

Optimalizace spotřeby energie pro chlazení elektronických počítačových komponent

Radim Bednář

2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Radim Bednář**
Osobní číslo: **A18201**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Optimalizace spotřeby energie pro chlazení elektronických počítačových komponent**
Téma práce anglicky: **Optimization of energy consumption for cooling of electronic computer components**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární řešení týkající se přehřívání elektronických součástek, zejména procesorů a možností jejich chlazení.
2. V teoretické části práce se zaměřte na tepelnou bilanci zahřívané součástky za účelem optimalizace spotřeby energie.
3. Navrhněte regulační obvod pro chlazení procesoru.
4. Ověřte funkčnost navrženého řešení.
5. V diskuzi a závěru zhodnotte dosažené výsledky.

Rozsah bakalářské práce: –
Rozsah příloh: –
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 8073001454.
2. JURÁNEK, Antonín a Miroslav HRABOVSKÝ. EAGLE pro začátečníky: návrhový systém pro plošné spoje : uživatelská a referenční příručka. 2. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2007, 191 s. ISBN 9788073002138.
3. FUKÁTKO, Tomáš a Jaroslav FUKÁTKO. Teplo a chlazení v elektronice II. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 118 s. ISBN 8073001993.
4. ZHANG, Jingru. Cooling of Electronic System from Electronic Chips to Data Centers. New Brunswick, New Jersey, 2012. DISSERTATION. Graduate School-New Brunswick.
5. ARDUINO CORPORATION. Arduino [online]. 2020 [cit. 2020-09-16]. Available online from: <http://www.arduino.cc/>
6. MARGOLIS, Michael. Arduino Cookbook. Second edition. Sebastopol: O'Reilly, 2011, 699s. ISBN 9781449313876.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Dagmar Janáčová, CSc.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Petr Dostálek, Ph.D.**
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. srpna 2021**

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 15. ledna 2021

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor;
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 13. 8. 2021

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na chlazení počítačových komponent. Součástí teoretické části jsou proto možnosti způsobů chlazení počítačových součástí, teoretický popis sdílení tepla a možnosti automatického řízení transportu tepla zařízením. Praktická část obsahuje návrh regulačního obvodu pro chlazení, kde regulovanou veličinou byl objemový průtok chladicí kapaliny. Funkčnost navržené soustavy byla následně ověřena.

Klíčová slova:

Chlazení počítače, tepelná bilance, optimalizace spotřeby energie, regulační obvod, zařízení pro dopravu tekutin, Arduino

ABSTRACT IN ENGLISH

This bachelor thesis focuses on the cooling of computer components. Included in the theoretical section there are described options how we can cool computer parts, theoretical description of heat sharing and possibilities of automatic control of transporting heat through the device. Practical part contains design of a control circuit for cooling where controlled variable was volume flow of cooling fluid. Functionality of the proposed system was then verified.

Keywords:

Computer cooling, heat balance, optimization of energy consumption, control circuit, equipment for fluid transport, Arduino.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval své vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Dagmar Janáčové, CSc a Ing. Petru Dostálkovi, Ph.D. za trpělivost, ochotu a odborné vedení, které mi pomohly tuto práci zpracovat.

Motto: Carpe diem.

OBSAH

Úvod.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 Úvod do chlazení elektronických komponent	11
2 Vodní chlazení.....	14
3 Chlazení elektronických komponent	16
3.1 Základní deska	16
3.2 Procesor.....	17
3.3 Operační paměť.....	18
3.4 Grafická karta.....	19
3.5 Pevný disk	20
3.6 Zdroj.....	21
3.7 Sestavování počítače	22
4 Tepelná bilance zahřívání elektronických součástek.....	23
4.1 Vedení tepla (kondukce)	25
4.2 Vedení tepla vícevrstvou stěnou	27
4.3 Přestup tepla.....	28
4.4 Prostup tepla.....	28
4.5 Proudění (konvekce)	32
4.6 Sálání (radiace)	33
4.7 Kombinace proudění a sálání	34
5 Regulační obvod.....	36
5.1 Popis vlastností lineárních systémů	38
5.2 Regulátory a metody jejich nastavení	38
5.3 Popis vlastností ideálních P, I, D regulátorů	39
5.4 Metoda požadovaného modelu	41

6	Zařízení pro dopravu tekutin	43
6.1	Rotační stroje	43
6.2	Ventilátory	44
7	PWM řízení	46
8	Arduino.....	47
8.1	Vnější periferní obvody	48
II PRAKTICKÁ ČÁST		50
9	Testovací soustava.....	51
10	Návrh funkční testovací soustavy.....	53
11	Seznam použitých komponent a jejich technických parametrů.....	54
12	Zdůvodnění návrhu řešení dané soustavy.....	57
13	Tepelná bilance a stanovení součinitele prostupu tepla.....	58
13.1	Prostup tepla.....	58
13.2	Výměníky	61
14	Návrh programu testovací soustavy.....	66
Závěr		67
Seznam použité literatury.....		69
Seznam použitých symbolů		73
Seznam použitých zkratk		77
Seznam Obrázků		79
Seznam Tabulek.....		81
Seznam Příloh		82

ÚVOD

Ve své bakalářské práci jsem se zaměřil na odvod tepla z elektronických součástek pomocí vodního chlazení do vnějšího prostředí. V posledních letech stále dochází ke zdokonalování elektronických součástek, je čím dál častěji kladen důraz na zmenšování jednotlivých částí elektronických komponent. Výkon současných počítačů je výrazně odlišný od dřívějších a s tím souvisí i nároky na účinnější odvod tepla, aby nedošlo k jejich poškození. Každá elektronická komponenta je odlišně náročná na chlazení, a to souvisí se spotřebovanou energií při pracovní zátěži. Proto jsou pro každou komponentu předem definované nároky na chlazení, které je třeba zohlednit při sestavování počítače. Komponenty, které nemají dostatečné chlazení, se začnou více zahřívat, což může způsobit ztrátu výkonu nebo poškození. Cílem je navrhnout a realizovat chladicí systém, kde dochází ke stálé kontrole a optimalizaci spotřebované energie tak, aby zároveň byla elektronická komponenta optimálně chlazená na základě provedené tepelné bilance.

Práce je rozdělena do dvou bloků. První blok bude obsahovat teoretickou část, která je zaměřena na úvod do problematiky a pojednává o šíření tepla, poté se v tomto bloku zaměřuji na možnosti regulace, ventilátory, PWM řízení a programování regulačního obvodu.

Druhá část bude praktická a budu v ní řešit návrh chladicí soustavy a výpočty zaměřené na šíření tepla. V tomto bloku jsou i výpočty spojené s návrhem této soustavy. Součástí bloku je i ověření funkčnosti a fyzická realizace.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD DO CHLAZENÍ ELEKTRONICKÝCH KOMPONENT

Výpočetní technika se řadí k nejrychleji se rozvíjejícímu se odvětví. S narůstajícím výkonem počítačů se zvedají i nároky na chlazení elektronických komponent. Pro každou komponentu jsou předem definované nároky na chlazení, které je třeba zohlednit při sestavování počítače. Počítače mají v dnešní době rozsáhlá použití od kancelářské práce, složité grafické operace až po řízení technologických procesů v náročných podmínkách. Komponenty, které nejsou dostatečně chlazené, se začnou více zahřívat, což může způsobit ztrátu výkonu nebo poškození zařízení. Je mnoho způsobů, jak odvést teplo, můžeme k tomu použít pasivní nebo aktivní chlazení. Pasivní chlazení je založeno především na nezávislosti chladiče na spotřebě energie. Chlazení probíhá pouze pomocí média (tekutiny, vzduchu), které samovolně prochází chladičem a tím ho ochlazuje. Avšak u součástí, které vyzařují velké množství tepla, by velikost pasivního chladiče narůstala do nepřijatelných rozměrů. S rozměry narůstá pochopitelně i hmotnost celého chladiče, což je pro většinu počítačových komponent neúnosné a takové chladiče by se nevešly ani do samotné skříně počítače. Pro zvýšení účinnosti se používají aktivní chladiče, které jsou závislé na vnějším zdroji energie. Existuje mnoho druhů těchto chladičů. Nejvíce rozšířené jsou v dnešní době chladiče s ventilátorem.



Obrázek 1 - Ventilátor [17]

U kapalinového chlazení se používá médium na odvádění tepla z dané součástky. K chlazení se používá výměník tepla. Velkou výhodou je pak malá spotřeba místa na dané elektronické součástce. Toto chlazení je často i mnohem tišší. Přibývá ale také několik rizikových faktorů – čerpadlo, které může v průběhu času selhat, případně únik chladicí kapaliny, který může poškodit jakoukoli elektronickou součástku nebo část zařízení. Odvádět teplo lze i za pomoci Peltierova článku, který má ale značnou spotřebu elektrické energie a většinou stejně vyžaduje ještě dodatečné chlazení. Jedná se spíše o přepravník tepla než o samotný chladič. Průchodem elektrického proudu je odváděno z Peltierova článku teplo. U Peltierova článku můžeme dosáhnout i teplot pod bodem mrazu (což může vnést riziko kondenzace vody). Velkým rizikem u Peltierova článku je výpadek elektrického proudu, kdy dojde k okamžitému přerušení chlazení. Často se Peltierův článek doplňuje vodním chlazením. Tato sada se doporučuje při chlazení komponent, které vyzařují opravdu velké množství tepla.



Obrázek 2 - Peltierův článek [18]

Jedním z méně častých alternativních způsobů chlazení je ponoření všech počítačových komponent nebo počítače do kapaliny. Toto řešení ale přináší velké riziko, že se tekutina dostane do míst, kde může dojít ke zkratu. Samotné komponenty se musí často ošetřit lakem, aby nedošlo k jejich poškození. Chlazení ponořením počítačových komponent ale nemůžeme použít u klasického pevného disku, který se chladí nasávaným vzduchem. Při chlazení tímto způsobem používáme nevodivé kapaliny (destilovaná voda se nedá použít, protože se časem z elektrických komponent uvolňují minerály a kapalina se stává vodivou).

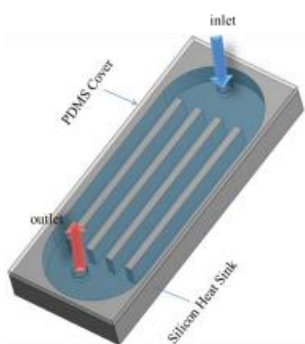
Pro extrémní chlazení se dá využít kompresorové chlazení. Kompresorem je plyn stlačen do kapalného skupenství a zchlazen ve výměníku. Výsledkem jsou teploty hluboko pod bodem mrazu. Nevýhod je ale mnoho – kondenzace vody v počítači, hlučnost, vysoké pořizovací a provozní náklady. Výhodou je ale opravdu velký chladicí výkon, který lze takto získat. Dalším extrémním chladicím systémem je využití suchého ledu nebo zkapalněných vzácných plynů (-79 °C), kapalného dusíku (-196 °C) nebo kapalného helia (-269 °C). Při chlazení používáme speciální chladicí sadu, která obsahuje chladicí komín, kam je přiváděna chladicí látka. Bohužel nevýhod je také celá řada. Od opravdu vysokých pořizovacích a provozních nákladů přes rizika spjatá s manipulací s nebezpečnou látkou až po samotné poškození počítače. Další překážkou použití extrémního chlazení je, že program BIOS je spustitelný nad teploty -60 °C. BIOS nepodporuje takto nízké teploty a musí se to obcházet. Pokud je teplota extrémně nízká, dochází i k zamrznutí samotných elektronických komponent (u některých procesorů je to právě teplota okolo -60 °C). Pokud tedy klesne nebo zakolísá zátěž dané elektronické komponenty, dojde díky extrémnímu chlazení k takovému poklesu teploty, že komponenta přestává fungovat. V neposlední řadě je zde riziko kondenzace tekutin a možnost zkratu.

Velkou výhodou dobrého chlazení je získání stability počítačového systému nebo možnost navýšení výkonu pomocí přetaktování dané elektronické komponenty. Pomocí přetaktování navýšíme pracovní frekvenci dané komponenty na nejvyšší možnou míru. Naopak u systémů, kde potřebujeme stabilitu systému, potřebujeme velké chladicí rezervy, aby nedošlo k výkyvu z požadovaných teplotních hodnot komponent.

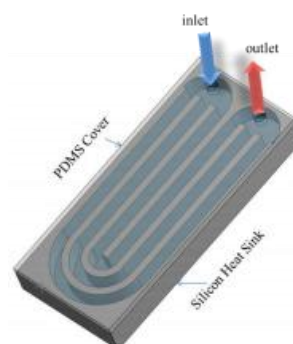
Těžko říci, kam bude směřovat budoucnost chlazení. Zatím ale stále platí, že narůstá počet tranzistorů a dalších elektronických součástek na jednotku plochy, a tím pádem je kladen čím dál větší důraz na chlazení. Možností použití je několik: Iontový vír, piezoelektrické vějíře nebo elektro dmychadlo. Stále jsou to ale technologie, kde probíhá vývoj a testování. A budoucnost ukáže, zda bude takové chlazení vhodné pro datová centra, servery nebo osobní počítače.

2 VODNÍ CHLAZENÍ

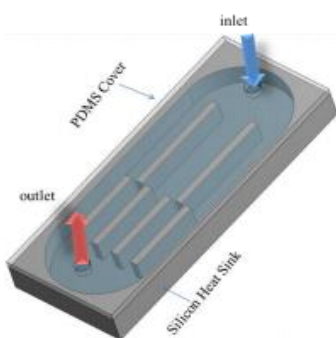
Hlavními parametry, které mohou nejvíce ovlivnit chlazení, jsou vodní bloky, tekutina, rychlost průtoku a chladič. Vodních bloků je na trhu velké množství, a proto se zkusím zaměřit na jeden celoměděný a druhý z hliníku s chromovou povrchovou úpravou. Důležité prvky vodního bloku jsou jak materiál, tak i vlastní konstrukce, kdy nejčastěji rozhoduje vnitřní teplosměnná plocha výměníku. Čím větší plocha tím intenzivněji výměník teplo odvede. Zde přikládám několik obrázků vnitřního zpracování těchto výměníků [6].



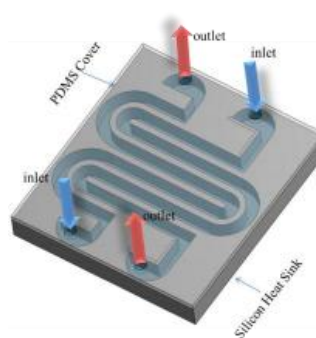
Obrázek 3 - Rovný kanál [6]



Obrázek 5 - Tvarový U kanál [6]



Obrázek 4 -Tvarový Y kanál [6]



Obrázek 6 - Točený kanál [6]

Pro přilnutí výměníku k elektronické součástce se používá tepelně vodivá pasta. Hlavním parametrem této pasty je schopnost vést teplo. Použité materiály mohou být silikonové, keramické nebo kovové. Nejhorší pasty mají tepelnou vodivost od 0,82W/(mK). Vyvážený střed je okolo 4-5 W/(mK) a nejlepší pasty pak až 13,4 W/(mK). Důležité je, aby byla pasta rovnoměrně nanesená a neobsahovala malé vzduchové bubliny, které pak snižují efektivitu přenosu tepla. Při použití pasty je nutné si dávat pozor na ideální pracovní podmínky, kdy většina past je účinná při teplotě od 0–45 °C a jen málokteré v rozmezí -40 až 150 °C. Výrobci doporučují výměnu pasty do dvou let od instalace z důvodu poklesu účinnosti předávání tepla.

U vodního chlazení může být při velkém objemu kapaliny a chladiče pouze pasivní chladič, u kterého je výrazně nižší hlučnost zařízení a spotřeba elektrické energie. Při náročnějších sestavách se používá aktivní chladič s ventilátory. Hlučnost zde může dosáhnout až do 30 dB. Regulace často probíhá pouze aktivací jednotlivých ventilátorů v režimu malých, středních a maximálních otáček. Čerpadlo, které je při spuštění počítače spuštěno na maximální výkon, se pak často obejde bez jakékoli regulace. I zde platí, že s časem narůstá opotřebení a ventilátory nebo čerpadlo je vhodné vyměnit v horizontu dvou let. Určitě se nevyplatí čekat, až se chlazená součástka poškodí. V případě vodního čerpadla by došlo k přehřátí a spálení elektronické součástky takřka okamžitě poté, co by přestalo fungovat. Chladicí kapalina se často používá v kombinaci s destilovanou vodou nebo lihem. U destilované vody jsou výhodou nízká vodivost a pořizovací cena. U kapalin na bázi lihu je výhodou, že jsou funkční v rozmezí -20 až 120 °C a s vyšší teplotou narůstá chladicí účinnosti. Nevýhodou je, že se kapalina odpařuje a musí se doplňovat. Častou nevýhodou vodního chlazení je jeho účinnost jen do teploty, která je v okolí chladiče. Pokud tedy není prostředí klimatizováno na nějakou nižší teplotu, může v létě klesnout efektivita chlazení. Stejný problém je i u vzduchem chlazených chladicích systémů [2].

3 CHLAZENÍ ELEKTRONICKÝCH KOMPONENT

Životnost a funkčnost elektronických komponent v počítači je závislá především na teplotě a efektivitě přenosu tepla. Tato efektivita je ovlivněna materiálem chladiče, montáží chladiče a dané komponenty a čistotě komponent. Pokud zajistíme lepší chladicí podmínky, narůstá nám tím životnost všech komponent v počítači. Proto doporučuji, aby jednou za čas byla provedena údržba počítače a chladicí soustavy. Postupně se zaměřím ve své práci na všechny elektronické komponenty v počítači a na problematiku jejich zahřívání.

3.1 Základní deska

Jedná se o komponentu s největší plochou. Málodky je chlazena jinak než pasivně, dost často není ani osazena žádným chladičem a postačuje na chlazení jen vzduch, který se pohybuje díky chladičům od ostatních komponent v počítači. Nejvíce tepla je u základní desky tvořeno severním a jižním můstkem a napájecími obvody procesoru. V některých případech má základní deska integrovány heatpipe trubičky s vývody do pasivního chladiče. V extrémních případech se využívá vodního chlazení severního můstku.



Obrázek 7 - Základní deska MEG Z590 UNIFY [13]

3.2 Procesor

Jedná se o velmi složitý integrovaný obvod, který obsahuje miliony tranzistorů. Procesor řídí činnost celého počítače a jeho rychlost se udává v Hz. V dnešní době se nejčastěji setkáváme s více jádrovými procesory, u kterých je velmi důležitá jejich součinnost. Čím více jsou procesor a jeho jádra zatěžována, tím více tepla se produkuje. U prvních počítačů, které neměly výkon tak velký, stačil na chlazení mnohdy pasivní chladič. Postupně se ale s navyšujícím se výkonem přecházelo ke vzduchem chlazeným chladičům. V poslední době se ale čím dál častěji objevuje vodní chlazení nebo jiné alternativy chlazení. Účel je prostý, zajištění co nejvyššího výkonu elektronické komponenty nebo jiných uživatelských požadavků (nízká hlučnost, nižší výdaje spojené s chlazením nebo spolehlivost). Výrobce Intel udává, že současné procesory dosahují tepelného výkonu okolo 100 W a s turbo boostem až 150 W [11]. Někdy je tento údaj vztažen ale na jedno jádro procesoru a je vhodné počítat i s větším výkonem. Často je TDP (Thermal Design Power - nejvyšší možný tepelný výkon) u procesorů Intel i 250 W, což už je pro uchlazení součástky s tak malou plochou nelehký úkol. U procesorů AMD je to podobné, výrobce udává TDP okolo 110 W, ale ve skutečnosti je TDP okolo 180 W. Proto při návrhu chladicí soustavy je lepší počítat s mnohem větším TDP, než udává výrobce [27].



Obrázek 8 - 3rd Gen Intel® Xeon® Scalable Processors [11]

Pokud reálné TDP nezohledníme při návrhu a montáži chladičů, nedojde k zničení procesoru, ale je velmi pravděpodobné, že bude docházet k automatickému snižování jeho výkonu v závislosti na teplotě jádra nebo jader. Při velkém podhodnocení výkonu procesoru s málo výkonným chladičem bude docházet k vypínání počítače v závislosti na přehřátí procesoru. Důležitá je ze stejného důvodu i volba vhodné teplovodivé pasty k zabezpečení intenzivního přenosu tepla z procesoru do chladiče.

3.3 Operační paměť

U většiny operačních pamětí je doporučován žádný nebo pasivní chladič. Většinou postačuje pro ochlazení cirkulace vzduchu v počítači. Při přetaktování nebo při požadavcích na velký výkon můžeme operační paměť osadit vodními bloky. Velkou nevýhodou je málo prostoru, tím narůstá obtížnost instalace vodního bloku a teplovodivé pasty.



Obrázek 9 - Operační paměť Kingston FURY Beast DDR3 [14]

3.4 Grafická karta

Jednoduché grafické karty mohou mít pouze pasivní chladič, který postačuje k uchlazení. Grafické karty, u kterých je kladen důraz na výkon, je uchlazení složitější problém. *Velice často bývají osazeny velkým aktivním chladičem a u některých se doporučuje tekutinové chlazení. Spotřeba při velké zátěži může dosáhnout až 400 W. Samotná grafická karta pracuje až do 80 °C, při překročení teploty 100 °C již dochází k poškození [24].* Samozřejmě při vyšších teplotách má chladič vyšší efektivitu. Stále musíte zajistit, aby bylo teplo nejen odvedeno z grafické karty, ale i ze samotného počítače. Pokud nezajistíte dobrý odvod tepla z počítače, teplo v něm začne narůstat a snižuje se efektivita chlazení nejen grafické karty ale všech zbývajících komponent. Další nevýhodou je hlučnost chlazení. V případě vodního chlazení doporučuji, aby nebyla grafická karta sériově zapojena s dalšími komponentami a byla chlazena vlastním chladicím obvodem. Narůstají sice vstupní náklady, ale pokud bude grafická karta jako první v chladicím obvodu, teplo z ní bude přímo ovlivňovat účinnost chlazení zbývajících komponent. Pokud je grafická karta až poslední v chladicím obvodu, je naopak kapalina na vstupu již zahřátá od jiných komponent a klesá tím účinnost chlazení. Hlavní výhodou chlazení grafických karet je ve velikosti, plocha chlazených čipů je větší než u procesoru. Zde se může vyplatit použití tekutého kovu místo teplovodivé pasty, ale tím narůstá riziko elektrické vodivosti kovu a tím pádem stoupá riziko zkratu.



Obrázek 10 - GEFORCE GTX 1080 Ti [12]

3.5 Pevný disk

U pevného disku se moc často s chlazením neseťkáme, i když se jedná o velice důležitou část počítače, na které jsou uložena veškerá uživatelská data. Dříve rozšířené mechanické disky využívají chlazení vzduchem. V jedné části tohoto disku je malý otvor s filtrem, kudy vstupuje vzduch dovnitř. Tyto disky občas využívají speciální nástavce s ventilátorem, které je chladí. V extrémních případech se používají vodní bloky. Jejich velkou výhodou je, že neprodukují mnoho tepla. Tyto disky jsou velice náchylné na teploty. Minimální teplota bývá okolo 5 °C a optimální 25 - 40 °C. Maximální teplota, kterou by neměly překročit je 60 °C. U novějších SSD disků je rozsah teplot větší. Výrobci uvádějí 0 - 70 °C. Samotný disk nemá žádné chlazení.



Obrázek 11 - SSD disk [15]

3.6 Zdroj

Počítačový zdroj pracuje s napětím 230 V a mění ho na 12 V nebo 5 V. Díky tomu se hodně zahřívá a řadí se mezi náročnější komponenty na chlazení. Už od výrobce je dodán s integrovaným regulovatelným ventilátorem. U zdroje je nevýhoda již v samotném jeho umístění. Velmi často ventilátor nasává vzduch z vnitřního prostředí a zahřátý vzduch potom putuje z počítače. *Pokud ale využíváme vodní chlazení procesoru a grafické karty, může se jednat o jediný pasivní zdroj vzduchu v celém počítači. Při navrhování počítače rozhodně doporučuji spočítat potřebný výkon zdroje a přidat k němu 50 - 100 W navíc [27].*

V případě, kdy plánujete do budoucna upgrade počítače, doporučuji větší rezervu ve výkonu zdroje. Nadměrné vytížení zdroje snižuje jeho životnost. Dražší zdroje umožňují fyzické odpojení nepotřebných kabelů, díky čemuž nedojde ke zbytečnému ovlivňování proudění vzduchu. Někdy do skříně počítače dáme pro urychlení proudění vzduchu ještě dodatečný ventilátor, který vyhání vzduch ven. Neméně důležité je i zamezení vstupu prachu do samotného počítače. Čím více prachu je usazeno na komponentách, tím hůře je z nich odváděno teplo pryč. Díky tomu narůstá i potřeba častějšího čištění vnitřních prostor počítače. Zabránit prachu, aby vstupoval dovnitř, můžeme pomocí různých filtrů. To nám snižuje účinnost ventilátorů, které pak musí překonat narůstající odpor, který utváří filtry.



Obrázek 12 - Počítačový zdroj [16]

3.7 Sestavování počítače

Chlazení počítačů je v dnešní době u počítačů standardem. V případě že pořizujeme počítač sestavený, je chladicí systém již součástí pořizované sestavy. Pokud se rozhodneme sestavit si počítač sami, máme již velký výběr z nabízených variant chladičů. Proces sestavování počítače je z pohledu dobrého chlazení složitý proces. Nemůžeme brát v potaz pouze nároky jednotlivých komponent, ale všech součástí v počítačovém prostoru. Bereme v potaz směr vzduchu a překážky, které se mu dostávají do cesty (kabely apod.). Mnohdy je rozhodujícím elementem i spotřeba elektrické energie a hluchnost. Při navrhování vlastního chlazení je třeba u všech elektronických komponent udělat návrh tepelné bilance. Ve své práci se zaměřuji na sálání, prostup a vedení tepla. U samotných elektronických komponent dochází k sálání. Při nanesení teplovodivé pasty a osazení vodním blokem se jedná o prostup tepla jednotlivými vrstvami. U všeho je třeba vyhodnotit, jak dobře daný materiál vede teplo.

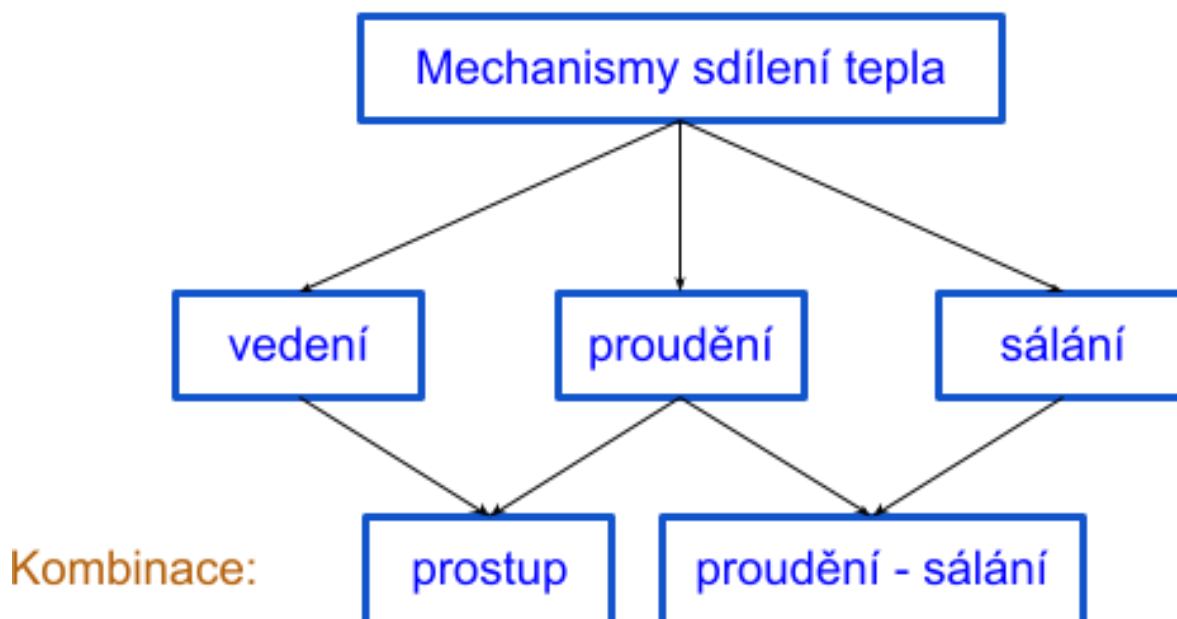


Obrázek 13 - Průchod vzduchu počítačem

4 TEPELNÁ BILANCE ZAHŘÍVANÝCH ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK

Teplo je druh energie. Je to termodynamická veličina vyjadřující míru změny vnitřní energie. Uvažujme dvě tělesa o rozdílných teplotách, pak budeme časem moci pozorovat, jak se teplejší těleso začne postupně ochlazovat, a naopak chladnější těleso se bude ohřívat. Sdílení tepla se bude dít tak dlouho, než se teploty těles vyrovnají. Transport tepla není zcela jednoduché popsat. Jiný mechanismus platí při transportu tepla v tuhých látkách. Jedná se o sdílení tepla vedením [19].

Tepelná vodivost je schopnost daného materiálu vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné strany materiálu do chladnějších částí. Tepelná vodivost daného materiálu je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti. Jedná se o měrnou tepelnou vodivost materiálu.



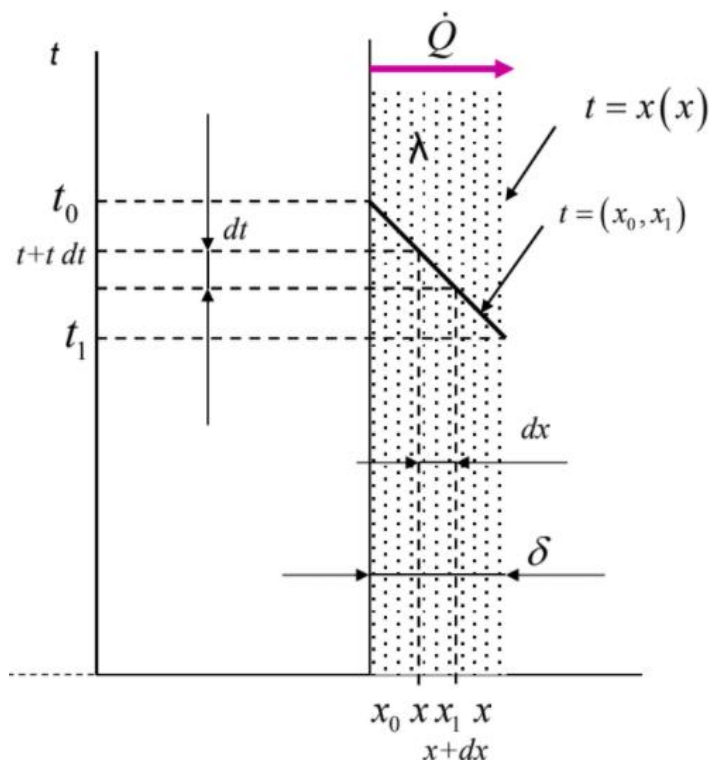
Obrázek 14 - Mechanismy sdílení tepla [25]

Důležitým parametrem je i počet vrstev různých materiálů o rozdílném součiniteli tepelné vodivosti. Čím je hodnota součinitele tepelné vodivosti nižší, tím každá vrstva materiálu zhoršuje proces chlazení. U procesorů se setkáme s mnoha vrstvami už od výrobce, na křemíkové destičce procesoru je litograficky nanášeno mnoho milionů tranzistorů. Tyto tranzistory se při práci zahřívají a pomocí teplovodivé pasty je toto teplo odvedeno na kovový kryt procesoru. Na tento kryt při montáži nanášíme teplovodivou pastu a následně připevníme chladič nebo vodní blok.

Jiný mechanismus platí, když se jedná o transport tepla z povrchu součástky do okolního prostředí. Při vysokých teplotách je část tepelné energie z procesoru vyzářena do okolí ve formě elektromagnetického záření. Při nižších teplotách povrchu je tepelná energie předána přestupem (prouděním) od okolní proudící tekutiny. Lze říci, že transport tepla zářením a přestupem probíhá současně a zpravidla se řeší kombinace těchto dvou mechanismů [29].

4.1 Vedení tepla (kondukcce)

Vlivem tepla dochází k pohybu částic. Čím více je těleso zahřáté, tak má více vnitřní energie. Následně díky tomu částice více kmitají. Při kmitání nastává předávání kinetické energie mezi molekulami a elektrony vlivem teplotních rozdílů. Rychlost vedení tepla určuje velikost tepelné vodivosti. Součinitel tepelné vodivosti umožňuje porovnat látky podle tepelné vodivosti.



Obrázek 15 - Rozdělení teploty t napříč deskou [25]

Vedení tepla je tedy způsob šíření tepla v tuhých tělesech. Na těleso působí z jedné strany vyšší teplota, než která působí z druhé strany. Toto teplo se šíří postupně tělesem až do vzájemného vyrovnání teplot. Tepelný tok je teplo procházející plochou za určitý čas, je určen Fourierovým zákonem. Na **Obrázek 15 - Rozdělení teploty t napříč deskou** [25] působí na těleso z levé strany vyšší teplota, než je na pravé straně. Můžeme sledovat průběh postupného vyrovnávání teplot v materiálu. Pro výpočet je nezbytné znát teplotní rozdíly, součinitel teplotní vodivosti, teplosměnnou plochu a její šířku.

Fourierův zákon vedení tepla

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dx} dA \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \lambda \cdot A \cdot \frac{t_0 - t_1}{\delta} \quad (2)$$

Intenzita toku tepla

$$q = \frac{d\dot{Q}}{dA} \quad (3)$$

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (4)$$

Po integraci pro desku platí

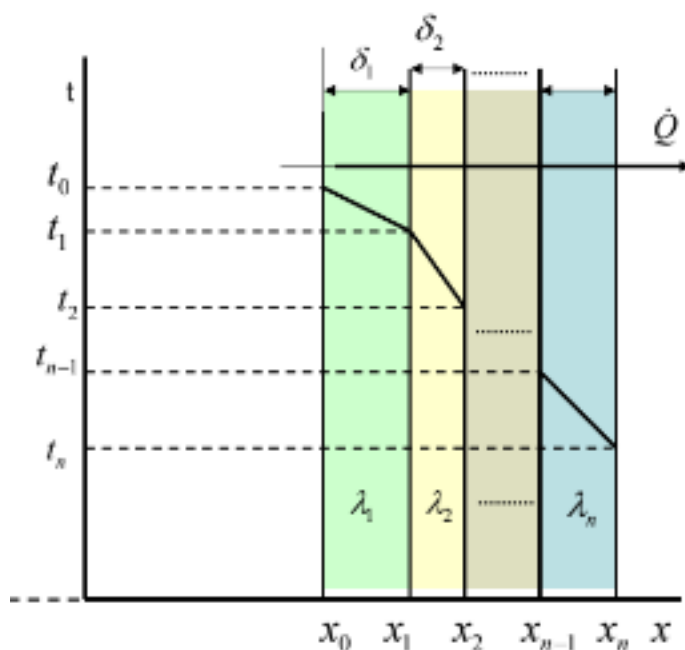
$$\dot{Q} = \lambda \cdot \frac{t_0 - t_1}{\delta} A \quad (5)$$

A – teplosměnná plocha [m^2]; λ – součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

\dot{Q} – tepelný tok [W]; t – teplota [$^{\circ}\text{C}$]; q – hustota tepelného toku [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

4.2 Vedení tepla vícevrstvou stěnou

Probíhá podobně jako u vedení tepla jednou vrstvou. Rozdíl je v tom, že teplo z jedné strany postupně prochází více vrstvami. Teplota se postupně v těchto vrstvách vyrovnává. Velkou roli hrají tepelné odpory. Tyto odpory určují míru odporu proti průniku tepla. Čím větší je tento odpor, tím pomaleji teplo prochází. U budov a izolací je žádáno, aby tento odpor byl co největší. U chlazení procesoru je ale požadováno, aby byl tento odpor co nejmenší a teplo co nejlépe pronikalo do výměníku tepla, odkud bude následně odvedeno.



Obrázek 16 - Rozdělení teploty t napříč deskou [25]

Vedení tepla jednotlivými vrstvami

$$\dot{Q} = \lambda_1 \cdot A \cdot \frac{t_0 - t_1}{q_1} \quad (6)$$

$$\dot{Q} = \lambda_2 \cdot A \cdot \frac{t_1 - t_2}{q_2} \quad (7)$$

$$\dot{Q} = \lambda_n \cdot A \cdot \frac{t_{n-1} - t_n}{q_n} \quad (8)$$

Vedení tepla vícevrstvou stěnou

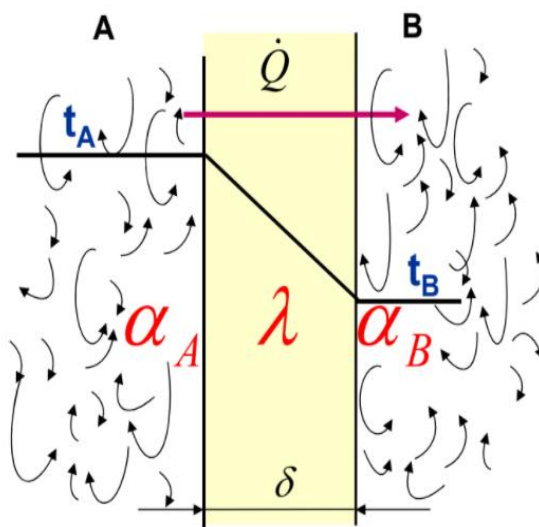
$$\dot{Q} = A \cdot \frac{t_0 - t_n}{\sum_{j=1}^n \frac{q_j}{\lambda_j}} \quad (9)$$

4.3 Přestup tepla

Je fyzikální jev, při kterém dochází na rozhraní dvou látek s různou teplotou k přenosu tepla z jedné látky do druhé. Jedná se o zvláštní případ vedení tepla. Může nastat s fázovou přeměnou nebo bez fázové přeměny. Při fázovém přechodu se vždy mění makroskopické vlastnosti látky (hustota, tepelná vodivost nebo měrná tepelná kapacita). V některých podmínkách mohou existovat současně dvě až tři fáze. V případě vody může dojít k odpařování i tání, i když je zmrzlá. K přestupu tepla může dojít volným prouděním nebo nuceným prouděním. Pokud je pohyb tekutiny vyvolán pouze rozdíly v hustotě látky, vyvolanými různou teplotou, hovoříme o volném proudění. Pokud je ale příčinou pohybu rozdíl tlaků vytvořený uměle (čerpadlo nebo ventilátor), hovoříme o nuceném proudění. U přestupu tepla bez látkové přeměny je mezi dvěma látkami materiál, který rozděluje tekutiny. Pokud prochází tepelný tok určitou překážkou, hovoříme o prostupu tepla.

4.4 Prostup tepla

Jedná se o kombinaci vedení a proudění tepla. Sdílení tepla mezi dvěma tekutinami přes pevnou přepážku, kdy nedochází k vzájemnému mísení tekutin. Prostup tepla lze považovat za posloupnost jednotlivých přestupů. Na rozhraní kapaliny a pevné látky se utváří tzv. mezní vrstva, ve které dochází ke změně teploty (tepelný tok). I zde musí teplo procházet různými tepelnými odpory (prouděním a vedením).



Obrázek 17 - Prostup tepla [25]

Prostup tepla – deskou

$$\dot{Q} = k(t_A - t_B)A \quad (10)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_A} + \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B} \quad (11)$$

Prostup tepla – válcem

$$\dot{Q} = k_L(t_A - t_B)L \quad (12)$$

$$\frac{\pi}{k_L} = \frac{1}{\alpha_A d_A} + \sum_{j=1}^n \frac{\ln \frac{d_{j+1}}{d_j}}{2\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_B d_B} \quad (13)$$

Sdílení tepla mezi povrchem a prostředím z místa o vyšší teplotě do prostoru s nižší teplotou. Samovolné proudění okolo povrchu tělesa, kdy zahřátá plynná látka samovolně stoupá vzhůru. Ve srovnání s vedením tepla může být sdílení tepla prouděním efektivnější.

V této práci se zabývám prostupem tepla z teplovodivé pasty do chladicí kapaliny oddělené stěnou vodního bloku. Ohřátá kapalina postupuje do vnějšího výměníku tepla, kde je voda ochlazována proudem vzduchu vnějšího okolí nebo sáláním v chladicí věži.

Výměníky tepla máme protiproudé, souproudé nebo křížový tok. (fotka z prezentace?).

Logaritmický střed rozdílů teplot u výměníku

$$\Delta t_1 = (t'_1 - t''_1) \quad (14)$$

$$\Delta t_2 = (t'_2 - t''_2) \quad (15)$$

$$\Delta t_{ls} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (16)$$

Prostup tepla

$$\dot{Q} = m' c_p' (t_1' - t_2') \quad (17)$$

$$\dot{Q} = m'' c_p'' (t_1'' - t_2'') \quad (18)$$

$$\dot{Q} = k A \Delta t_{ls} = V' \rho' c_p' (t_1' - t_2') \quad (19)$$

$$A = \frac{V' \rho' c_p' (t_1' - t_2')}{k \Delta t_{ls}} \quad (20)$$

$$\dot{Q} = k_L A \Delta t_{ls} \quad (21)$$

t' – teplejší tekutina; t'' – chladnější tekutina; ;

k – intenzita přenosu tepla daný m prostředím

K výpočtu součinitele prostupu tepla prouděním se používají bezrozměrná podobnostní čísla.

Reynoldsovo kritérium (Re) dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu. Používá se pro určení, zda je proudění tekutiny laminární nebo turbulentní.

$$Re = \frac{v \cdot l}{\nu} = \frac{v \cdot l \cdot \rho}{\eta} \quad (22)$$

ν – kinematická viskozita; v – charakteristická rychlost proudění kapaliny

l – charakteristický rozměr; η – dynamická viskozita

Prandtlovo kritérium (Pr) vyjadřuje míru podobnosti mezi rychlostním a teplotním polem.

$$Pr_w = c_p \frac{\eta}{\lambda} \quad (23)$$

Grashofovo kritérium (Gr) vyjadřuje podobnost vztahových a třecích sil při volném proudění, které vzniká pouze v důsledku rozdílu hustot.

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3}{\nu^2} \Delta t \quad (24)$$

g – gravitační zrychlení, β – součinitel objemové roztažnosti

Nusseltovo kritérium (Nu) je poměr konvektivního a konduktivního přenosu tepla na uvažovanou hranici tekutiny. Oblast přenosu tepla se stanovuje na vnějším povrchu tekutiny.

Přestup tepla při volném proudění bez fázové přeměny

$$Nu = C(Gr Pr)^n \quad (25)$$

Při laminárním proudění s $Re = 2,3 \cdot 10^3$

$$Nu = 0,17 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (26)$$

Turbulentní a přechodová oblast ($2,3 \cdot 10^3 Re 2 \cdot 10^6$)

$$Nu = 0,116(Re^{2/3} - 125) Pr^{1/3} \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{2/3} \right] \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14} \quad (27)$$

Turbulentní proudění $Re > 10^4$

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (28)$$

Pro součinitel přestupu tepla využijeme rovnici

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{l} \quad (29)$$

Intenzitu přenosu tepla daným prostředím při prostupu tepla pro rovinnou desku

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{n=1}^i \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (30)$$

Intenzitu přenosu tepla daným prostředím při prostupu tepla pro válcovou desku

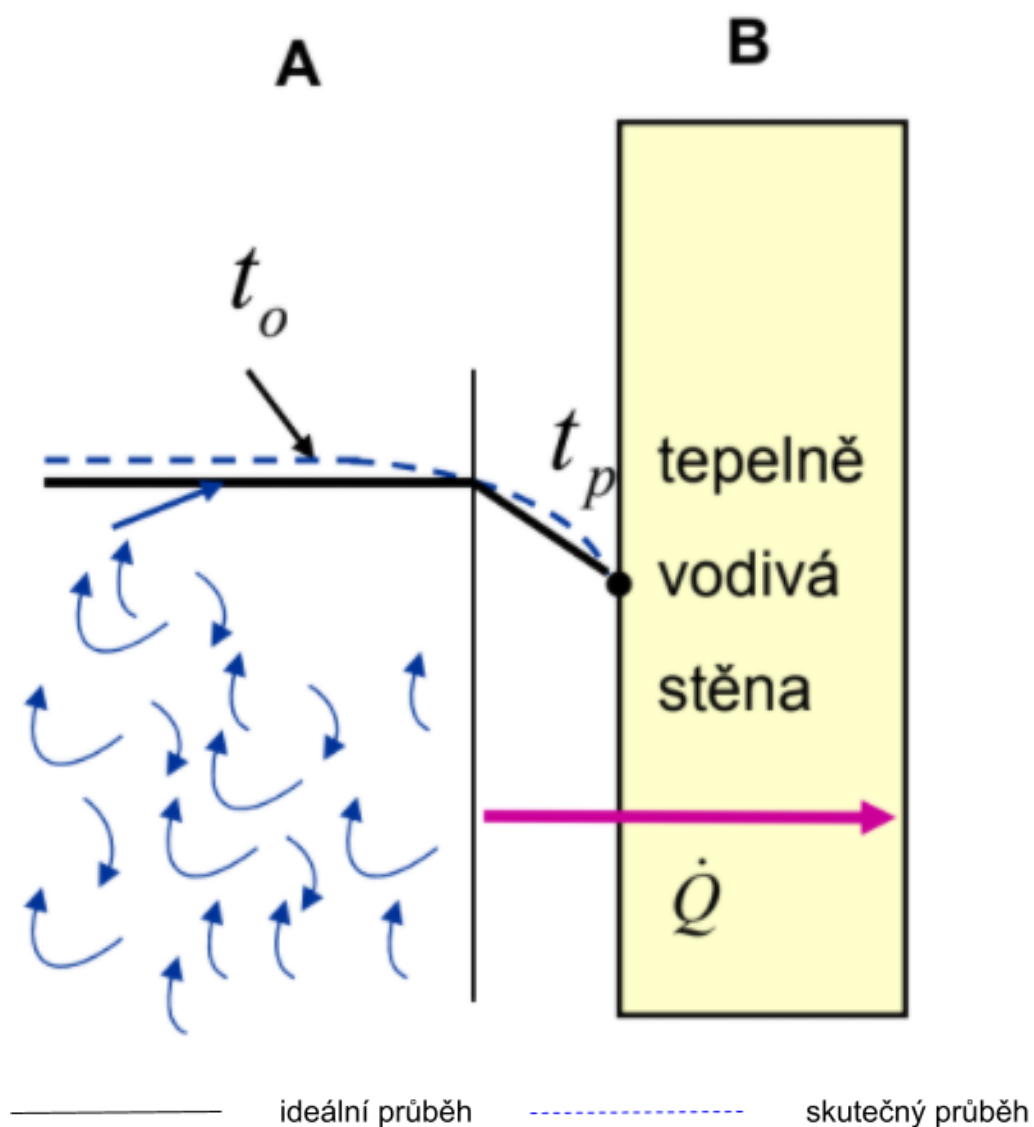
$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \sum_{n=1}^i \ln \left(\frac{r_{n+1}}{r_n} \right) \frac{1}{\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_2 r_{n+1}}} \quad (31)$$

Měrný tepelný tok

$$q = k \Delta t \quad (32)$$

4.5 Proudění (konvekce)

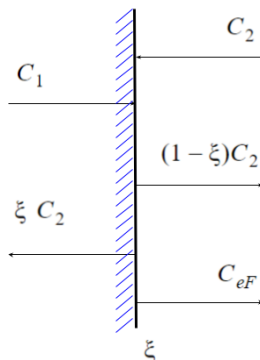
Jedná se o jeden ze způsobů tepelné výměny (kombinace prostupu a sálání). Proudění se neděje u pevných látek ale pouze u kapalin a plynů. Teplo je odváděno pryč od zdroje tepla pomocí chladicího média do místa chlazení. Samovolným prouděním tepla dochází k ohřevu prostředí, kdy zahřáté médium samovolně stoupá pryč od zahřáté součástky. Sdílení tepla je mezi povrchem a prostředím z místa o vyšší teplotě na místo s nižší teplotou.



Obrázek 18 - Tepelně vodivá stěna [25]

4.6 Sálání (radiace)

Teplo je ze součástky vyzařováno do okolí ve formě elektromagnetického záření. Tento proces se může dít i bez přenosu látkovým prostředím (ve vakuu). Závislost vyzářeného tepla závisí na teplotě povrchu součástky. Vznik tepelného záření z tepelné energie označujeme pojmem emise, přeměnu záření v tepelnou energii pak pojmem absorpce. Tento děj nastává od okamžiku, kdy je teplota vyšší než absolutní nula.



Obrázek 19 - Sálavost tělesa [20]

Množství energie, které vysílá povrchová část tělesa v časovém úseku, nazýváme sálavost tělesa a je označena C .

$$C = M_e \left(\frac{T}{100} \right)^{-4} \quad (33)$$

M_e – je intenzita vyzařování [Wm^{-2}], T – teplota zdroje záření [K]

Na povrchu tělesa může dojít k nerovnoměrnému rozložení energie, takže plošnou hustotu zářivého toku dopadajícího na ozářenou plochu označujeme jako intenzitu záření.

$$E = \frac{dQ}{dA} \quad (34)$$

Pokud je C_1 sálavost tělesa, znamená to, že těleso vysílá C_1 vlastní sálavé teplo, které je úplně určeno teplotou a fyzikální vlastností tepla. Současně dopadá na toto těleso množství energie C_2 od jiných těles, což je dopadající sálavé teplo. Část tohoto tepla ξC_2 těleso pohlcuje a zbytek $(1 - \xi)C_2$ odráží. Součet vlastního tepla a odraženého sálavého tepla se nazývá efektivní sálavost tělesa $C_{ef} = C_1 + (1 - \xi)C_2$ je skutečné množství tepla, jež těleso vysílá. Toto teplo je větší než vlastní sálavost o hodnotu: $(1 - \xi)C_2$ [20].

Dále se v mé práci zabývám tím, jak je chladicí kapalina přiváděna do chladicí věže, odkud teplo samovolně sálá do vnějšího prostředí.

4.7 Kombinace proudění a sálání

Můžeme říci, že šíření tepla prouděním je téměř vždy spojeno s šířením tepla vedením. Přenos tepla zářením spočívá ve vysílání záření a jeho následném pohlcování. To vede ke zvýšení vnitřní energie v látce, která záření pohlcuje. Při tomto přenosu závisí především na povrchu, materiálu a barvě.

Při vyzařování předmětu platí

$$P_r = \delta \epsilon S T^4 \quad (35)$$

P_r – výkon vyzařujícího předmětu [W]; S – obsah plochy [m^2];

T – teplota předmětu v kelvinech [K]; ϵ – označuje emisivitu předmětu

Stefanova – Boltzmannova konstanta [5, 6710 – 8W/m²K⁴]

Při pohlcování předmětu platí

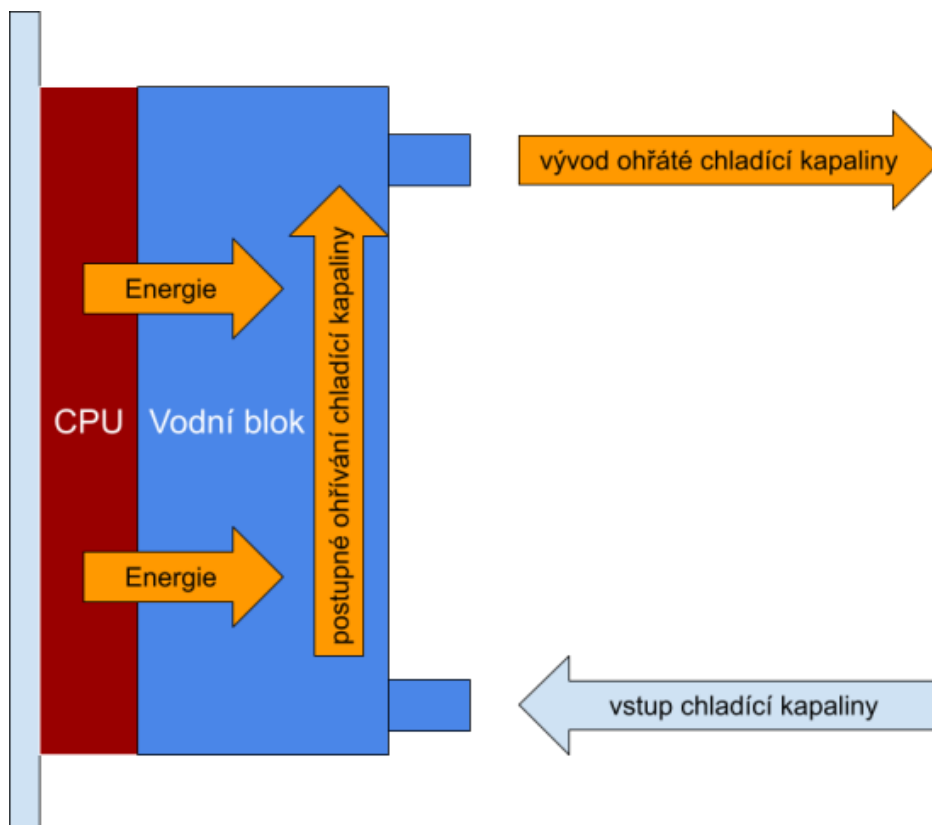
$$P_a = \delta \epsilon S T_0^4 \quad (36)$$

T_0 – přijímaná teplota od jiného předmětu; ϵ – označuje odraz záření tělesa

V reálných situacích předmět vyzařuje energii a současně ji i přijímá z okolí. Pak platí vztah

$$P = P_r - P_a = \delta \epsilon S (T^4 - T_0^4) \quad (37)$$

V mém případě procesor emituje energii. Deska vodního bloku tuto energii z velké části pojme a část odrazí zpět do procesoru. Ve vodním bloku se naakumulovaná energie přenáší do kapaliny. Kapalina odvádí pryč energii.



Obrázek 20 - Proudění a sálání

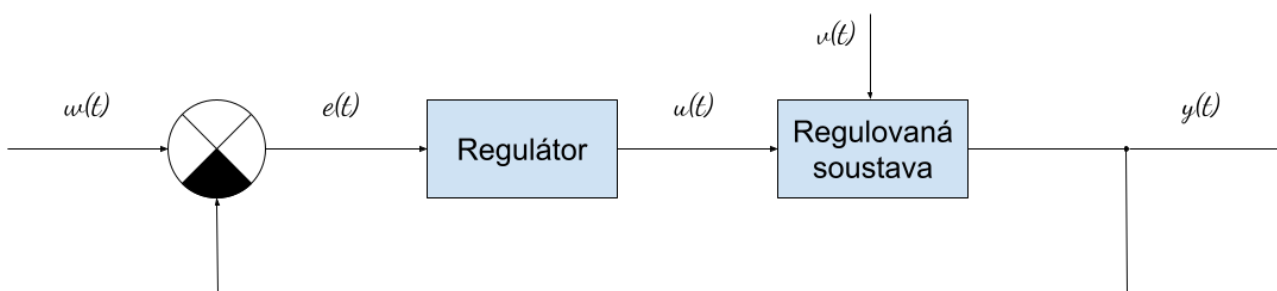
Je důležité na celou problematiku nahlédnout i z pohledu řízení. V mém regulačním obvodu řídím otáčky čtyř ventilátorů a průtok čerpadla. Průtok čerpadla ovlivňuje, jak rychle je teplo z vodního bloku na elektronické komponentě odváděno pryč. Ventilátory zase ovlivňují, jak rychle je odvedeno teplo pryč z chladiče do vnějšího prostředí.

5 REGULAČNÍ OBVOD

Regulace je důležitým druhem řízení, které umožňuje udržování určitých fyzikálních veličin na stanovených hodnotách. Při regulaci se v jejím průběhu zjišťují hodnoty těchto veličin a srovnávají se s požadovanými hodnotami. Podle zjištěných odchylek, které jsou mírou přesnosti regulace, se zasahuje do regulovaného procesu tak, aby tyto odchylky mohly být udržovány na minimu. Měří se výstup systému a podle velikosti výstupu se vhodně volí regulace. Při regulaci vždy existuje zpětná vazba od výstupu systému na jeho vstup. Práce se zabývá regulací teploty za použití dvou regulačních obvodů. Prvním je regulován průtok kapaliny a druhým průtok vzduchu. Na začátek je důležité zodpovědět si otázky, co je to řízení a regulační obvod.

Řízení je cílevědomé působení na objekt s cílem zajistit žádané chování tohoto objektu. Dělíme ho na ruční a automatické. Automatické řízení dělíme na přímé a nepřímé. Z hlediska způsobu řešení pak na spojitě, logické a diskrétní.

Regulační obvod je systém, který je tvořen nejčastěji dvěma prvky, a to regulátorem a regulovanou soustavou. Regulátor na základě rozdílu mezi žádanou a regulovanou veličinou nastaví akční veličinu tak, aby byl splněn cíl regulace, $y \Rightarrow w$ a $e \Rightarrow 0$. Dynamické chování celého regulačního obvodu můžeme popsat např. pomocí diferenciálních rovnic, které určují vztah regulované veličiny a žádané veličiny, nebo regulované veličiny a poruchy. Dynamické vlastnosti regulačního obvodu závisí na dynamických vlastnostech jeho jednotlivých členů. Za lineární regulační obvod budeme považovat takový obvod, jehož vlastnosti můžeme matematicky popsat s dostatečnou přesností lineárními diferenciálními rovnicemi s konstantními koeficienty. Časové průběhy uvedených veličin, tj. $y(t)$, $w(t)$, $e(t)$, $u(t)$ a $v(t)$ charakterizují chování regulačního obvodu.



Obrázek 21 - Regulační obvod [9]

w – žádaná veličina; e – regulační odchylka; y – regulovaná veličina; v – poruchová veličina; u – akční veličina; R – regulátor; S – regulovaná soustava

Regulační obvod může být spojitý nebo diskrétní. Můžeme je dělit na jednoduché a rozvětvené. V jednoduchých regulačních obvodech regulátor zpracovává jen odpovídající regulační odchylku a k jejímu odstranění působí jen na příslušnou akční veličinu. Rozvětvené regulační obvody mohou pracovat s pomocnou regulovanou veličinou, s pomocnou akční veličinou, s měřenou poruchovou veličinou, např. regulační obvod pro kompenzaci dopravního zpoždění, sdružené rozvětvené regulační obvody a mnoho rozměrové regulační obvody.

Jednoduchý zpětnovazební regulační obvod je založen na zpětnovazebním charakteru a zajišťuje následnou korekci výsledku akčního zásahu se snahou úplného odstranění regulační odchylky.

Regulační obvod s pomocnou regulovanou veličinou je typ regulačního obvodu, který obsahuje kromě vlastní regulované veličiny y navíc pomocnou regulovanou veličinou y_p , která je snímána v takovém místě regulované soustavy, ve kterém se odezva na akční veličinu u projeví pouze malým zpožděním.

Regulační obvod s pomocnou akční veličinou obsahuje další akční veličinu u_p , jejíž působení na regulovanou soustavu je rychlejší než působení základní akční veličiny u_r .

Regulační obvod s měřenou poruchovou veličinou je typ regulačního obvodu, který pracuje tak, že se měří poruchová veličina v , která je zavedena do regulátoru dříve, než se projeví změna regulované veličiny y .

Regulační obvod pro kompenzaci dopravního zpoždění je typ regulačního obvodu, který je částečně zahrnut pod regulační obvod s měřením poruchové veličiny. Základní princip tohoto zapojení spočívá v tom, aby se určitá pomocná výstupní veličina y , co nejvíce shodovala se skutečně řízeným objektem [9].

Sdružené regulační obvody vznikají kombinací několika způsobů rozvětvení v jediný regulační obvod. Můžeme tak dosáhnout regulované soustavy, která současně měří poruchovou veličinu. Zároveň využívá pomocnou regulovanou veličinu a pomocnou akční veličinu.

Mnoho rozměrové regulační obvody obsahující více regulovaných veličin, na tyto soustavy mohou působit větší počty akčních a poruchových veličin.

5.1 Popis vlastností lineárních systémů

Dynamické systémy lze popsat mnoha způsoby. Pokud se k popisu systému využívá pouze relace mezi vstupem a výstupem systému, pak mluvíme o vnějším popisu. Pokud se k popisu systému používají další veličiny, které nemusí být na systému přímo měřitelné, mluvíme o vnitřním popisu (stavový model). Vnější popis lineárního systému lze vyjádřit několika vzájemně rovnocennými způsoby, lineárními diferenciálními rovnicemi u spojitých systémů a lineárními diferenčními rovnicemi u diskrétních systémů. U spojitých systémů probíhá přenos systému v L-transformaci a u diskrétních systémů v Z-transformaci. Zvláštním případem vnějšího popisu systému je statická charakteristika, což je grafická závislost výstupní veličiny systému na vstupní veličině v ustáleném stavu.

5.2 Regulátory a metody jejich nastavení

Cílem řízení je generovat akční veličinu u tak, aby se regulovaná veličina y chovala podle předem zadaného cíle, tato veličina je charakterizována žádanou veličinou w . Účinným způsobem, jak tohoto cíle dosáhnout, je použití záporné zpětné vazby. K přenosu řízeného systému je nutné nalézt takový přenos regulátoru, aby regulační odchylka e byla co nejmenší, ideálně nulová. Signály a jim odpovídající obrazy a dále pak přenosy uvedené na **Obrázek 21 - Regulační obvod** [9] mohou být buď spojité, nebo diskrétní. Spojité systémy jsou funkcí času t a diskrétní systémy jsou funkcí diskrétního času kT , kde k představuje krok a T periodu vzorkování. Spojité obrazy a přenosy jsou funkcí komplexní proměnné s , diskrétní obrazy a přenosy jsou funkcí komplexní proměnné z .

5.3 Popis vlastností ideálních P, I, D regulátorů

Regulátor může regulační odchylku zesilovat, integrovat nebo derivovat.

Proporcionální regulátor (P) je nejjednodušší případ, který pouze zesiluje signál. V tomto případě je akční veličina úměrná regulační odchylce.

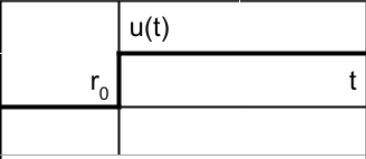
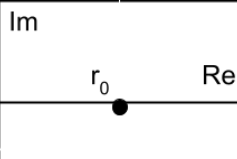
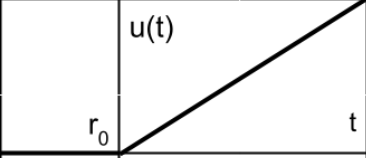

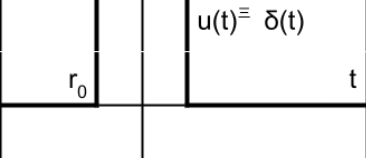
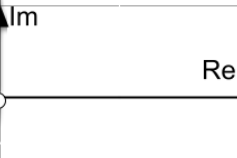
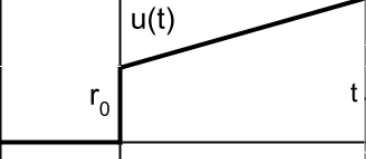
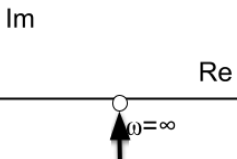
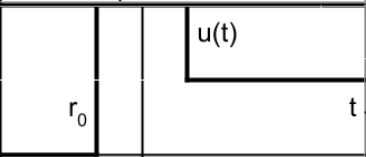
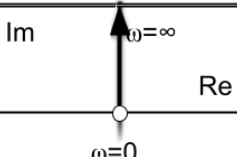
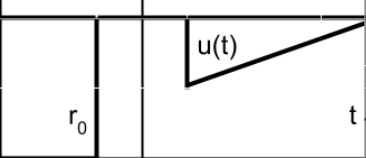
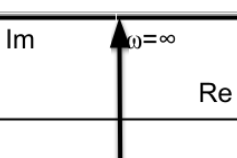
Integrační regulátor (I) je takový regulátor, kdy je akční veličina přímo úměrná integrálu regulační odchylky.

Derivační regulátor (D) je takový regulátor, kdy je akční veličina přímo úměrná derivaci regulační odchylky. Samostatný derivační regulátor se nepoužívá.

Proporcionálně derivační regulátor (PD) obsahuje derivační složku, která urychluje regulaci. Zpočátku, kdy regulační odchylka narůstá, dává tento regulátor větší velikost akční veličiny. Při zmenšování regulační odchylky se akční veličina zmenšuje rychleji, čímž se zabrání přeregulování.

Proporcionálně integrační regulátor (PI) zajišťuje dobrou stabilitu díky proporcionální složce a regulaci na nulovou regulační odchylku.

Proporcionálně integrační derivační regulátor (PID) je nejdokonalejší spojitý regulátor. Lze jím dosáhnout nejen krátké doby regulace, ale i vysoké přesnosti regulace. Tento regulátor pracuje bez trvalé regulační odchylky [9].

typ	rovnice	přenos $G_R(S)$	přechodová charakteristika	frekvenční charakteristika
P	$u=r_0e$	r_0		
I	$u=r_{-1}\int edt$	r_{-1}/s		
D	$u=r_1e'$	r_1s		
PI	$u=r_0e+r_{-1}\int edt$	r_0+r_{-1}/s		
PD	$u=r_0e+r_1e'$	r_0+r_1s		
PID	$u=r_0e+r_{-1}\int edt+r_1e'$	$r_0+r_{-1}/s+r_1s$		

Tabulka 1 - Vlastnosti ideálních regulátorů [9]

Přenosy pro ostatní typy regulátorů (P, PI, PD, I) vzniknou tak, že se některé z konstant regulátoru položí rovny nule. P-regulátor, I-regulátor a derivační složka se používá pouze u kombinovaných regulátorů. Kombinované regulátory mohou být PD-regulátor, PI-regulátor a PID-regulátor. Tyto regulátory můžeme uvažovat jako ideální nebo jako skutečné.

5.4 Metoda požadovaného modelu

Umožňuje snadné a rychlé nastavení standartních typů i číslicových regulátorů pro základní druhy regulovaných soustav s dopravním zpožděním. Typ regulátoru je doporučen z hlediska vlastností regulované soustavy a požadavků na nulovou trvalou regulační odchylku způsobenou skokovou změnou polohy žádané veličiny.

Budeme-li uvažovat zpětnovazební regulační obvod (**Obrázek 21 - Regulační obvod** [9]), ve kterém je použit regulátor s přenosem $G_R(s)$. Aby se dala použít tato metoda, musí být zajištěno, aby přenos regulované soustavy $G_S(s)$ byl jedním ze základních tvarů uvedených v tabulce (**Tabulka 3 - Určení nastavitelných parametrů regulátoru pro metodu požadovaného modelu** [9]) Pro regulované soustavy, kde nejsou základní tvary obrazového přenosu $G_S(s)$, je třeba jejich přenos nejprve aproximovat na jeden ze základních tvarů. Poté se použije tato metoda nastavené parametru [9].

Typ regulátoru	P	PI	PD	PID
Přenos regulátoru	k_P	$k_P \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$	$k_P(1 + T_D s)$	$k_P \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right)$

Tabulka 2 - Přenosy konvenčních analogových regulátorů použitých u metody požadovaného modelu

Přenos doporučeného spojitého konvenčního regulátoru je dán vztahem.

$$G_R(s) = \frac{1}{G_S(s)} \frac{G_{W/Y}(s)}{1 - G_{W/Y}(s)} \quad (38)$$

$G_{W/Y}(s)$ je uvažován ve tvarech bez a s dopravním zpožděním

Bez dopravního zpoždění

$$G_{W/Y}(s) = \frac{1}{T_W s + 1} \quad (39)$$

S dopravním zpožděním

$$G_{W/Y}(s) = \frac{a_0}{s + a_0} e^{-Ls} \quad (40)$$

Kde a_0 je zesílení otevřeného regulačního obvodu se spojitým regulátorem, L je dopravní zpoždění stejné jako u regulované soustavy, T_W je požadovaná časová konstanta regulačního obvodu.

Pomocí této metody lze navrhnout parametry regulátoru jak pro soustavy bez dopravního zpoždění, tak i pro soustavy s dopravním zpožděním viz tabulka (**Tabulka 3 - Určení nastavitelných parametrů regulátoru pro metodu požadovaného modelu** [9]) [9]

Regulovaná soustava	Typ	k_P		T_I	T_D
		$L = 0$	$L > 0$		
$G_S(s) = \frac{c_S}{s} e^{-Ls}$	P	$\frac{1}{c_S T_W}$	$\frac{a_O}{c_S}$	-	-
$G_S(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)} e^{-Ls}$	PI	$\frac{T_1}{k T_W}$	$\frac{a_O T_1}{k}$	T_1	-
$G_S(s) = \frac{k}{s(T_1 s + 1)} e^{-Ls}$	PD	$\frac{1}{c_S T_W}$	$\frac{a_O}{c_S}$	-	T_1
$G_S(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-Ls}; T_1 \geq T_2$	PID	$\frac{T_1}{k T_W}$	$\frac{a_O T_1}{k}$	$T_1 + T_2$	$\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2}$
$G_S(s) = \frac{k}{T_0^2 s^2 + 2\xi T_0 s + 1} e^{-Ls}; 0,5 < \xi \leq 1$	PID	$\frac{T_1}{k T_W}$	$\frac{a_O T_1}{k}$	$2\xi T_0$	$\frac{T_0}{2\xi}$

Tabulka 3 - Určení nastavitelných parametrů regulátoru pro metodu požadovaného modelu [9]

U soustav bez dopravního zpoždění ($L=0$), je nutné při volbě časové konstanty regulačního obvodu T_W brát ohledy na omezení akční veličiny a maximální nastavitelnou hodnotu zesílení regulátoru k_{Pmax} .

U soustav s dopravním zpožděním ($L>0$), je třeba správně zvolit hodnotu překmitu k , aby bylo možno určit parametr a_O , což je zesílení otevřeného regulačního obvodu. Pokud je dopravní zpoždění L velmi malé, hodnotu určeného koeficientu a_O je třeba vhodně snížit s ohledem na omezení akční veličiny a maximální nastavitelnou hodnotu zesílení regulátoru k_{Pmax} .

Určení parametru a_O pro zadaný překmit k se určí ze vztahu

$$a_O = \frac{1}{\beta L}$$

Rozsah překmitu $k \in \langle 0; 0,5 \rangle$ a to odpovídá 0-50 % [9].

6 ZAŘÍZENÍ PRO DOPRAVU TEKUTIN

V následné kapitole se zaměřím na vysvětlení stejnosměrného stroje, jeho aplikaci na ventilátoru a řízení jeho otáček za pomoci PWM řízení.

6.1 Rotační stroje

U elektrického rotačního stroje dochází k přímé přeměně energie elektromagnetického pole na mechanickou energii. Momentová charakteristika elektrického stroje je závislost ustálených otáček stroje na jeho zátěžném momentu. Ustálená rychlost otáčení je úměrná napětí rotoru, krouticí moment rotoru je úměrný proudu rotorem. Stejnosměrné stroje v sobě mají stator a rotor.

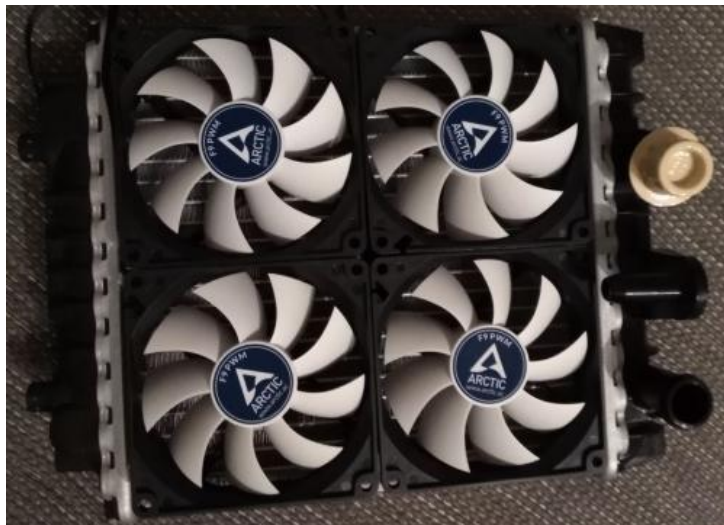
Stator je obvykle stojící část stroje a tvoří jej pólové nástavce elektromagnetů vytvářející konstantní pole statoru.

Rotor je točící se část a je vždy tvořena cívkami, do nichž přivádíme elektrickou energii, která vytvoří rotorové magnetické pole kolmé na osu pólů statoru, které interakcí se statorovým polem vyvodí pohyb, vzniká točivý moment otáčející kotvou okolo své osy uložené ve statoru. Vinutí kotvy jsou napájena přes komutátor z přitlačných uhlíkových kartáčů (uhlíků) upevněných v držácích, výkyvně zavěšených na nosiči kartáčů. Napájení rotoru přes komutátor zajišťuje neměnné pólování magnetického pole rotoru (kotvy). Otáčející se kotva se tedy chová jako nehybný elektromagnet. Spolupůsobením budicího pole statoru a pole kotvy vzniká točivý (krouticí) moment otáčející kotvou okolo osy uložené ve statoru.

Jak u čerpadla, tak i ventilátoru je k stejnosměrnému stroji připojen rotující šroub. V jednom případě tento šroub pohání kapalinu protékající chladicí soustavou a v druhém případě vzduch proudící chladičem. Rychlost je ovlivněna tekutinou, stoupáním lopatek a rychlostí otáčení [38].

6.2 Ventilátory

Ventilátory jsou rotační lopatkové stroje určené ke kontinuální dopravě tekutiny. Slouží k přímé přeměně elektrické energie na energii mechanickou. Ventilátory dělíme podle směru a způsobu průtoku tekutiny oběžným kolem. Mohou být axiální, radiální, diagonální a diametrální. Dělit je můžeme podle tlaku na nízkotlaké, středotlaké a vysokotlaké. Při návrhu a konstrukci je velmi důležité znát základní pojmy a základy termomechaniky a zákony mechaniky tekutin [38].



Obrázek 22 - Ventilátory

Základní složkou pro vytvoření síly při tomto uspořádání je vrtule. Pokud začneme otáčet vrtuli, které zabráníme v translačním pohybu, dojde k pohybu tekutiny v závislosti na stoupání h proti původní poloze. Rychlost pohybu vzduchu je pak v závislosti na vzorci

$$v' = \frac{h \cdot n}{60} \quad (42)$$

Není-li vrtule ventilátoru v klidu, ale postoupí-li za jednu otáčku o vzdálenost $p < h$, tedy vykonává dopředný pohyb.

$$v' = \frac{h \cdot n}{60} \quad (43)$$

Tekutina se za vrtulí pohybuje rychlostí $h \cdot p$. Vrtule vytváří tlak. Rychlost vzduchu se zvětší o $v' - v$ a dochází k relativní změně rychlosti vzduchu, která se nazývá skluz [38].

$$\frac{v' - v}{v'} = \frac{h - p}{h} = \delta \quad (44)$$

Velikost tahu vrtule získáme ze změny hybnosti tekutiny, která prochází otáčející se vrtulí. Je-li dán průměr vrtule D , pak hmota tekutiny, která proteče za čas t je

$$m = \rho \frac{\pi * D^2}{4} * v' * t \quad (45)$$

Nedílnou součástí mé práce je, jak správně ventilátory a čerpadlo řídit. Regulátor musí správně vyhodnotit, jaká je odchylka a správně nastavit změnu otáček. Otáčky čerpadla i ventilátorů jsou řízena pomocí Arduina které využívá pulzně šířkové modulace řízení (PWM) [38].

7 PWM ŘÍZENÍ

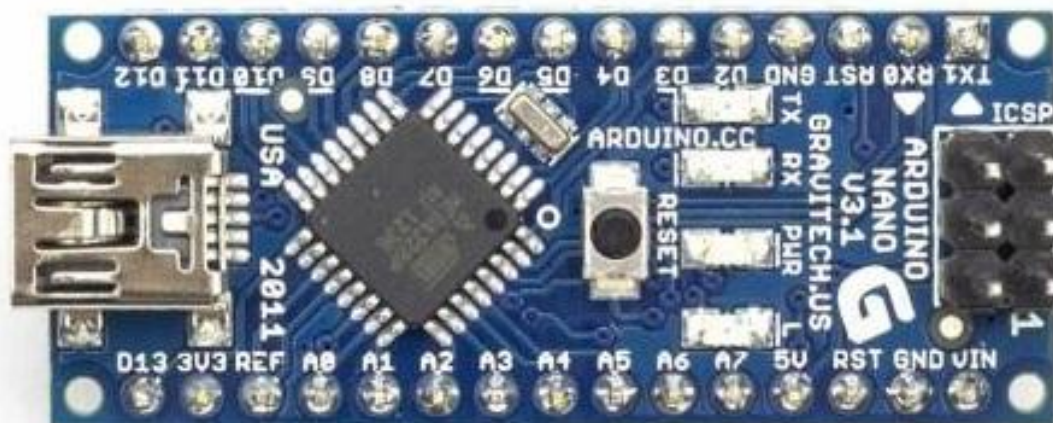
Je diskrétní modulace pro přenos analogového signálu. Jedná se o modulaci analogového signálu pomocí dvouhodnotového signálu. Základní podmínkou pro PWM řízení proudu v zátěžovém obvodu je přítomnost jednoho setrvačného prvku (indukčnosti). Rozlišujeme přímé a nepřímé PWM řízení proudu zátěží. Signál je přenášen pomocí střídavy (poměr času, ve kterých je signál v jednotlivých úrovních). Cyklus, kdy dojde k přenosu jedné střídavy, se říká perioda (součet doby, kdy je zapnuto nebo vypnuto). Omezení pro PWM řízení je, že přenos informace je vždy omezen na relativní vyjádření (0-100 %). Proto vždy musí být znám poměr mezi skutečnou hodnotou a procentuálním vyjádřením. PWM řízení můžeme mít bipolární a unipolární. U unipolárního spínání dochází ke změnám pouze u jednoho tranzistoru. U tohoto spínání se střídají dvě hlavní fáze. V první fázi je motor připojen na stejnosměrné napětí a pomocí střídavy se nastaví střední hodnota napětí určující rychlost otáček. Ve druhé fázi je tranzistor v jedné větvi přepojen. Díky této změně dojde ke zkratu motoru a připojení nulového napětí. Bipolárním spínáním dochází ke změně u dvou tranzistorů v každé fázi. Následně se polarita napětí motoru mění. Takže se motor v jedné fázi otáčí jedním směrem nebo se při druhé fázi snaží otáčet směrem druhým. Následkem toho pak dochází k aktivnímu brzdění motoru [38].

8 ARDUINO

Tento systém má velkou modularitu, snadné programování a nízké pořizovací náklady. Arduino je v současné době jedna z nejrozšířenějších platforem na trhu. Tato platforma se dá pořídit od malých modelů po kompletní sestavy obsahující USB, HDMI apod. Jelikož se jedná o Open Source projekt, je sdíleno mnoho schémat a návodů. Centrální jednotkou Arduina je jednočipový mikroprocesor, který je obklopen dalšími elektronickými komponentami. Základní deska je většinou osazena digitálními a analogovými piny, které umožňují používání externích elektronických komponent (řízení motorů, senzory, diody a mnoho dalších). Celé Arduino je v mé práci použito pro sbírání dat ze senzorů a na základě těchto dat PWM řízení průtoku kapaliny a rychlosti ventilátoru [1].

Programování probíhá nejčastěji v programu Arduino IDE. Je možné ho programovat v jazyce C nebo C++, samotné programování pak výrazně usnadňuje využívání knihovny Wiring. Po zhotovení programu připojíme Arduino kabelem k PC a skrze program Arduino IDE nahrajeme program do jeho paměti [5].

Arduino Nano je mikrokontrolerová vývojová deska založená na ATmega328. Je to nejmenší vývojová deska ze všech Arduin. Deska obsahuje 14 digitálních vstupních / výstupních pinů (z toho může být 6 použito jako výstupy PWM), 6 analogových vstupů, připojení pomocí USB, napájecí konektor, ICSP rozhraní a resetovací tlačítko. Obsahuje vše potřebné k provozu mikrokontroleru, jednoduše jej připojíte k počítači pomocí USB kabelu a můžete začít [33].



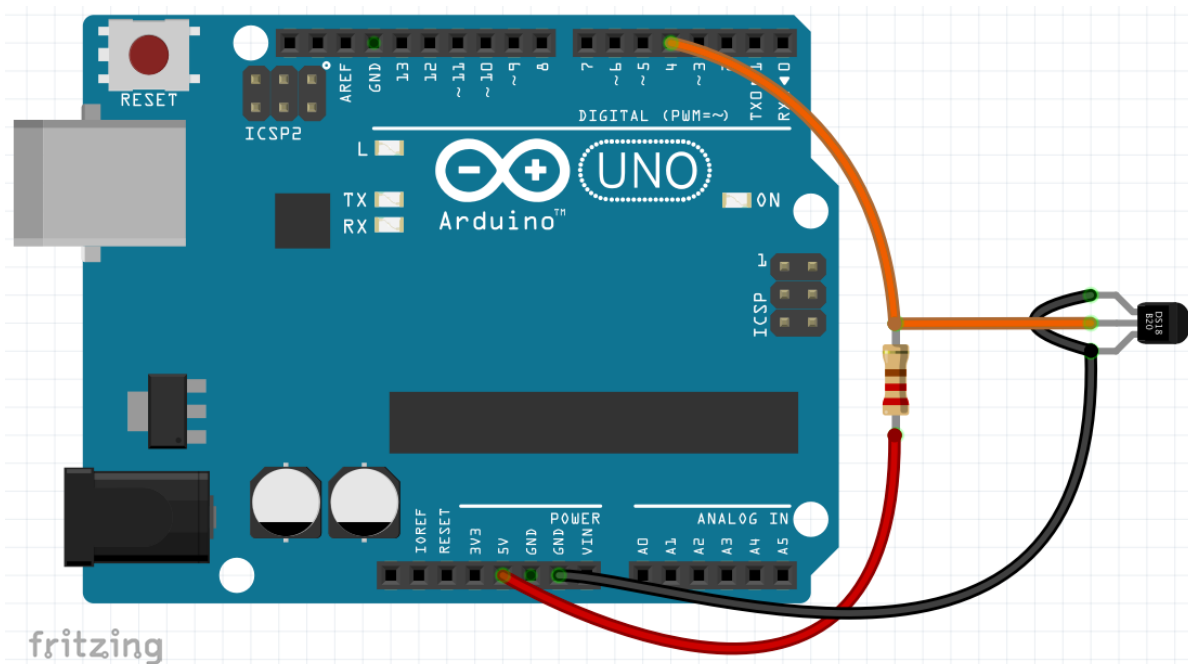
Obrázek 23 - Arduino Nano [33]

8.1 Vnější periferní obvody

Proudový snímač INA219 je vstupní modul, který umožňuje s pomocí Arduina měřit stejnosměrný proud. Tento senzor od firmy Texas Instruments dokáže měřit průchozí stejnosměrný proud o velikosti až 3,2 Ampérů a to v obou směrech, tedy kladný i záporný proud [34].

Díky Mosfetu IRF520 které řídí pomocí PWM, můžete regulovat výkon u zařízení jako např.: LED světla, DC motory. Zvládá zátěž 0 – 24 V a zvládne výstupní proud až 5 A [35]. Pro spouštění a vypínání ventilátorů je použito 4 kanálové Relé 5V s optočlenem. Toto 5V, 4-kanálové relé lze ovládat přímo s mikrokontrolerem (Arduino, 8051, AVR, PIC, DSP, ARM) [36].

Teplotní senzor DS18B20 je v Arduino komunitě velice oblíbené. Za velmi dobrou cenu umožňuje měřit teplotu v rozsahu -55 až +125 stupňů Celsia, přičemž v rozsahu -10 až +85 stupňů Celsia má garantovanou přesnost $\pm 0,5$ °C. Další výhodou je také možnost zakoupit tento teplotní senzor jak v pouzdře TO-92, které se velikostí podobá obyčejným tranzistorům, tak i vodotěsnou variantu, kdy je senzor zataven v nerezové tyčince. Pro komunikaci s Arduino deskou je u čidla DS18B20 využita sběrnice OneWire, která využívá pouze jeden komunikační pin a toto čidlo také podporuje takzvaný parazitní režim, kdy pro spojení čidla s Arduino deskou stačí využít pouze 2 dráty. Propojíme-li krajní vodiče čidla VCC a GND společně se zemí na Arduino, prostřední vodič DQ s pinem 4 a odpor spojíme na jednom konci s vodičem DQ a +5V na konci druhém [37].



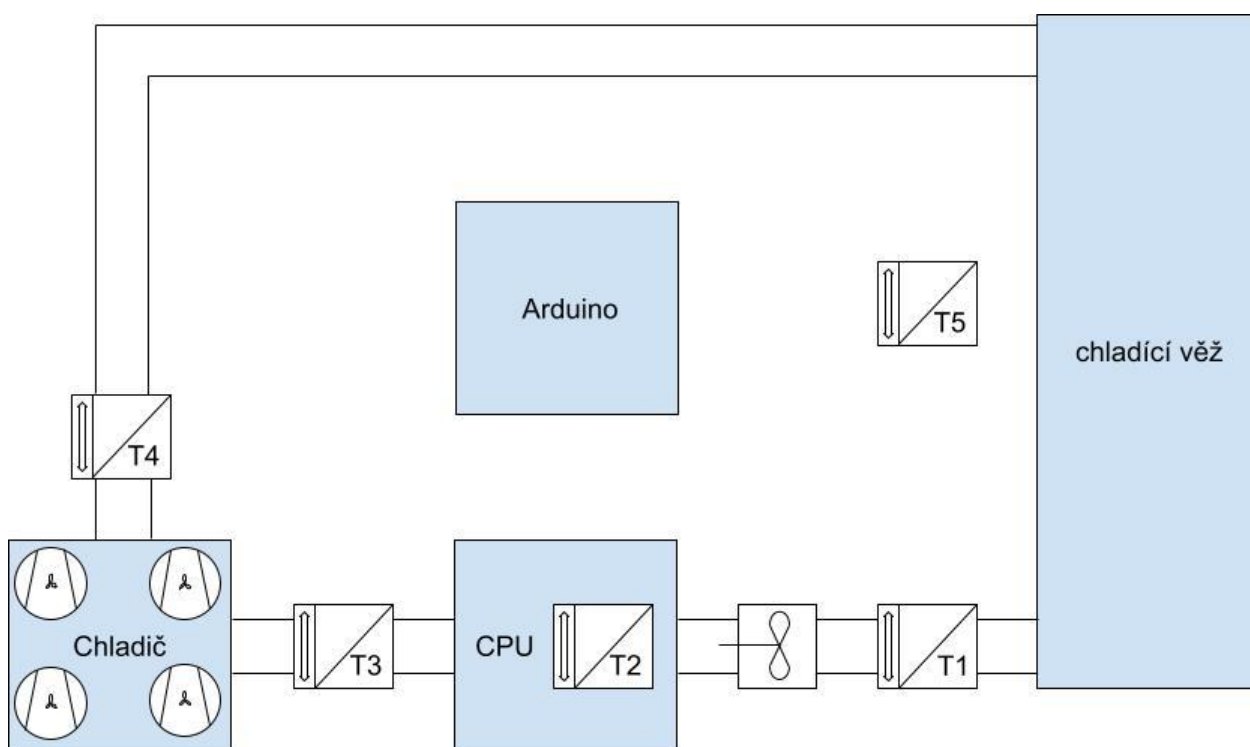
Obrázek 24 - Zapojený senzor teploty [37]

Pro správné přeložení a nahrání kódu je nutné stáhnout a nainportovat knihovny DallasTemperature a OneWire. Poté vytvoříme nejprve instanci oneWireDS pro využití funkce OneWire sběrnice a poté již instanci senzoryDS, která nám umožní jednoduše číst informace o připojených čidlech DS18B20. V podprogramu setup nastavíme komunikaci přes sériovou linku a také zapneme komunikaci knihovny s připojenými čidly. V nekonečné smyčce loop pak vždy načteme pomocí funkce requestTemperatures informace o všech připojených čidlech a následně vytiskneme teplotu připojeného čidla. Pokud máme připojených více čidel na jednom datovém pinu, přepínáme mezi těmito čidly pomocí změny čísla v závorce příkazu getTempCByIndex(0). Pořadí čidel je určeno jejich unikátní adresou, kterou nelze uživatelsky měnit [37].

II PRAKTICKÁ ČÁST

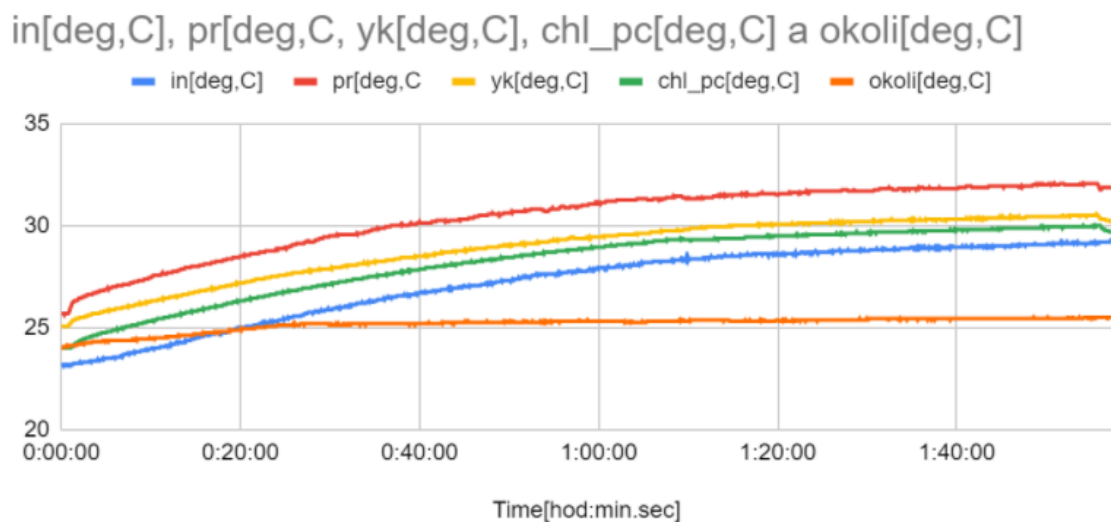
9 TESTOVACÍ SOUSTAVA

Při navrhování testovací soustavy jsem vycházel z co možná nejjednoduššího modelu. Snažil jsem se, aby daná soustava byla cenově dostupná a co nejlépe plnila svůj úkol. Pro řízení jsem použil mikropočítač Arduino Nano, které plně postačovalo na snímání teploty a následné řízení všech přídatných modulů. Na návrh regulačního obvodu byla použita metoda požadovaného modelu. Při testování soustavy jsem zjistil, že chladicí soustava plně postačuje a má ještě velké rezervy.



Obrázek 25 - Schéma navrhované soustavy

Při měření byl počítač na dlouhou dobu vystaven různým podmínkám zátěže. V průběhu testování byl monitorován odběr energie celé chladicí soustavy. Pro ověření teplot ze vstupu senzorů byla prováděna i kontrola vnějším teploměrem.



Obrázek 26 - Ustálené měření před nastavením regulace (4 CPU MAX, 1 ventilátor MAX)

10 NÁVRH FUNKČNÍ TESTOVACÍ SOUSTAVY

Regulační obvod je založen na měření odchylky od požadované hodnoty. Řídicí program vyhodnotí velikost případné naměřené teploty od teploty požadované a pomocí PS regulátoru nastaví změnu otáček větráků nebo čerpadla. Čím větší je odchylka teploty, tím větší je změna otáček. Regulátor může ventilátorům měnit otáčky, popřípadě je podle potřeby vypnout nebo zapnout. U čerpadla je nejmenší průtok kapaliny nastaven na 20 % výkonu, což je i nejmenší doporučovaný výkon tohoto čerpadla.



Obrázek 27 - Čerpadlo

Arduino využívá při řízení čerpadla i ventilátorů PWM řízení. Bipolární spínání má mnohem rychlejší regulaci otáček motoru. U čerpadla i ventilátorů v mé práci není zapotřebí, aby docházelo k brzdění motorů. Postačuje, aby byla vždy nastavena rychlost otáčení a případná změna otáček na nižší rychlost proběhla setrvačností. Proto je samotné řízení v mé chladicí soustavě provedeno unipolárně.

K celému řízení regulace slouží Arduino. Původně jsem v navrhované soustavě použil Arduino UNO a později jsem ho zaměnil za postačující Arduino Nano. Pro získání informací o systému je v chladicí soustavě 5 senzorů teploty.

Ventilátory, které jsou v navržené soustavě, mají integrované PWM řízení, u čerpadla je zapotřebí modul, který vyhodnocuje PWM signál z Arduina a mění hodnotu proudu. Následně díky změně velikosti proudu dochází k regulaci otáček čerpadla.

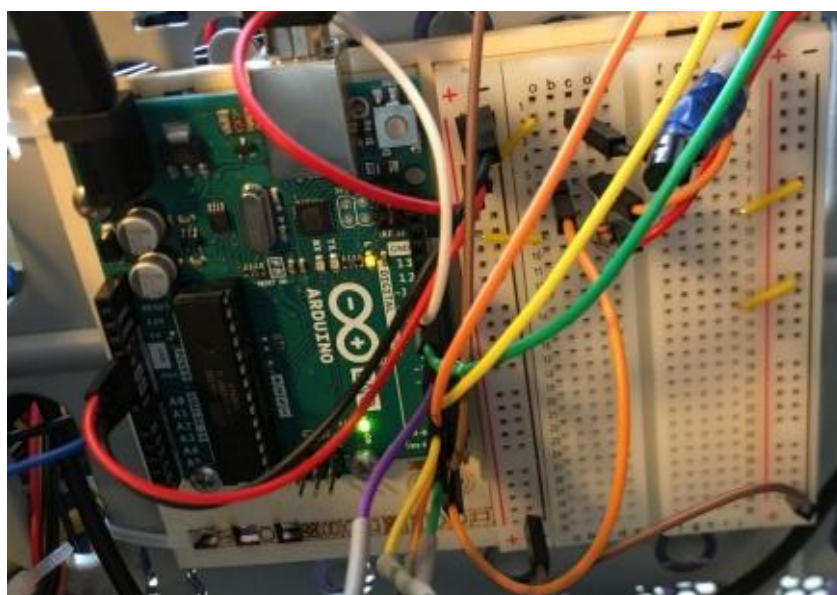
Čerpadlo jsem vybíral tak, aby mělo co možná nejmenší odběr proudu a zároveň aby poskytovalo postačující průtok kapaliny. Návrh soustavy obsahuje několik relé, které jsou rovněž řízené Arduinem. Tyto relé podle potřeby aktivují nebo deaktivují ventilátory. Tím zajišťují co možná nejmenší odběr proudu ventilátorů.

Celá soustava je navržena tak, aby část chlazení probíhalo pomocí pasivního chlazení v chladicí věži. Tato věž je zároveň využita jako expanzní nádobka. Aktivními částmi chlazení jsou ventilátory na chladiče. Jako chladicí kapalina je použita destilovaná voda a v celé soustavě jsou tři litry chladicí kapaliny.

Při měření jsem využíval z počátku multimetr a později jsem ho nahradil dvěma moduly INA219, které slouží k stálému proudovému snímání. S narůstajícími teplotami v chladicím systému se současně zvedá i účinnost chlazení. Regulace je nastavena tak, aby požadovaná teplota senzoru na vodním bloku procesoru byla při prvních měřeních 28 °C a při pozdějších měřeních 30 °C.

11 SEZNAM POUŽITÝCH KOMPONENT A JEJICH TECHNICKÝCH PARAMETRŮ

K řízení všech elektronických modulů v mé práci slouží Arduino Nano. Jedná se o mikrokontrolovou vývojovou desku. Arduino pracuje na 5 V a obsahuje 14 digitálních vstupních a výstupních pinů. Z těchto pinů může být 6 použito pro PWM řízení. Pak je na této desce 6 analogových vstupů. Velkou výhodou Arduina je že se dají tyto výstupy variabilně přeprogramovat z analogových na digitální a naopak. Součástí vývojové desky je konektor pro vstupní napětí do 12 V, resetovací tlačítko a USB konektor.

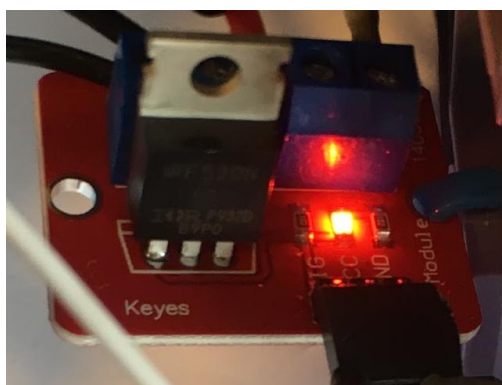


Obrázek 28 - Arduino

Součástí soustavy je 5 senzorů teploty Dallas DS18B20. Sensory teploty jsou rozmístěny tak, aby Arduino získávalo potřebné informace z vnějšího prostředí – na vstupu kapaliny do PC, z procesoru, na výstupu z PC a na výstupu z chladiče. Sensory Dallas jsou spolehlivé a přesné. Každý tento senzor má 3 výstupy. Jeden slouží k napájení, druhý k uzemnění. Poslední slouží ke komunikaci. Na sběrnici je možné připojit až 50 těchto senzorů, kdy každý z nich má svou specifickou adresu. Tyto adresy si namapuje samo Arduino. Bohužel je třeba fyzicky ověřit, která adresa patří k danému senzoru.

Vodní čerpadlo DC 6-12 V R385 od výrobce Eses má průtok kapaliny až 2 l/min a odebírá proud mezi 0,3 až 0,7A. Dané parametry byly po ověření uznány jako postačující. Jedinou jeho nevýhodou je relativní hlučnost (až 30 dB). Čerpadlo je schopné pracovat s teplotou kapaliny do 80 °C. Díky velkému odběru proudu by tuto zátěž nezvládlo řídit samo Arduino, proto je zapotřebí výstup mikropočítače proudově posílit tranzistorem Mosfet IRF520, který reguluje pomocí PWM otáčky čerpadla.

Mosfet IRF520 je řízen napětím mezi 3,3 – 5 V, spíná napětí 0 - 24 V a zvládne výstupní proud až 5 A. Do zařízení je z mikropočítače přiveden PWM signál, 5 V a GND. Ze zdroje pak řízených 12 V a GND ze zdroje počítače. Na základě PWM řízení Mosfet nastavuje střední hodnotu napětí, kterým řídí otáčky čerpadla.



Obrázek 29 - Mosfet IRF520

Součástí chladičí soustavy je chladič MH CR 913 000P osazený čtyřmi ventilátory. Ventilátory ARCTIC F9 umožňují PWM řízení, výrobce udává průtok až 73,1 m³/h a regulovatelnost otáček od 150 do 180 za min. K napájení potřebuje 12 V a má spotřebu 0,09A. Jelikož se ventilátory neumí spínat při řízení Arduinem, je pro spínání ventilátorů k Arduinu napojeno 4kanálové relé s optočlenem. Každý kanál potřebuje pro sepnutí ventilátoru 0,05-0,06A a je schopný spínat proud o velikosti až 5 A.



Obrázek 30 - 4kanálové relé s optočlenem

Jako expanzní nádoba slouží uzavíratelná chladicí věž „reserator 1“ od společnosti Zalman. Plocha pasivního radiátoru je 1,274 m² s maximálním objemem kapaliny 2,5 l. Pro vedení chladicí kapaliny je v chladicí soustavě použito 2 m gumové hadice o vnitřním průměru 8 mm s celkovým objemem kapaliny 0,2 l. Na procesoru je použit vodní blok Zalman ZM-WB2 Gold, který má objem kapaliny 0,05 l. Jako chladicí kapalinu používám destilovanou vodu. Arduino i zbylé jeho moduly jsou zapojené na 12 V zdroj uvnitř počítače.

12 ZDŮVODNĚNÍ NÁVRHU ŘEŠENÍ DANÉ SOUSTAVY

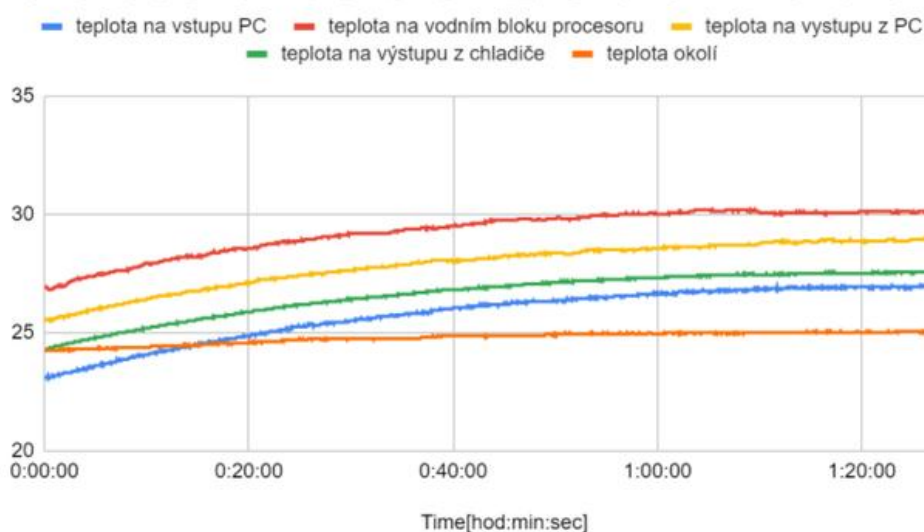
Tato soustava byla navržena ve snaze o co největší optimalizaci energie při provozu. Při běžném provozu procesoru stačí pro ochlazení pouze průtok chladicí kapaliny. Soustavou protéká chladicí kapalina při výkonu 20 % výkonu čerpadla a následné ochlazení chladicí kapaliny v chladicí věži. Při náročnější práci dojde dočasně k aktivaci jednoho z ventilátoru.

Pouze při velkém zatížení procesoru nebo při uživatelském požadavku na nižší provozní teplotu procesoru se spouští ventilátory a zvyšuje se průtok chladicí kapaliny.

Spotřeba čerpadla při 25 % provozu je 0,28 A, čerpadlo má u tohoto výkonu naměřený průtok kapaliny 0,45 l/min. U 50 % výkonu čerpadla jsem naměřil spotřebu 0,51 A a průtok kapaliny je 1,1 l/min. Při 100% zatížení je pak spotřeba 0,78A a průtok kapaliny je 2,1 l/min.

Naměřené hodnoty ventilátoru jsou při 50% výkonu 63 mA. U 75% výkonu ventilátoru je to 98 mA a u 100 % výkonu 119 mA. Výrobce ventilátorů udává, že průtok vzduchu je 73,1 m³/h. Ventilátor umožňuje regulaci otáček od 150 až po 1800 ot/min. Při 100% zatížení všech jader procesoru běželo čerpadlo na 50 % výkonu a 2 ventilátory na 50% výkon. Teplota narůstala pozvolna a na senzoru vodního bloku procesoru se při regulaci ustálila na 30 °C. Spotřeba při měření nepřesáhla 0,7 A. Při měření účinnosti chlazení byla testovaná soustava umístěna do prostředí o teplotě 25 °C.

in[deg,C], pr[deg,C], yk[deg,C], chl_pc[deg,C] a okoli[deg,C]



Obrázek 31 - Regulace (4 CPU MAX, pomocí 2 ventilátorů)

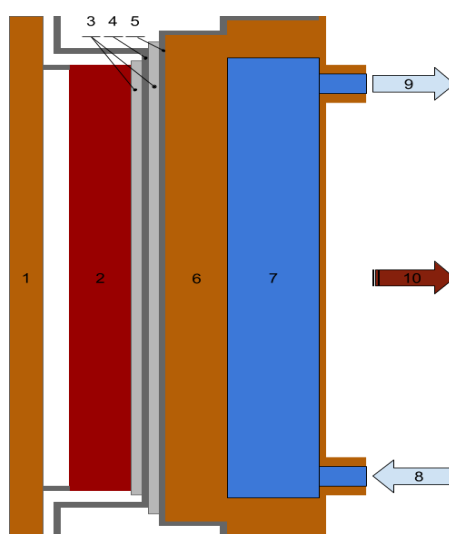
Na **Obrázek 31 - Regulace (4 CPU MAX, pomocí 2 ventilátorů)** vidíme vývoj tepla ze sensorů teploty při stálém plném zatížení procesoru. Teplota je pomocí regulační soustavy ustálená a v čase se nemění.

13 TEPELNÁ BILANCE A STANOVENÍ SOUČiniteLE PROSTUPU TEPLA

Tepelná bilance a odvod tepla byl vypočítáván na základě získaných hodnot z procesoru Intel 4004, který jsem použil v navržené sestavě.

13.1 Prostup tepla

Jádro procesoru se zahřívá a produkuje velké množství tepla. Tato energie je v podobě tepla vyzářená do svého okolí. Pokud se na procesor připevní vodní blok, tak teplo prochází postupně všemi vrstvami materiálu vodního bloku. Teplota se při prostupu vodním tělesem postupně v těchto vrstvách vyrovnává. Velkou roli zde hrají tepelné odpory materiálů. Tyto odpory určují míru odporu proti průniku tepla. Čím větší je tento odpor, tím pomaleji teplo prochází. U budov a izolací je žádáno, aby tento odpor byl co největší. U chlazení procesoru je ale požadováno, aby byl tento odpor co nejmenší a teplo co nejlépe pronikalo do výměníku tepla. Z výměníku je toto teplo následně odvedeno pomocí chladicí kapaliny.



Obrázek 32 - Prostup tepla procesorem

Na **Obrázek 32 - Prostup tepla procesorem** vidíme spodní část procesoru (1). Jádro procesoru (2) se zahřívá na vysokou teplotu a bez chlazení by došlo k častému odstavování procesoru nebo k jeho úplnému zničení. Mezi jádrem procesoru a ocelovým ochranným krytem (4) je nainstalována od výrobce teplovodivá pasta. Stejně tak i mezi ochranným krytem procesoru a pozlacenou vrstvou vodního bloku je po montáži vodního bloku nanese vrstva teplovodivé pasty. Tenká zlatá vrstva (5) na vodním bloku je materiál s výbornou tepelnou vodivostí a s nízkou pravděpodobností oxidace. Většina materiálu vodního bloku je z měděné výplně (6). Odvod tepla z vodního bloku obstarává voda (7). Zbytkové teplo prochází znovu měděným obalem a je vyzařováno do okolí (10). Na obrázku je ještě vstup (8) a výstup (9) chladicí kapaliny. Průtok kapaliny je při 50% chodu čerpadla 0,45 l vody/min. Teplosměnná plocha procesoru je 0,00037 m².

Veškeré tyto hodnoty a konstanty jsem zaznamenal do **Tabulka 4 - Hodnoty pro výpočet prostupu tepla**, ze které pak vycházím při výpočtech prostupu tepla.

	teplovodivá pasta	ocel	zlato	měď	voda
λ	8	52	312	349	0,599
ρ	2600	7850	8950	19300	8950
šířka vrstvy	0,0001	0,001	0,0001	0,004	0,005

Tabulka 4 - Hodnoty pro výpočet prostupu tepla

Teplota na procesoru byla při měření 40 °C, teplota na zlaté vrstvě byla 34,1 °C, teplota na měděném obalu pak 30,4 °C. Pro výpočet tepla vedením vícevrstvou stěnou použiju vzorec pro Q_1 mezi CPU a zlatou vrstvou. Pro výpočet použijeme vzorec č. 9.

$$Q_1 = 0,00037 \frac{40 - 34,1}{2 \frac{0,0001}{8} + \frac{0,001}{52} + \frac{0,0001}{312}}$$

$$Q_1 = 49 W$$

Mezi zlatou vrstvou a obalem vodního bloku se použije stejný vzorec.

$$Q_2 = 0,00037 \frac{34,1 - 30,4}{2 \cdot \frac{0,0001}{349} + \frac{0,01}{0,599}}$$

$$Q_2 = 0,041 \text{ W}$$

Pro další výpočet berme vodní blok jako výměník tepla, kde ze spodní strany vodního bloku prostupuje teplo. Teplo je z výměníku odváděno pryč vodou. Viz **Tabulka 5 - Hodnoty pro výpočet výměníku tepla ve vodním bloku**.

látka	teplota na vstupu výměníku [°C]	teplota na výstupu výměníku [°C]
CPU	$t_1' = 40$	$t_1'' = 30,4$
voda	$t_2' = 27,5$	$t_2'' = 28,71$

Tabulka 5 - Hodnoty pro výpočet výměníku tepla ve vodním bloku

Vypočítáme pomocí vzorců č. 19 a č. 20 Δt_1 a Δt_2

$$\Delta t_1 = 34,1 - 27,5 = 6,6^\circ \text{C}$$

$$\Delta t_2 = 30,4 - 28,71 = 1,96^\circ \text{C}$$

Použijeme vzorec č. 21 na výpočet Δt_{ls}

$$\Delta t_{ls} = \frac{6,6 - 1,96}{\ln \frac{6,6}{1,96}} = 3,6^\circ \text{C}$$

V dalším kroku vypočítáme Reynoldsovo kritérium (Re) pomocí vzorce č. 27. K tomu budeme potřebovat ještě hustotu materiálu, objemový průtok, charakteristický rozměr a dynamickou viskozitu vody.

materiál	ρ [kg/m ³]	V[m/s]	d [m]	η [mPs s]	Pr	λ [W/mK]	c_p [J/kgK]	ν [m ² /s]
voda	998	0,0075	0,008	0,001	7,06	0,599	4180	0,0781
hliník	2700	-	0,001	-	-	237	896	-

Tabulka 6 - Materiálové veličiny vody

$$Re = \frac{0,0781 \cdot 0,008 \cdot 998}{0,001} = 14970$$

Reynoldsovo kritérium vychází tak, že $Re > 10^4$, Pro výpočet Nusseltova kritéria použijeme vzorec č. 33.

$$Nu = 0,023 \cdot 14970^{0,8} \cdot 7,06^{0,4}$$

$$Nu = 0,023 \cdot 2188,65 \cdot 2,185 = 110$$

Následně vypočítáme α dle vzorce č. 34, kam dosadíme Nusseltovo kritérium, součinitel tepelné vodivosti tekutiny a charakteristický rozměr.

$$\alpha = \frac{110 \cdot 0,599}{0,008} = 8236,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

α dosadíme do výpočtu tepelné vodivosti materiálu u vzorce č. 16

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{8236,25} + \frac{0,001}{237} = 0,0000125$$

$$k = 7959,63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$$

k dosadíme do výpočtu teplosměnné plochy ve vzorci č. 25

$$A = \frac{0,0075 \cdot 998 \cdot 4,18 \cdot (34,1 - 30,4)}{7959,63 \cdot 3,6} = 0,0040 \text{ m}^2$$

Z toho vypočítám tepelný průtok pomocí vzorce č. 26

$$Q = 7959,63 \cdot 0,0040 \cdot 3,6 = 114,6 \text{ W}$$

13.2 Výměníky

Další výpočet bude pro chladič vody s ventilátory. Do chladiče je přivedena teplá voda, která je vedena hliníkovým potrubím. Toto potrubí je chlazené proudícím vzduchem pomocí čtyř ventilátorů. Rychlost otáčení ventilátorů i velikost průtoku kapaliny je řízeno Arduinem.

	teplota na vstupu výměníku [°C]	teplota na výstupu výměníku [°C]
voda	$t_1' = 28,75$	$t_1'' = 27,81$
vzduch	$t_2' = 24,81$	$t_2'' = \text{neznáme}$

Tabulka 7 - Hodnoty pro výpočet výměníku tepla v chladiči

Teplotu t_2' dopočítáme ze vztahu $V' \cdot \rho' \cdot cp' \cdot (t_1' - t_2') = V'' \cdot \rho'' \cdot cp'' \cdot (t_1'' - t_2'')$

materiál	ρ [kg/m ³]	V [m ³ /s]	d [m]	η [mPs s]	Pr	λ [W/mK]	c_p [J/(kgK)]
voda	998	0,0075	0,006	0,001	7,06	0,599	4180
vzduch	1,164	1,82	0,185	0,0000171	0,73	0,0252	1010
hliník	2700	-	0,001	-	-	237	896

Tabulka 8 - Materiálové veličiny vody a vzduchu

$$t_2'' = t_1'' + \frac{V' \cdot \rho' \cdot cp' \cdot (t_1' - t_2')}{V'' \cdot \rho'' \cdot cp''} = 24,81 + \frac{0,0075 \cdot 998 \cdot 4180 \cdot (28,75 - 27,81)}{1,82 \cdot 1,164 \cdot 1010}$$

$$t_2'' = 24,82 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vypočítáme Δt_1 a Δt_2

$$\Delta t_1 = 28,75 - 24,81 = 3,94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = 27,81 - 24,82 = 2,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Použijeme vzorec č. 21 na výpočet Δt_{ls}

$$\Delta t_{ls} = \frac{3,94 - 2,99}{\ln \frac{3,94}{2,99}} = 3,44 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vypočítáme Reynoldsovo kritérium (Re) pro vodu. K tomu budeme potřebovat ještě hustotu materiálu, objemový průtok, charakteristický rozměr a dynamickou viskozitu

$$Re = \frac{0,0075 \cdot 0,006 \cdot 998}{0,001} = 44,91$$

Reynoldsovo kritérium vychází tk že $Re < 2,3 \cdot 10^3$. Pro výpočet Nusseltova kritéria budeme potřebovat ještě Grashofovo kritérium (Gr), součinitel objemové roztažnosti (β) a kinetickou viskozitu (ν)

$$\beta_{vody} = 0,00018 \text{ l/K}, \nu_{vody} = 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^1$$

Grashofovo kritérium vypočítáme za pomoci vzorce č. 29

$$Gr' = \frac{9,81 \cdot 0,00018 \cdot 5,38}{1,008} \cdot 3,44 = 0,032$$

A dosadíme do vzorce č. 26

$$Nu' = 0,17 \cdot 3,509 \cdot 2,317 \cdot 0,7 \cdot 1 = 0,979$$

Následně vypočítáme α' , kam dosadíme Nusseltovo kritérium pro vodu, součinitel tepelné vodivosti tekutiny a charakteristický rozměr. K tomu využijeme vzorec č. 33

$$\alpha' = \frac{0,979 \cdot 599}{0,006} = 97,8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

V dalším kroku vypočítáme Reynoldsovo kritérium (Re) pro vzduch ze vzorce č. 22

$$Re'' = \frac{1,82 \cdot 0,185 \cdot 1,164}{1,71 \cdot 10^{-5}} = 22919$$

Reynoldsovo kritérium vychází tak, že $Re > 10^4$. Pro výpočet Nusseltova kritéria tedy použijí vzorec č. 28

$$Nu'' = 0,023 \cdot 3077 \cdot 0,88 = 62,27$$

Následně vypočítáme pomocí vzorce č. 29 α'' , kam dosadíme Nusseltovo kritérium pro vodu, součinitel tepelné vodivosti tekutiny a charakteristický rozměr

$$\alpha'' = \frac{62,27 \cdot 0,0252}{0,185} = 0,025 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$$

α dosadíme do výpočtu tepelné vodivosti materiálu ze vzorce č. 30

$$k = 40,238 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$$

k dosadíme do výpočtu teplosměnné plochy

$$A = \frac{1,82 \cdot 1,164 \cdot 1,01 \cdot (28,75 - 27,81)}{40,238 \cdot 3,6} = 0,0138 \text{ m}^2$$

Z toho vypočítám tepelný průtok ze vzorce č. 32

$$Q \cdot = 40,238 \cdot 0,0138 \cdot 3,44 = 2 \text{ W}$$

Dalším výpočtem výměníku bude pro expanzní nádobu, která je zároveň žebrovaná chladicí věž. Do horní části chladiče je přivedena teplá voda. Voda odchází ze spodní části chladicí věže. Tato chladicí věž je chlazená vzduchem, který se ohřívá na stěnách a postupně stoupá vzhůru.

	teplota na vstupu výměníku [°C]	teplota na výstupu výměníku [°C]
vodu	$t_1' = 27,75$	$t_1'' = 26,81$
vzduch	$t_2'' = 24,81$	$T_2'' = \text{neznáme}$

Tabulka 9 - Hodnoty pro výpočet výměníku tepla v chladicí věži

Teplotu t_2' dopočítáme ze vztahu: $V' \cdot \rho' \cdot cp' \cdot (t_1' - t_2') = V'' \cdot \rho'' \cdot cp'' \cdot (t_1'' - t_2'')$ a materiálové veličiny z **Tabulka 8 - Materiálové veličiny vody a vzduchu**

$$t_2'' = t_1'' + \frac{V' \cdot \rho' \cdot cp' \cdot (t_1' - t_2')}{V'' \cdot \rho'' \cdot cp''} = 24,81 \frac{0,09 \cdot 998 \cdot 4180 \cdot (27,75 - 24,81)}{0,1 \cdot 1,164 \cdot 1010}$$

Vypočítáme Δt_1 a Δt_2

$$\Delta t_1 = 27,75 - 24,81 = 2,94 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = 26,81 - 25,06 = 1,96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Použijeme vzorec na výpočet Δt_{ls}

$$\Delta t_{ls} = \frac{2,96 - 1,96}{\ln \frac{2,94}{1,96}} = 2,28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Vypočítáme Reynoldsovo kritérium (Re) pro vodu. K tomu budeme potřebovat ještě hustotu materiálu, objemový průtok, charakteristický rozměr a dynamickou viskozitu.

$$Re' = \frac{0,0075 \cdot 0,09 \cdot 998}{0,001} = 673,65$$

Reynoldsovo kritérium vychází tak, že $Re < 2,3 \cdot 10^3$. Pro výpočet Nusseltova kritéria budeme potřebovat ještě Grashofovo kritérium (Gr) které dopočítáme ze vzorce č. 24, součinitel objemové roztažnosti (β) a kinematickou viskozitu (ν)

$$\beta_{vody} = 0,00018 \text{ l/K}; \nu_{vody} = 1,004 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Gr' = \frac{9,81 \cdot 0,00018 \cdot 5,38}{1,008} \cdot 3,44 = 0,032$$

$$Nu' = 0,17 \cdot 8,577 \cdot 0,873 \cdot 1,39 \cdot 1 = 1,77$$

Následně vypočítáme α' , kam dosadíme Nusseltovo kritérium pro vodu, součinitel tepelné vodivosti tekutiny a charakteristický rozměr

$$\alpha' = \frac{1,77 \cdot 0,599}{0,45} = 2,356 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

V dalším kroku vypočítáme Reynoldsovo kritérium (Re) pro vzduch

$$Re'' = \frac{0,1 \cdot 0,45 \cdot 1,164}{1,71 \cdot 10^{-5}} = 3063$$

Reynoldsovo kritérium je v případě samovolného vztlínání $Nu = C(Gr Pr)^n$. Při hodnotě $Re=3063$ vychází $C = 0,54$ a $n=1/4$

$$Nu'' = 0,54 \cdot (28,52 \cdot 0,73)^{1/4} = 1,15$$

Následně vypočítáme α'' , kam dosadíme Nusseltovo kritérium pro vodu, součinitel tepelné vodivosti tekutiny a charakteristický rozměr

$$\alpha'' = \frac{1,15 \cdot 0,0252}{0,185} = 0,15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

α'' dosadíme do výpočtu tepelné vodivosti materiálu

$$k = 19,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$$

k dosadíme do výpočtu teplosměnné plochy

$$A = \frac{0,0075 \cdot 1,164 \cdot 1010 \cdot (27,75 - 26,81)}{19,14 \cdot 2,28} = 0,0138 \text{ m}^2$$

Z toho vypočítám tepelný průtok

$$Q = 19,14 \cdot 0,0138 \cdot 2,28 = 8,2 \text{ W}$$

14 NÁVRH PROGRAMU TESTOVACÍ SOUSTAVY

Pro chlazení byl vytvořen řídicí program, založený na PS regulátoru a proměnné, která je přímo úměrná velikosti změny. PS regulátor vyhodnotí odchylku od požadované hodnoty a nastaví proměnnou dle velikosti změny. Tato proměnná přímo nastavuje změnu na ventilátorech a čerpadle. Program začíná s nastavením čerpadla na 20 % jeho výkonu. Tato hodnota se nezmění, dokud teplota senzoru na vodním bloku CPU nepřekročí mez předdefinované teploty.

Na základě změny program spouští 1. ventilátor. Pokud je překročení teplotní meze velké, proměnná spouští rovnou i druhý ventilátor. Příliš velký teplotní nárůst může proměnnou natolik zvětšit, že už v prvním kroku regulace regulátor spustí všechna zařízení na maximum.

Program při požadavku na spuštění prvního ventilátoru sepne jeho relé a tím ho uvede do chodu na 20 % jeho výkonu. Program je nastaven tak, aby ventilátor dosáhl 50 % výkonu a poté se spustil další ventilátor na 20 %. Pokud i druhý ventilátor dosáhne 50 %, zvednou se otáčky čerpadla na 50 %. Poté dojde postupně k aktivaci 3. a 4. ventilátoru. Tyto ventilátory mají již nastavení tak, aby maximum otáček bylo 100 %. Poté se zvedají otáčky 1. a 2. ventilátoru do 100 %. Jelikož má čerpadlo největší odběr, teprve až jako posledním se zvedají otáčky do 100 %.

Podobné je to při klesání teploty pod požadovanou hodnotu. Postupně regulátor snižuje otáčky všem zařízením. Pokud dosáhne při klesání otáček ventilátoru 20 % výkonu, regulátor jej vypne. Snižování otáček je ukončeno v momentě, kdy jsou vypnuté všechny ventilátory a čerpadlo běží na 20 % výkonu.

Pokud je změna teploty velká, je časová smyčka regulátoru malá. Je-li změna teploty malá nebo zanedbatelná, časová smyčka regulátoru se vykonává ve větším kroku. Když je teplota ustálená nebo pod předem definovanou teplotou, je časová smyčka regulátoru největší.

Takto navržený program se snaží co nejvíce využít možností Arduina jako regulátoru a zároveň zachovat co nejmenší spotřebu energie u čerpadla i ventilátorů.

Než došlo na fyzické nasazení programu, tak byl otestován. Testovací program měl předem definovanou teplotní smyčku, která nutila regulátor reagovat na změnu. Bohužel jsem nenašel žádný simulátor Arduina, tak musel být vždy program testován na samotné desce bez osazených komponent.

ZÁVĚR

Při navrhování soustavy jsem se rozhodoval, zda bude jeden velký ventilátor nebo čtyři malé. Jsem rád, že jsem se rozhodl pro variantu se 4 ventilátory, která umožňuje větší variabilitu při regulování teploty v soustavě. Přestože zvolená varianta mírně zvyšuje spotřebu a cenu, je toto na druhé straně mnohonásobně vyváženo možností většího průtoku vzduchu chladičem. Rovněž není dopad pro chladicí soustavu kritický v případě selhání některého z ventilátorů. Při výběru řídicího mikropočítače jsem zpočátku používal Arduino UNO, ale později jsem přešel na menší a levnější Arduino Nano, které postačovalo k řízení regulované soustavy a dalo se zapracovat do navrhovaného schématu řídicí jednotky vodního chlazení. Navržený regulační obvod vodního chlazení má velké rezervy pro náročnější elektronické komponenty, protože při maximálním zatížení došlo pouze k provozu čerpadla na 20 % a k aktivaci dvou ventilátorů na méně než 100 %.

Instalace a provoz vodního chlazení má různá úskalí. U čerpadla DC 6-12 V R385 od výrobce Eses se velice často stávalo, že nainstalovaná hadička po čase sklouzla, což bylo způsobeno zkoseným vstupem a výstupem kapaliny na čerpadle. Jelikož je povrch těchto vstupů hladký a bez jakéhokoli lemu, sklouzla hadička velice snadno. Tento problém jsem vyřešil brusným papírem a silikonem. Rovněž negativně hodnotím fakt, že se po delší době provozu (už při 50% výkonu) čerpadlo hodně zahřálo. Z výše uvedených důvodů bych doporučil při realizaci podobného projektu použít lépe řešené čerpadlo.

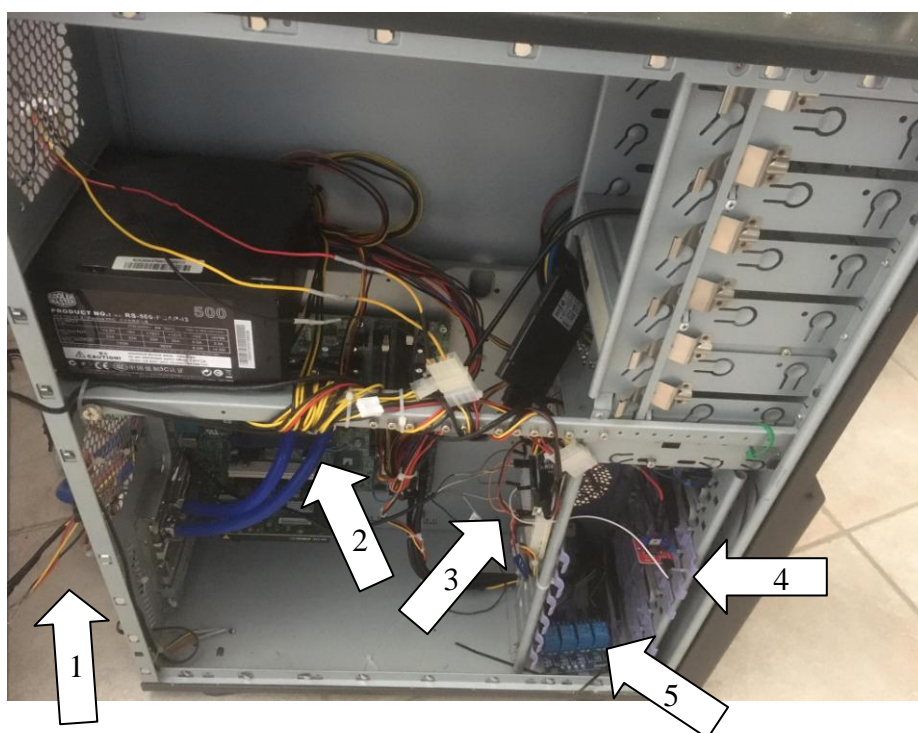
Při měření navržené soustavy (při zapnutém čerpadle na 20 % a dvou spuštěných ventilátorech na 50 % a 30 %) jsem došel k hodnotě 0,7 A, přičemž běžela 4 CPU počítače na maximum. Veškerá měření jsem prováděl v domácích podmínkách. K porovnání s navrženou soustavou jsem vybral vzduchem chlazený chladič GELID Solutions Phantom, u něhož výrobce udává spotřebu až 0,25 A. Dále jsem porovnal získané výsledky s tekutinovým chlazením MSI MAG CORELIQUID 240R (se dvěma ventilátory a čerpadlem), u kterého udává výrobce spotřebu až 0,62 A. Vytvořená soustava se projevila jako velmi stabilní, ale spotřeba elektrické energie je výrazně větší než u běžně vzduchem chlazených systémů. Ve srovnání s tekutinovým chlazením, které je v současné době dostupné na trhu, je naměřená hodnota spotřeby elektrické energie srovnatelná.

V praktické části jsem rovněž provedl tepelnou bilanci soustavy. Na základě vypočtených součinitelů přestupu tepla jsem určil tepelné ztráty soustavy v závislosti na průtoku chladicí kapaliny potřebné pro návrh regulačního obvodu.

Při výpočtu se ukázalo, že procesor generuje tepelný tok o velikosti 49 W a na obalu vodního bloku dochází k vyzařování 0,041 W do prostoru počítače. Naměřená teplota na procesoru byla 40 °C, na měděném obalu vodního bloku pak 30,4 °C.

Pominu-li nevýhody vodního chlazení, kterými je možnost úniku kapaliny do chlazené komponenty nebo vyšší pořizovací a provozní náklady, vyhovuje mi mnohem více z důvodu nižší hlučnosti počítače a vyšší spolehlivosti soustavy jako celku s možností navyšovat podle potřeby výkon (pomocí přetaktování) jednotlivých chlazených komponent i za jejich limity.

Při řešení zadaného problému jsem postupoval systematicky, přičemž jsem se naučil mnoho nových postupů a poznatků. K řešení přistoupil z mnoha různých pohledů a výsledkem je plně funkční zařízení pro chlazení výkonných elektronických komponent, u kterých dochází k velkému zahřívání. Myslím si, že vytvořená chladicí soustava se dokáže dobře přizpůsobit současným nárokům komponent dostupných na trhu a optimalizovat co nejvíce spotřebu elektrické energie.



Obrázek 33 - Složený počítač s vodním chlazením

Na **Obrázek 33 - Složený počítač s vodním chlazením** je pomocí šipek zobrazeno: 1 - senzory teploty na vstupu a výstupu z počítače, 2 - vodní blok chlazení se senzorem teploty, 3 - mikroprocesor Arduino Nano, 4 - Mosfet IRF520, 5 - 4kanálové relé s optočlenem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ARDUINO CORPORATION. Arduino [online]. 2020 [cit. 2020-09-16]. Available online from: <http://www.arduino.cc/>
- [2] FUKÁTKO, Tomáš a Jaroslav FUKÁTKO. Teplo a chlazení v elektronice II. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 118 s. ISBN 8073001993.
- [3] JURÁNEK, Antonín a Miroslav HRABOVSKÝ. EAGLE pro začátečníky: návrhový systém pro plošné spoje: uživatelská a referenční příručka. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007, 191 s. ISBN 9788073002138.
- [4] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 8073001454.
- [5] MARGOLIS, Michael. Arduino cookbook. Second edition. Sebastopol: O'Reilly, 2011, xx, 699 s. ISBN 9781449313876.
- [6] ZHANG, JINGRU. COOLING OF ELECTRONIC SYSTEM: FROM ELECTRONIC CHIPS TO DATA CENTERS. New Brunswick, New Jersey, 2012. DISSERTATION. Graduate School New Brunswick. Vedoucí práce Professor Yogesh Jaluria.
- [7] KAŇÁK, Aleš. Návod: Extrémní taktování s dusíkem pro začátečníky: Návod. *Pctuning* [online]. Praha, 2013, 29.4.2013, **2013**, 8 [cit. 2021-08-09]. Dostupné z: <https://pctuning.cz/article/navod-extremni-taktovani-s-dusikem-pro-zacatecnikychapter=8&scrollTo=article-header#article-header>
- [8] WOJTĚCH, Daniel. Velký test teplovodivých past – vyplatí se připlácet?: Test. *Pctuning* [online]. Praha, 2012, 14.5.2012, **2012**, 9 [cit. 2021-08-09]. Dostupné z: <https://pctuning.cz/article/velky-test-teplovodivych-past-vyplati-se-priplacet?chapter=7>
- [9] NAVRÁTIL, Pavel. *Automatizace: vybrané statě* [online]. 2011. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011 [cit. 2021-03-06]. ISBN 978-80-7318-935-8. Dostupné z: <https://vufind.katalog.k.utb.cz/Record/62674#details>
- [10] KŘIVOHLÁVEK, Jindřich. *Chlazení počítače: kompletní průvodce (nejen) pro hráče*. Brno: Computer Press, 2007. ISBN 978-80-251-1509-1.

- [11] Intel. *Https://www.intel.com: 3rd Gen Intel Xeon Scalable Processors* [online]. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/docs/processors/xeon/3rd-gen-xeon-scalable-processors-brief.html>
- [12] GEFORCE GTX 1080 Ti. *Https://www.nvidia.com* [online]. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://www.nvidia.com/cs-cz/geforce/10-series/>
- [13] Základní deska: MEG Z590 UNIFY. *Https://cz.msi.com* [online]. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://cz.msi.com/Motherboard/MEG-Z590-UNIFY/Overview>
- [14] Operační paměť: Kingston FURY Beast DDR3 Memory. *Https://www.kingston.com* [online]. [cit. 2021-8-1]. Dostupné z: <https://www.kingston.com/czech/en/memory/gaming/kingston-fury-beast-ddr3-memory>
- [15] SSD disk: Kingston DX500R. *Https://www.kingston.com* [online]. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://www.kingston.com/czech/en/ssd/dc500-data-center-solid-state-drive>
- [16] Počítačový zdroj: MPG A850GF. *Https://cz.msi.com* [online]. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://cz.msi.com/Power-Supply/MPG-A850GF>
- [17] Ventilátor: F8 PWM PST. *Https://www.arctic.de/en* [online]. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://www.arctic.de/en/F8-PWM-PST/ACFAN00204A>
- [18] Peltierův článek: TEC1-127060S. *Https://www.gme.cz* [online]. [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/peltieruv-clanek-tec1-12706-vigan>
- [19] KOPECKÝ, Pavel. *Materiál a konstrukce: Šíření tepla, vzduchu a vlhkosti v budovách a stavebních prvcích* [online]. 2014. Katedra konstrukcí pozemních stavební, Fakulta stavební, ČVUT v Praze: NAKLADATELSTVÍ ČVUT, 2014 [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: http://tz2.fsv.cvut.cz/vyucujici/16/oppa/124mtib_kopecky.pdf
- [20] POKORNÝ, ing Marek. *Sálání tepla* [online]. Katedra konstrukcí pozemních staveb, Fakulta stavební ČVUT v Praze, s. 8 [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/1/1-4_Salani_tepla.pdf

- [21] JIRUŠKA, Adam. *Vodní chlazení osobních počítačů*. Hradec Králové, 2017. Bakalářská práce. Univerzita Hradec Králové. Vedoucí práce Doc. RNDr. Štěpán Hubálovský, Ph.D.
- [22] KOZÁK, Petr. *CHLADICÍ SYSTÉMY POČÍTAČŮ*. Plzeň, 2015. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Ing. Petr Michalík, Ph.D.
- [23] PADUA, Lukáš. *Vzduchovody*. Plzeň, 2017. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI.
- [24] Teoretický i praktický průvodce vodním chlazením. ŠULC, Tomáš. Svět hardware [online]. 12. 8. 2013 [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <http://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/27530-teoreticky-i-prakticky-pruvodce-vodnim-chlazenim?start=3>
- [25] JANÁČOVÁ, Dagmar, Sdílení tepla, výukové materiály, UTB FAI 2020.
- [26] Nanášení teplovodivé pasty – jaký postup je ten nejlepší?. WOJTĚCH, Daniel. PCTuning [online]. 10. 12. 2013 [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <http://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/28624-nanaseni-teplovodive-pasty-jaky-postup-je-ten-nejlepsi?start=1>
- [27] Spotřeba procesorů - komplexní přehled (Q1 2003). OREL, Petr. PCTuning [online]. 7.3.2003 [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: <https://pctuning.cz/article/spotreba-procesoru-komplexni-prehled-q1-2003>
- [28] MÍKA, Vladimír, Lubomír NEUŽIL a Jiří VLČEK. *Chemickoinženýrské výpočty*. 2., opravené vyd., Na VŠCHT 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 1991. ISBN 80-7080-101-8.
- [29] JANÁČOVÁ, Dagmar. *Procesní inženýrství: transportní, fyzikální a termodynamická data : (doporučeno pro studijní program Chemie a technologie materiálů)*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 9788073189976.
- [30] ŠULC, Ivan. *ZÁKLADY AUTOMATIZACE: Automatizace a regulace* [online]. 2002. Brno: CERM, 2002 [cit. 2021-08-09]. Dostupné z: http://matlab.fei.tuke.sk/zar/subory/literatura/ZakladyAutomatizace_SVARC.pdf

- [31] JANÁČOVÁ, Dagmar a Hana CHARVÁTOVÁ. *Procesy v technice budov I: Látkové bilance* [online]. 2013. Zlín, 2013 [cit. 2021-08-09]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/38318525-Procesy-v-technice-budov-1.html>
- [32] JAHODA, M.; HOLEČEK, O.; SCHREIBEROVÁ, L. E-tabulky [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav chemického inženýrství, [cit. 2021-08-01]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/uchi/e_tabulky/index.html
- [33] <https://dratek.cz/>: Originální Vývojový kit Arduino Nano. <https://dratek.cz/> [online]. [cit. 2021-08-10]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/1474-originalni-vyvojovy-kit-arduino-nano.html>
- [34] [Dratek.cz/](https://dratek.cz/): INA219. <https://dratek.cz/> [online]. [cit. 2021-08-10]. Dostupné z: <https://navody.dratek.cz/navody-k-produktum/proudovy-snimac-ina219.html>
- [35] <https://dratek.cz/>: Mosfet520. <https://dratek.cz/> [online]. [cit. 2021-08-10]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/1155-eses-mosfet-modul-pro-jednodeskove-pocitace.html>
- [36] <https://dratek.cz/>: Relé 4 kanály 5V s optočlenem. <https://dratek.cz/> [online]. [cit. 2021-08-10]. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/2190-rele-4-kanaly-5v-s-optoclenem.html>
- [37] <https://dratek.cz/>: Teplotní senzor digitální DALLAS DS18B20. <https://navody.dratek.cz> [online]. [cit. 2021-08-10]. Dostupné z: <https://navody.dratek.cz/navody-k-produktum/teplotni-senzor-ds18b20.html>
- [38] Ůředníček, Zdeňek, Mechatronické systémy, výukové materiály, UTB FAI 2020.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

A	plocha,	$[m^2]$
a_i	koeficienty levé strany lineární diferenciální i diferenční rovnice, koeficienty mnohočlenu ve jmenovateli přenosu	
a_0	zesílení otevřeného regulačního obvodu u metody požadovaného modelu $A(\omega)$ modul frekvenčního (kmitočtového) přenosu ($A(\omega) = \text{mod}G(j\omega)$), grafické vyjádření $A(\omega) =$ amplitudová frekvenční (kmitočtová) charakteristika	
b_i	koeficienty pravé strany lineární diferenciální i diferenční rovnice, koeficienty mnohočlenu v čitateli přenosu	
C	konstanta Nusseltova kriteria,	$[1]$
C_p	měrná tepelná kapacita,	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
c_S	koeficient přenosu integrační regulované soustavy, statický činitel rychlosti e regulační odchylka, základ přirozených logaritmů	
f	obecná funkce	
g	gravitační zrychlení,	$[m \cdot s^{-2}]$
G	přenosová funkce	
Gr	Grashfovo kritérium,	$[1]$
$G(s)$	obrazový L-přenos (Laplaceův přenos)	
$G(z)$	diskrétní (obrazový) Z-přenos	
$G(j\omega)$	frekvenční (kmitočtový) přenos $(\cdot) (\cdot) (\cdot) (\cdot) (\cdot) \phi \omega \omega \omega \omega^j G j = P + jQ = A e$), grafické vyjádření $G(j\omega) =$ amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika (Nyquistova křivka) G_S přenos regulované soustavy	
G_R	přenos regulátoru	
G_{EV}	odchylkový přenos poruchy	
G_{EW}	odchylkový přenos řízení	
G_{VY}	přenos poruchy	

$G_{W/Y}$	přenos řízení	
$h(t)$	(spojitá) přechodová funkce, grafické vyjádření $h(t)$ = (spojitá) přechodová charakteristika	
$h(kT)$	diskrétní přechodová funkce, grafické vyjádření $h(kT)$ = diskrétní přechodová charakteristika	
$h_w(t)$	přechodová funkce regulačního obvodu vyvolaná žádanou veličinou $H(s)$ L-obraz (spojité) přechodové funkce, tvarovač v diskretním regulačním obvodu $H(z)$ Z-obraz diskretní přechodové funkce	
H_i	Hurwitzovy subdeterminanty ($i = 1, 2, \dots, n-1$) $i(t)$ (spojitá) impulsní funkce, grafické vyjádření $i(t)$ = (spojitá) impulsní charakteristika	
$i(kT)$	diskrétní verze impulsní funkce, grafické vyjádření $i(kT)$ = diskrétní impulsní charakteristika	
$I(s)$	L-obraz (spojité) impulsní funkce	
$I(z)$	Z-obraz diskretní impulsní funkce	
J	imaginární jednotka ($j = -1$)	
J_K	kvadratická regulační plocha	
K	zesílení regulované soustavy (řízeného systému)	
k_P	proporcionální konstanta (váha proporcionální složky, zesílení) spojitého regulátoru, proporcionální konstanta (váha proporcionální složky) diskretního regulátoru k_{Pk} kritické zesílení diskretního nebo spojitého regulátoru	
k_S	sumační konstanta (váha sumační složky) diskretního regulátoru k_D diferenční konstanta (váha diferenční složky) diskretního regulátoru kT diskretní čas	
L_d	dopravní zpoždění, indukčnost cívky	
L_o	operátor přímé L-transformace (Laplaceovy transformace)	
l	charakteristický rozměr	[m]
L	délka	[m]

L^{-1}	operátor zpětné (inverzní) L-transformace (Laplaceovy transformace) m stupeň čitatele přenosu, řád derivace nebo diference pravé strany lineární diferenciální nebo diferenční rovnice	
n	stupeň jmenovatele přenosu, řád derivace nebo diference levé strany lineární diferenciální nebo diferenční rovnice	
N	konstanta Nusseltova kriteria,	[1]
n_i	kořeny čitatele přenosu (nuly)	
Nu	Nusseltova kriterium,	[1]
p_i	kořeny jmenovatele přenosu (póly)	
pp	pásmo proporcionality	
Pr	Prandtlovo kriterium,	[1]
q_r	řád integračního členu, stupeň astaticu (typ) regulačního obvodu q_0, q_1, q_2 koeficienty vyskytující se u polynomiálního zápisu přenosu spojitého, příp. diskrétního PID regulátoru	
q	hustota tepelného toku,	[W.m ⁻²]
Q	teplo,	[J]
$Q\Box$	tepelný tok,	[W]
r	řád derivačního členu	
r_0	proporcionální konstanta (váha proporcionální složky, zesílení) spojitého regulátoru	
r_{0k}	kritické zesílení spojitého regulátoru	
r_{-1}	integrační konstanta (váha integrační složky) spojitého regulátoru r_1 derivační konstanta (váha derivační složky) spojitého regulátoru s komplexní proměnná ($s = \alpha + j\beta$), nezávisle proměnná u obrazu v L-transformaci (Laplaceově transformaci)	
t_s	(spojitý) čas	
t	teplota,	[°C]
T	perioda vzorkování	
t_0	teplota okolí,	[°C]
T_D	derivační časová konstanta	

T_i	setrvačná časová konstanta ($i = 0, 1, 2, \dots$)
T_I	integrační časová konstanta
T_k	kritická perioda kmitů
t_p	teplota povrchu, [°C]
t_r	doba regulace
T_n	doba náběhu
T_u	doba průtahu
t_{str}	střední teplota, [°C]
U	akční veličina, řídicí veličina (řízení), vstupní veličina (vstup), napětí u_H výstupní veličina z tvarovače, tj. po částech spojitá akční veličina v diskrétním regulačním obvodu
v, n	poruchová veličina (porucha)
w	žádaná veličina, nezávisle proměnná u bilineární transformace x vstupní veličina u logických obvodů
y	regulovaná veličina, výstupní veličina (výstup), výstupní veličina u logických obvodů z nezávisle proměnná u obrazu v Z-transformaci ($z = e^{sT}$)
Z	operátor přímé Z-transformace
Z^{-1}	operátor zpětné (inverzní) Z-transformace
α	reálná část komplexně proměnné s ($\alpha = \text{Re } s$), koeficient u metody požadovaného modelu, koeficient u Naslinovy metody
β	imaginární část komplexně proměnné s ($\beta = \text{Im } s$), koeficient u metody požadovaného modelu
δ	relativní tolerance regulačního pochodu
$\delta(t)$	(spojitý) Diracův jednotkový impuls
$\delta(kT)$	diskrétní Diracův jednotkový impuls
Δ	operátor dopředné difference, přesnost regulačního pochodu ∇ operátor zpětné difference
$\eta(t)$ (spojitý)	Heavisideův jednotkový skok

$\eta(kT)$	diskrétní Heavisideův jednotkový skok	
$\varphi(\omega)$	fáze frekvenčního (kmitočtového) přenosu () $\phi(\omega) = \arg G(j\omega)$, grafické vyjádření	
$\varphi(\omega) =$	fázová frekvenční (kmitočtová) charakteristika	
ξ	koeficient poměrného tlumení regulované soustavy	
κ	hodnota překmitu u metody požadovaného modelu	
τ_i	časová konstanta ($i = 0, 1, 2, \dots$)	
ω	úhlový kmitočet	
α	součinitel přestupu tepla,	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
β	teplotní součinitel objemové roztažnosti,	[K ⁻¹]
η	dynamická viskozita,	[Pa.s]
λ	součinitel tepelné vodivosti,	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ρ	hustota,	[kg.m ⁻³]
ν	kinematická viskozita,	[m ² .s ⁻¹]

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

AC	Alternative current (střídavý proud)
A/Č	analogově-číslicový převodník
arg	argument
BIOS	Basic input-output Systém (základní program výpočetní techniky)
CPU	Central processing unit (centrální procesorová jednotka)
Č/A	číslicově-analogový převodník
D	Derivační
dB	decibel
DC	Direct Current (stejnoseměrný proud)
dek	dekáda

GPU	Graphic processing unit (grafická procesorová jednotka)
HDMI	High-Definition Multimedia Interface (označení pro nekomprimovaný obraz a zvuk v digitálním formátu)
I	Integrační
IDE	Integrated development environment (integrované vývojové prostředí)
L	dopravní zpoždění
Lim	limita
Im	imaginární, imaginární část
max	maximální, maximum
mod	modul
P	Proporcionální
PC	Personal computer (osobní počítač)
PD	proporcionálně derivační regulátor
PI	proporcionálně integrační regulátor
PID	proporcionálně integračně derivační analogový (spojitý) regulátor PSD proporcionálně sumačně diferenční číslicový (diskrétní) regulátor, diskrétní regulátor PID
PWM	Pulse width modulation (pulzně šířková modulace)
Re	reálný, reálná část
SSD	Solid-state drive (polovodičový disk)
TDP	Thermal Design Power (nvržený tepelný výkon)
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Ventilátor [17]	11
Obrázek 2 - Peltierův článek [18]	12
Obrázek 3 - Rovný kanál [6]	14
Obrázek 4 - Tvarový Y kanál [6]	14
Obrázek 5 - Tvarový U kanál [6]	14
Obrázek 6 - Točený kanál [6]	14
Obrázek 7 - Základní deska MEG Z590 UNIFY [13]	16
Obrázek 8 - 3rd Gen Intel® Xeon® Scalable Processors [11]	17
Obrázek 9 - Operační paměť Kingston FURY Beast DDR3 [14]	18
Obrázek 10 - GEFORCE GTX 1080 Ti [12]	19
Obrázek 11 - SSD disk [15]	20
Obrázek 12 - Počítačový zdroj [16]	21
Obrázek 13 - Průchod vzduchu počítačem	22
Obrázek 14 - Mechanismy sdílení tepla [25]	23
Obrázek 15 - Rozdělení teploty t napříč deskou [25]	25
Obrázek 16 - Rozdělení teploty t napříč deskou [25]	27
Obrázek 17 - Prostup tepla [25]	28
Obrázek 18 - Tepelně vodivá stěna [25]	32
Obrázek 19 - Sálavost tělesa [20]	33
Obrázek 20 - Proudění a sálání	35
Obrázek 21 - Regulační obvod [9]	36
Obrázek 22 - Ventilátory	44
Obrázek 23 - Arduino Nano [33]	47
Obrázek 24 - Zapojený senzor teploty [37]	48
Obrázek 25 - Schéma navrhované soustavy	51

Obrázek 26 - Ustálené měření před nastavením regulace (4 CPU MAX, 1 ventilátor MAX)	52
Obrázek 27 - Čerpadlo	53
Obrázek 28 - Arduino	54
Obrázek 29 - Mosfet IRF520	55
Obrázek 30 - 4kanálové relé s optočlenem	56
Obrázek 31 - Regulace (4 CPU MAX, pomocí 2 ventilátorů).....	57
Obrázek 32 - Prostup tepla procesorem	58
Obrázek 33 - Složený počítač s vodním chlazením	68

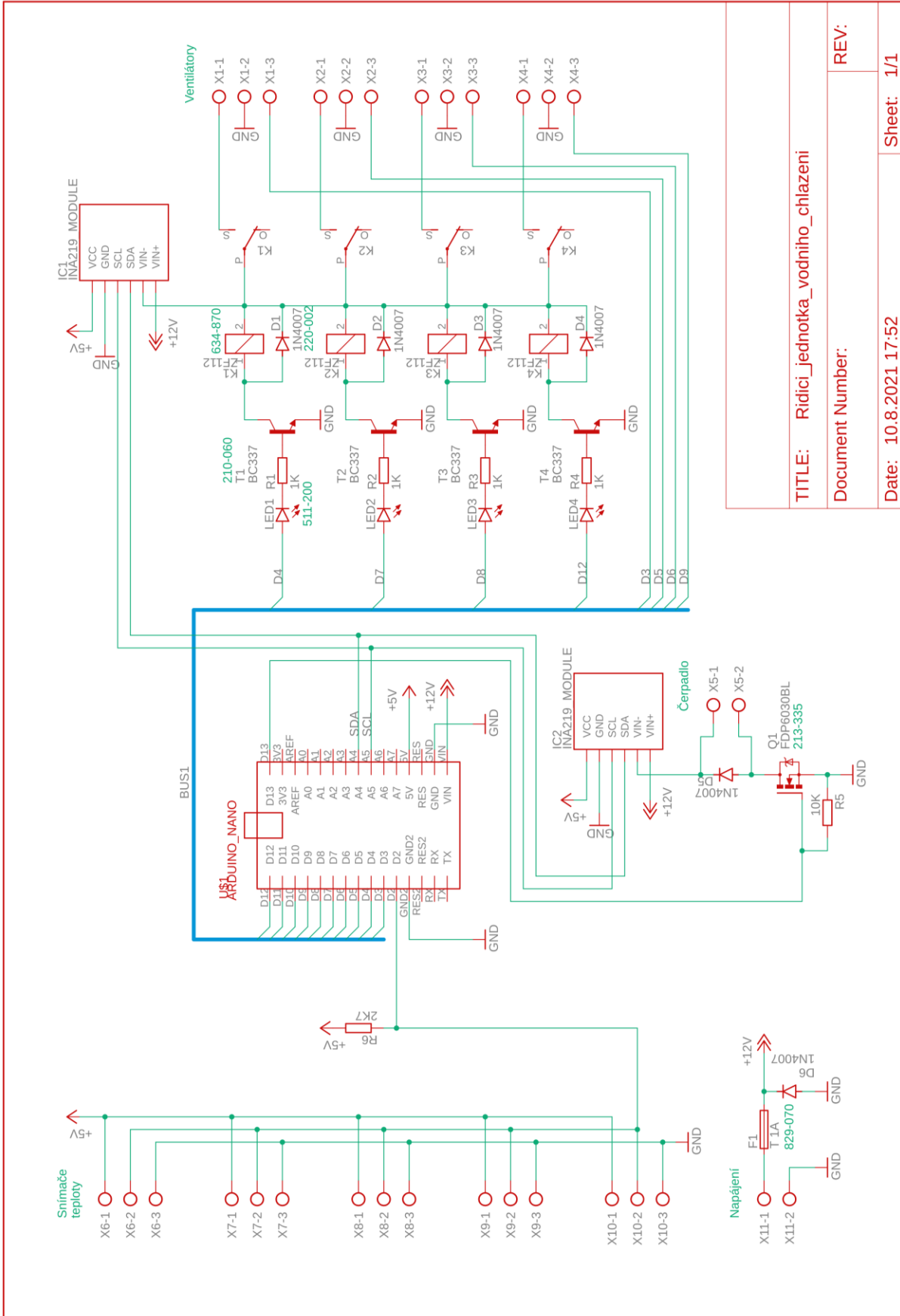
SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Vlastnosti ideálních regulátorů [9]	40
Tabulka 2 - Přenosy konvenčních analogových regulátorů použitých u metody požadovaného modelu.....	41
Tabulka 3 - Určení nastavitelných parametrů regulátoru pro metodu požadovaného modelu [9]	42
Tabulka 4 - Hodnoty pro výpočet prostupu tepla	59
Tabulka 5 - Hodnoty pro výpočet výměníku tepla ve vodním bloku	60
Tabulka 6 - Materiálové veličiny vody	60
Tabulka 7 - Hodnoty pro výpočet výměníku tepla v chladiči.....	61
Tabulka 8 - Materiálové veličiny vody a vzduchu.....	62
Tabulka 9 - Hodnoty pro výpočet výměníku tepla v chladičí věži	64

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Schéma řídicí jednotky vodního chlazení

PŘÍLOHA Č. 1 – SCHÉMA ŘÍDICÍ JEDNOTKY VODNÍHO CHLAZENÍ



TITLE: Řídicí jednotka vodního chlazení

Document Number:

REV:

Date: 10.8.2021 17:52

Sheet: 1/1

PŘÍLOHY NA CD

Program.ino

Schema_ridici_jednotky_vodniho_chlazení.sch