dosahovala zřejmě stovek stupňů Celsia. Proto je s tepelnou zátěží ze zařízení zaveden zároveň i chladicí výkon, který bude pro začátek omezen na maximální hodnotu -23 kW . Požadavkem také bude udržovat teplotu vzduchu v místnosti na konstantních 20 °C . Chladicí výkon se tedy bude s časem měnit, nepřesáhne však maximální hodnotu -23 kW (zadáno $82\,800 \text{ kJh}^{-1}$). Nastavení chlazení probíhá taktéž už při definování budovy v rozhraní TrnBuild, viz obr. 27.



Obrázek 27: Nastavení chlazení datového centra

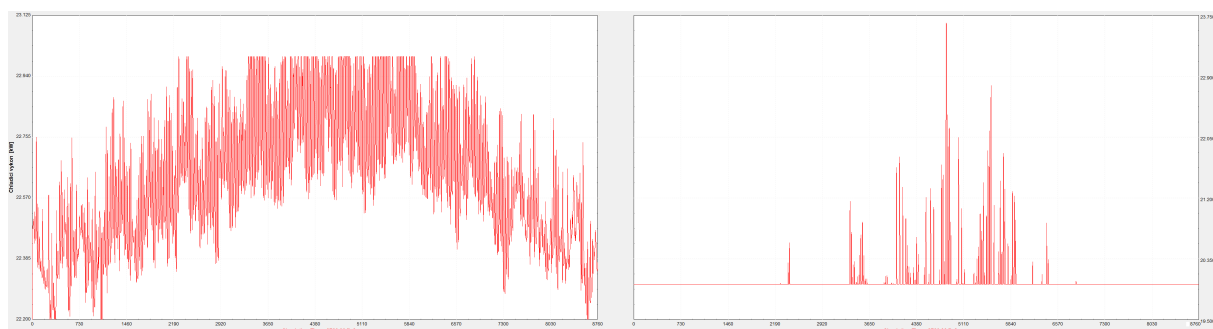
Po spuštění simulace se vykreslí tři požadované grafy. První z nich je zachycen na obrázku 28. Na ose x je zobrazený celý rok, jednotkou jsou hodiny. Počáteční datum je 1. ledna a koncové 31. prosince. Graf je rozdělen na 12 polí, z nichž každé reprezentuje jeden měsíc v roce. Na levé ose y se zobrazuje teplota vnější stěny (červená), na pravé ose teplota vnitřní stěny (modrá). Obě osy y mají stejný rozsah.



Obrázek 28: Teplota vnitřní a vnější stěny datového centra v průběhu roku

Teplota vnitřní stěny dosahuje rovnoměrných hodnot, výchyly jsou pouze mezi dnem a nocí a maxim nabývá v horkých letních měsících. Oproti tomu teplota vnější stěny kontejneru vykazuje značné rozdíly mezi dnem a nocí, nejvyšší podíl na tom mají solární zisky, které na ni dopadají. Zimní minima se nacházejí až u $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, letní maxima dosahují k $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Značné rozdíly mezi vnitřní a vnější teplotou jsou zapříčiněny použitým materiálem stěny (polyuretanová pěna). Ten disponuje výbornou tepelnou izolací $0,02\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ a dobrou měrnou tepelnou kapacitou $2090\text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Taktéž dostatečná tloušťka izolační vrstvy 100 mm zde hraje svou roli.

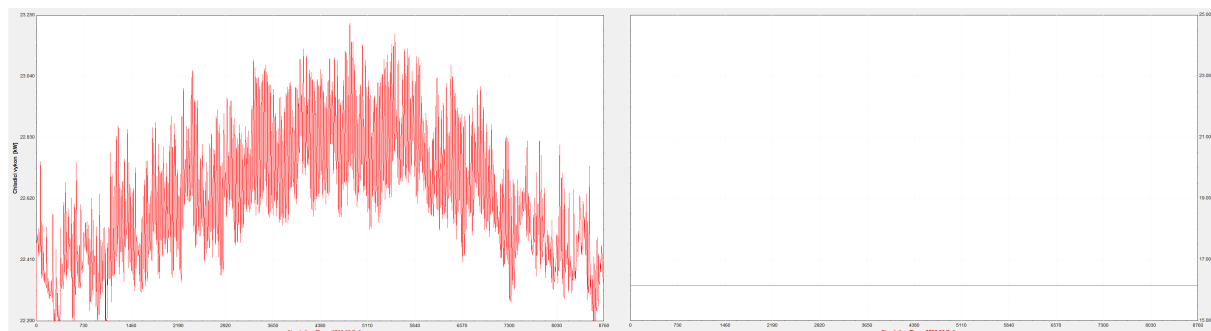


Obrázek 29: Průběh chladicího výkonu (max. 23 kW) a vnitřní teploty v průběhu roku

Obrázek 29 obsahuje zbylé dva vygenerované grafy. Na levém je znázorněn průběh potřebného chladicího výkonu v rámci roku, na pravém je zachycena teplota uvnitř datového centra. Program TrnSys zobrazuje chladicí výkon jako kladný, ve skutečnosti má ovšem záporné znaménko. Je nutno si všimnout jednoho základního faktu. V zimních měsících nebyl plný chladicí výkon -23 kW využit zcela, datové centrum se ochlazovalo také ztrátou tepla do okolí skrze stěnu kontejneru.

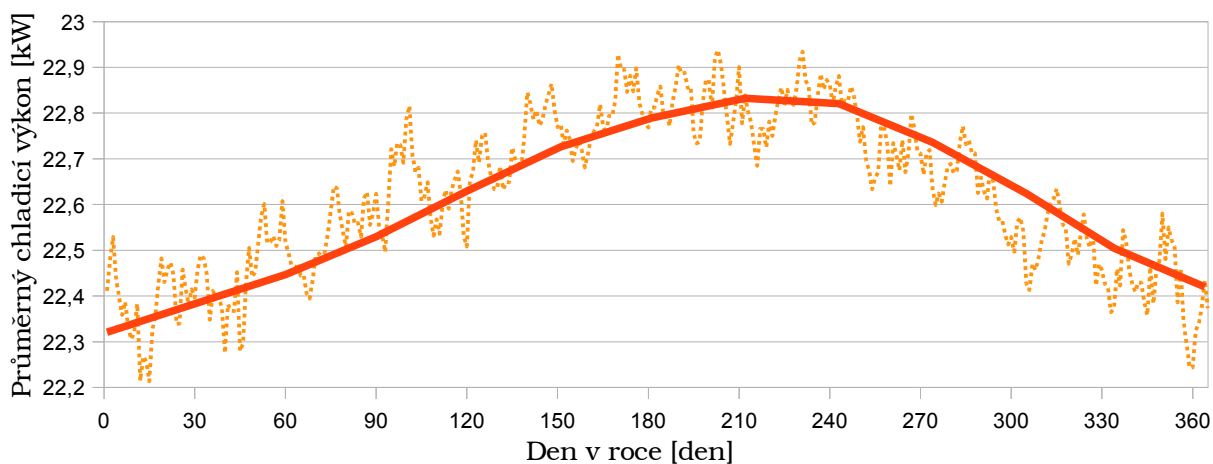
V letních měsících dosahovalo ovšem chlazení svého maxima -23 kW , jak můžeme vidět v horní části levého grafu na obr. 29. Celkové tepelné zisky datového centra byly ovšem vyšší než tato hodnota, což se projevilo nárůstem vnitřní teploty. Chlazení bylo nedostačující a tak k extrémnímu nárůstu došlo na konci července, kdy vnitřní teplota stoupla na $24\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je o $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ více, než je požadovaná teplota. Mezní teplota byla překročena celkem v 75-ti dnech v roce.

Simulace byla tedy přenastavena a maximální chladicí výkon byl zvýšen na dostatečných -24 kW . Znovu provedená simulace prokázala, že takovéto chlazení je schopno udržet konstantní teplotu v datovém centru na dané teplotě $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, jak lze pozorovat na obrázku 30.



Obrázek 30: Průběh chladicího výkonu (max. 24 kW) a vnitřní teploty v průběhu roku

V zimních měsících byl požadovaný chladicí výkon nižší než výkon, který produkovaly komponenty datového centra. Z grafu na obrázku 30 není možné přesně určit, o jaké výkony se jednalo a jaké teplo bylo odvedeno stěnami kontejneru. Proto byl proveden dodatečný výpočet, který za použití integrátoru a tisku do souboru (popis v kap. 4.3) zaznamenal průměrné denní výkony potřebné k chlazení v průběhu celého roku. Takto získaná data byla v programu OpenOffice.org Calc zpracována a vykreslena do grafu, který je k vidění na obrázku 31. Zpracování spočívalo v převedení získaných dat na použitelný formát a použitelné hodnoty, výsledkem byla hodnota energie spotřebované na chlazení denně. Tato hodnota byla uvedena v [kWh/den], čili po vydělení 24 hod byl získán průměrný denní výkon v [kW]. Hodnoty byly vyneseny do grafu.



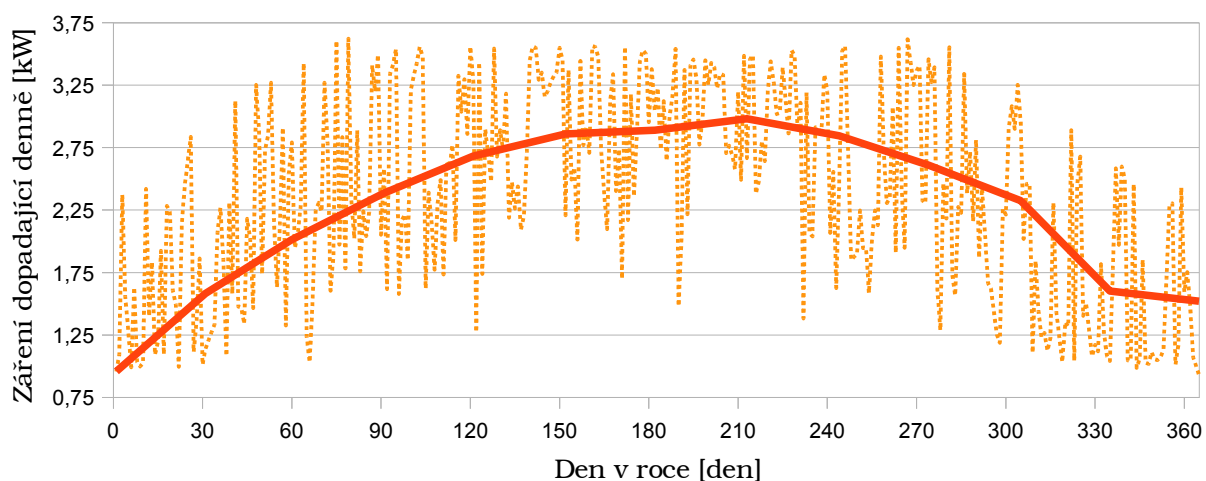
Obrázek 31: Zprůměrovaný chladicí výkon v průběhu roku

V grafu na obrázku 31 vystihuje světlá tečkovaná čára průběh požadovaných chladicích výkonů v průběhu dne, tmavá tlustá čára spojuje měsíční průměry. Na obrázku 30 jsou zachyceny hodinové hodnoty, proto jsou maximální chladicí výkony i nad 23 kW, čehož při denním a měsíčním zprůměrování v obrázku 31 nemůže být dosaženo. Naopak z nich vyplývá, že průměrný výkon potřebný k chlazení je vždy menší než výkon vyprodukovaný komponentami. V zimních měsících tak kolísá až na své minimum 22,4 kW.

4.5 Výpočet solárních zisků

Solární zisky jsou posledním vnějším vlivem zkoumaným pomocí softwaru TrnSYS. Z obrázku 23 na straně 55 vyplývá, že datové centrum je orientováno vstupní stranou ($2,5 \times 2,5$ m) na jih. Boční strany ($6 \times 2,5$ m) jsou tedy natočeny na východ a na západ. Pro jakékoliv jiné natočení by bylo nutno změnit příslušné parametry. Emisivita povrchu byla zvolena $\varepsilon = 0,6$.

Veškeré nastavení bylo použito z předchozí simulace. Cílem je zjistit, jakých hodnot budou nabývat solární zisky datového centra v průběhu roku. Postup je tedy obdobný jako při zjišťování výkonu. Nejdříve byl vykreslen graf zobrazující hodinové hodnoty výkonu, dopadajícího na celou vnější plochu kontejneru. Takový graf má ale pro každý den hodnoty v širokém rozmezí, není tedy možné z něj cokoli dedukovat. Bylo proto opět použito integrátoru a pracovalo se s průměrnými denními a měsíčními hodnotami. Výsledkem je tedy opět vyhodnocení do grafu (obr. 32), na ose y jsou hodnoty v [kW], které dopadaly na povrch kontejneru v průběhu daného dne. Tečkovaná čára představuje průměry pro jednotlivé dny z hodinových hodnot, tlustá spojitá čára je pro měsíční průměry z denních hodnot.



Obrázek 32: Solární zisky v průběhu roku

Z grafu by se mohlo zdát, že maximální solární zisk datového centra, dosahující průměrného maxima kolem 3,5 kW je zároveň výkonem, který je potřeba chladit a přičítá se tak k celkovému chladicímu výkonu. Tato úvaha je samozřejmě mylná. Solární energie, která dopadne na stěnu kontejneru se přemění na teplo, které zahřeje stěnu na vyšší teplotu. Většina tepla ovšem přejde konvekci do okolního vzduchu a jen část se dostane dovnitř datového centra. Důvodem je především kvalitní izolace mezi vnější a vnitřní stěnou.

4.6 Závěr simulace

Celou simulaci lze považovat za zdařilou. Povedlo se sestavit model datového centra v programu TrnBuild a úspěšně jej propojit s výpočtním programem TrnSys. Bylo sestaveno schéma, které poskytlo dostatek vstupních údajů a dokázalo vyprodukovat potřebná roční data.

Základním přínosem této simulace bylo zjištění velikosti tepelné zátěže prostupem tepla a radiací. Zjistilo se, že v letních měsících je potřeba dodatečného chlazení této zátěže, s čímž se musí počítat již při dimenzování chladicího systému. Naopak v zimních měsících je kontejner ochlazován a chladicí výkon není využit na 100 %.

Pokud má být řeč o konkrétních hodnotách, v létě je potřeba nadhodnotit chladicí výkon o 1 kW rezervu, aby byla udržena konstantní teplota datového centra na 20 °C během nejteplejších dní, kdy vnější teplota a solární zisky dosahují maxima. Nutno si také povšimnout faktu, že i během léta nedosahuje průměrný denní chladicí výkon plných -23 kW. Z toho plyne že i během letních nocí je datové centrum vnějším prostředím a vyzařováním ochlazováno.

V zimních měsících klesá potřebný chladicí výkon až na 22,3 kW, což se jednoznačně projeví v nákladech na provoz chladicího zařízení. Pokud by se datové centrum chovalo adiabaticky, tak by při tepelném výkonu 23 kW bylo potřeba z něj odvést 201,5 MWh (725 GJ) vyprodukovaného tepla ročně. Při simulaci bylo ale zjištěno, že celkové teplo, které bylo odvedeno chlazením, je rovno 198,2 MWh (714 GJ). Z toho plyne, že v průběhu celého roku by bylo při chlazení reálného kontejneru odvedeno o 1,6 % energie méně, než u teoretického, adiabaticky izolovaného kontejneru.

Při reálných podmínkách je sice v letních denních špičkách potřeba většího chladicího výkonu, než je výkon produkováný elektronickými zařízeními, ovšem z celoročního hlediska není nutno odvádět více energie, než by se vyprodukovalo v adiabaticky izolovaném kontejneru. Toto zjištění lze považovat za závěr celé simulace.

Závěr

Základním úkolem této práce bylo umístit datové centrum do přepravního kontejneru a navrhnout odpovídající chladicí systém. Tyto cíle byly splněny, do omezeného prostoru se povedlo umístit šest rackových skříní o celkové kapacitě 216U. To jsou dostatečné dispozice pro instalaci výpočetních serverů, datových úložišť i síťových rozhraní.

Pro chlazení datového centra bylo použito systému volného chlazení. To při venkovní teplotě nad 15 °C dodává chlad pomocí kompresorové jednotky, avšak pokud je teplota nižší než 5 °C, je chlad získáván přímo z venkovního prostředí. V rozmezí mezi těmito teplotami funguje chlazení ve smíšeném režimu, kombinuje tak oba principy. Tento způsob chlazení snižuje spotřebu elektrické energie pro provoz kompresoru, což se znatelně projeví na celoročních provozních nákladech. Jednotka volného chlazení je schopna za pomoci vhodných kanálových výměníků uchladit výkon až do 40 kW.

Kontejner byl projektován k provozu ve venkovním prostředí, bylo tedy nutno brát do úvahy klimatické a meteorologické vlivy. Těmi se zabývala simulace v programu TrnSYS, která zkoumala vliv venkovní teploty a solárního záření na teplotu uvnitř datového centra. Bylo zjištěno, že tyto vnější tepelné zisky nejsou zanedbatelné a bez příslušných opatření by zvyšovaly potřebný chladicí výkon. Proto bylo datové centrum opatřeno zevnitř silnou vrstvou izolace, která snížila tok tepla dovnitř kontejneru.

Druhá provedená simulace byla typu CFD a zkoumala rozložení rychlostních a teplotních polí uvnitř datového centra. Byl vytvořen komplexní model schopný popsat proudění tepla a hmoty pro libovolné varianty rozmístění hardwaru v rackových skříních. Nejdůležitějším poznatkem bylo, že pro co nejúčinnější chlazení je potřeba přesného směřování proudu chladného vzduchu přímo na komponenty s nejvyšším tepelným výkonem. Toho se dá dosáhnout nejlépe instalací speciálních směrovatelných výustek.

Práce obsahuje také praktickou část sestávající z experimentálního měření výkonů jednotlivých komponent obsažených v serveru. U elektronických zařízení je totiž všechna spotřebovaná elektrická energie disipována na odpadní teplo. Bylo zjištěno, že převážná většina tepla je produkována procesory, jedná se o stovky wattů. Zbýlé teplo vytváří zdroj, základová deka a pevné disky (desítky wattů). Paměti produkují teplo pouze v jednotkách wattů. Měření bylo provedeno jak pomocí wattmetru, kterým se měřil elektrický výkon komponent, tak pomocí kalorimetrické metody. Obě měření potvrdila podobnost reálné spotřeby komponent s hodnotami udávanými výrobcem.

Součástí práce jsou 3D modely a technické výkresy. Všechny základní aspekty pro umístění datového centra do přepravního kontejneru byly dostatečně rozebrány. Na základě této práce je možné zpracovat výrobní dokumentaci a takto provedené datové centrum realizovat.

Seznam použitých zdrojů

- [1] *PC Hardware Links* [online]. 1997. 2011 [cit. 2011-03-12]. Processor Electrical Specifications.
Dostupné z WWW: <<http://mysite.verizon.net/pchardwarelinks/elec.htm>>.
- [2] *FSP-Group* [online]. © 2011 [cit. 2011-03-02]. GHN / GHC (85).
Dostupné z WWW: <<http://www.fsp-group.com.tw/>>.
- [3] *HETHERINGTON, Owen*. GrabCAD [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. 20ft shipping container.
Dostupné z WWW: <<http://grabcad.com>>.
- [4] *A1CONTAINER* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. ISO-CONTAINERS.
Dostupné z WWW: <<http://www.a1container.com>>.
- [5] *STULZ* [online]. © 2011 [cit. 2011-03-20]. CyberCool Indoor Data Chiller.
Dostupné z WWW:
<<http://www.stulz.com/products/chillers/cybercool-indoor-data-chiller/>>.
- [6] *Wikipedia Unit* [online]. 2011 [cit. 2011-05-10]. Rack unit.
Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Rack_unit>.
- [7] *HP* [online]. 2011 [cit. 2011-04-10]. HP Rack 10000 G2.
Dostupné z WWW:
<http://h18004.www1.hp.com/products/quickspecs/12402_div/12402_div>.
- [8] *HP* [online]. 2011 [cit. 2011-04-04]. HP Images.
Dostupné z WWW: <<http://h30094.www3.hp.com/link.asp>>.
- [9] *Complete* [online]. 2011 [cit. 2011-04-23]. Volné chlazení.
Dostupné z WWW: <<http://www.completecz.cz/cz/volne-chlazení-free-cooling->>.
- [10] *STULZ* [online]. 2011 [cit. 2011-05-12]. Chillers.
Dostupné z WWW: <<http://www.stulz.com/products/chillers/>>.
- [11] *Sinclair* [online]. 2011 [cit. 2011-02-18]. Sortiment.
Dostupné z WWW: <<http://www.sinclair-klimatizace.cz/>>.
- [12] *APC* [online]. 2011 [cit. 2011-05-19]. Smart-UPS.
Dostupné z WWW:
<<http://www.apc.com/>>.
- [13] *Dieselové elektrocentrály* [online]. 2011 [cit. 2011-05-23]. Vrbka.
Dostupné z WWW:
<<http://www.strojnivybaveni.cz/elektrocentrally/dieselove-elektrocentrally-1f-a-3f/>>.

Seznam symbolů

c_v	měrná tepelná kapacita vody	$[\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
c_{vz}	měrná tepelná kapacita vzduchu	$[\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$
m	hmotnostní tok	$[\text{kgs}^{-1}]$
Q	tepelný tok	$[\text{W}]$
t	rozdíl teplot vody na vstupu a výstupu	$[\text{°C}]$
$\bar{t}$	střední teplota	$[\text{°C}]$
t_1	teplota vody na vstupu	$[\text{°C}]$
t_2	teplota vody na výstupu	$[\text{°C}]$
u_A	směrodatná odchylka měření	$[-]$
V	objemový tok	$[\text{m}^3\text{s}^{-1}]$
α_{se}	součinitel přestupu tepla na vnější straně stěny	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$
α_{si}	součinitel přestupu tepla na vnitřní straně stěny	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$
ε	emisivita povrchu	$[-]$
λ	součinitel tepelné vodivosti	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$
τ	časový úsek	$[\text{s}]$

Seznam příloh

Přiložené výkresy

- 1× Řez kontejnerem včetně izolace.
- 1× Řez datovým centrem osazeným komponentami.

Soubory na přiloženém CD

CFD Simulace v programu CCM+

- Model datového centra ve formátu *.PCD (pro program STAR-Design).
/CCM/Datové_Centrum.PCD
- Model datového centra ve formátu *.x_t (formát Parasolid).
/CCM/Datové_Centrum.x_t
- Uložená simulace ve formátu *.sim (pro program STAR-CCM+).
/CCM/Datové_Centrum.sim

Simulace tepelných zisků v programu TrnSYS

- Model datového centra pro program TrnBUILD.
/TrnSYS/Final.tpf
- Uložená simulace pro program TrnSYS.
/TrnSYS/Final.bui
- Meteorologická data.
/TrnSYS/Weather/CZ-Kucharovice-116980.tm2

Digitální záloha diplomové práce

- Soubor ve formátu *.pdf
/Diplomová_Práce.pdf

Seznam obrázků

Obrázek 1: Komponenty umístěné na serverové základové desce.....	14
Obrázek 2: Schéma zapojení pro měření výkonu disku.....	19
Obrázek 3: Výkony komponent (GT24, 2 × Opteron 268, 4GB, Raptor).....	21
Obrázek 4: Měření tepelného výkonu procesorů kalorimetricky.....	22
Obrázek 5: Schéma měření výkonu procesorů kalorimetricky.....	23
Obrázek 6: Kontejner použitý pro navrhované datové centrum [3].....	27
Obrázek 7: Umístění rackových skříní v 10' kontejneru.....	28
Obrázek 8: 1. návrh prostorového řešení kontejneru 20'.....	28
Obrázek 9: 2. návrh prostorového řešení kontejneru 20'.....	29
Obrázek 10: 3. návrh prostorového řešení kontejneru 20'.....	29
Obrázek 11: Řez zaizolovanou stěnou kontejneru.....	31
Obrázek 12: Racková skříň HP 10642 G2 [8].....	32
Obrázek 13: Závislost koeficientu EER na venkovní teplotě při volném chlazení [9].....	35
Obrázek 14: Jednotka volného chlazení CSI418GE firmy STULZ [10].....	36
Obrázek 15: Kanálová jednotka.....	37
Obrázek 16: Prostorové rozložení jednotlivých komponent.....	38
Obrázek 17: Pohled na geometrii datového centra v perspektivě.....	42
Obrázek 18: Popis jednotlivých oblastí v modelu datového centra.....	44
Obrázek 19: Systém popisování všech oblastí v datové místnosti.....	44
Obrázek 20: Objemová síť při Base Size rovné 0,05 m.....	46
Obrázek 21: Zjednodušená objemová síť použitá pro finální výpočet.....	47
Obrázek 22: Výsledné grafické zobrazení výpočtu.....	50
Obrázek 23: Nastavení materiálu a modelu.....	55
Obrázek 24: Výběr výstupních dat.....	55
Obrázek 25: Schéma propojení výpočetních objektů.....	56
Obrázek 26: Nastavení tepelného zisku 23 kW z elektronických zařízení.....	58
Obrázek 27: Nastavení chlazení datového centra.....	59
Obrázek 28: Teplota vnitřní a vnější stěny datového centra v průběhu roku.....	59
Obrázek 29: Průběh chladicího výkonu (max. 23 kW) a vnitřní teploty v průběhu roku 60	
Obrázek 30: Průběh chladicího výkonu (max. 24 kW) a vnitřní teploty v průběhu roku 61	
Obrázek 31: Zprůměrovaný chladicí výkon v průběhu roku.....	61
Obrázek 32: Solární zisky v průběhu roku.....	62

Seznam tabulek

Tabulka 1: Seznam použitých komponent.....	9
Tabulka 2: Měření spotřeby serveru v různých konfiguracích.....	10
Tabulka 3: Spotřeby procesorů při různých kombinacích.....	11
Tabulka 4: Měření spotřeby disku.....	13
Tabulka 5: Teploty na vstupu a výstupu měřicí aparatury.....	18
Tabulka 6: Rozměry přepravních kontejnerů základní řady.....	20
Tabulka 7: Katalog chladících zařízení pro volné chlazení firmy STULZ.....	30
Tabulka 8: Vlastnosti materiálů použitých v modelu.....	52