

Výukový modul pro předmět programování mikropočítačů: tepelná soustava s ventilátorem

Educational module for microcontrollers programming course: heating
plant with fan

Jan Paseka

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jan PASEKA
Osobní číslo: A08663
Studijní program: B 3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Informační a řídicí technologie

Téma práce: Výukový modul pro předmět Programování
mikropočítačů: tepelná soustava s ventilátorem

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte hardwarové vlastnosti vývojového kitu M68EVB908GB60 a navrhnete způsob připojení modulu tepelné soustavy s ventilátorem.
2. Proveďte hardwarový návrh modulu tepelné soustavy vybavené ventilátorem s možností řízení a monitoringu otáček a vhodným teplotním snímačem s digitálním výstupem.
3. Realizujte prototyp modulu a ověřte jeho funkci na vývojovém kitu.
4. Vytvořte podpůrné programové vybavení pro obsluhu modulu ve formě knihovny podprogramů v jazyce symbolických adres a v C jazyce.
5. Vytvořte ukázkovou aplikaci s využitím realizované knihovny podprogramů, která bude demonstrovat funkci modulu.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. FREESCALE SEMICONDUCTOR. CPU08 Central Processor Unit Reference Manual [online]. 2001. Dostupné z: www.freescale.com
2. FREESCALE SEMICONDUCTOR. HCS08 Family Reference Manual, Rev.1. [online]. 2003. Dostupné z: www.freescale.com
3. FREESCALE SEMICONDUCTOR. MC9S08GB/GT Data Sheet, Rev.2.3. [online]. 2004. Dostupné z: www.freescale.com
4. HRUŠKA, František. Senzory v systémech informatiky a automatizace. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 177 s. ISBN 978-807-3186-302.
5. JURÁNEK, Antonín a Miroslav HRABOVSKÝ. EAGLE pro začátečníky /: uživatelská a referenční příručka :. 2. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2007, 191 s. ISBN 80-730-0213-2.
6. MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy – linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky. Vyd. 1. Praha: BEN, 2003, 279 s. ISBN 80-730-0077-6.
7. SMARTEC. SMT16030 digital temperature sensor [online]. 2005. Dostupné z: www.smartec.nl

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Dostálek, Ph.D.

Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce:

24. února 2012

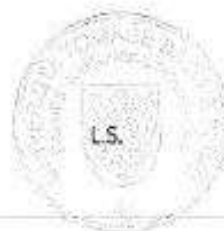
Termín odevzdání bakalářské práce:

8. června 2012

Ve Zlíně dne 24. února 2012

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

ř. ř., ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem bakalářské práce je navrhnout a vyrobit modul tepelné soustavy se spojitě nastavitelným příkonem topného rezistoru a spojitě nastavitelným napětím pro napájení chladicího ventilátoru a měřením teploty a otáček pomocí mikropočítače.

V úvodní kapitole je stručně popsán mikropočítač MC9S08GB60 řady HCS08. Následuje popis měření teploty s využitím odporových snímačů. Stručné shrnutí problematiky regulace je završen popisem návrhu regulátoru PID pomocí požadovaného modelu. V praktické části je popsáno obvodové řešení modulu tepelné soustavy s ventilátorem včetně potřebného programového vybavení. V závěru práce jsou pak popsána měření provedená na modulu a výsledky identifikace tepelné soustavy.

Klíčová slova: mikropočítač, MC9S08GB60, regulace, integrovaný snímač teploty, PWM

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis was to design and manufacture a module of a thermal system module with continuously adjustable input power of the heating resistor and continuously adjustable voltage supplying the cooling fan and with temperature measurement accomplished by a microcomputer.

The theoretical part of the thesis describes the microcomputer MC9S08GB60 of HCS08 series. Consequently, the temperature measurement using resistive sensors is described. The theoretical part is completed by a brief description of PSD controller design based on method of the required model.

The practical part of the thesis brings the design of the module electronic circuitry and also the microcomputer software ensuring the system functionality. The practical part is finalized by results of measurements made on the module and the results of identification of the thermal system.

Keywords: microcomputer, MC9S08GB60, regulation, integrated sensor of temperature, PWM

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Petru Dostálkovi, Ph.D., za cenné rady a připomínky během vypracování této práce.

Dále bych chtěl také poděkovat mému otci za rady ohledně návrhu elektronické části modulu a připomínky k programování v jazyce C během vývoje softwarové části.

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/a jsem seznámen/a 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 užit své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- 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

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 MIKROPOČÍTAČ A VÝVOJOVÝ KIT M68EVB908GB60.....	11
1.1 MIKROPOČÍTAČ MC9S08GB60	11
1.1.1 Struktura mikropočítače	11
1.1.2 Registry CPU.....	13
1.1.3 Paměť	13
1.1.4 Přerušení.....	14
1.1.5 Provozní režimy	14
1.1.6 Paralelní vstupy a výstupy	15
1.1.7 Časovače.....	15
1.1.8 A/D převodník.....	16
1.1.9 Komunikační porty.....	16
1.2 VÝVOJOVÝ KIT M68EVB908GB60	16
1.2.1 Napájení	16
1.2.2 Funkční části kitu	17
1.2.3 Uspořádání desky kitu	18
1.2.4 Konektor pro připojení experimentálního zařízení k mikropočítači	19
2 MĚŘENÍ TEPLoty	20
2.1 ODPOROVÉ SNÍMAČE TEPLoty	20
2.1.1 Kovové odporové snímače teploty	20
2.1.2 Termistory	20
2.1.3 Polovodičové monokrystalické snímače teploty	21
2.1.4 Integrované snímače s digitálním výstupem	21
3 REGULACE DYNAMICKÉHO SYSTÉMU	23
3.1 REGULAČNÍ OBVOD LINEÁRNÍ DYNAMICKÉ SOUSTAVY S JEDNÍM VSTUPEM A JEDNÍM VÝSTUPEM.....	23
3.2 IDENTIFIKACE SOUSTAVY	24
3.3 PID REGULÁTOR.....	25
3.3.1 Nastavení PID regulátoru metodou požadovaného modelu	25
3.3.2 Diskrétní PSD regulátor	26
II PRAKTICKÁ ČÁST	27
4 NÁVRH MODULU TEPELNÉ SOUSTAVY S VENTILÁTOREM.....	28
4.1 NÁVRH ZAPOJENÍ MODULU	28
4.1.1 Obvod manuálně ovládaného generátoru PWM a multiplexer	29
4.1.2 Výkonové stupně pro napájení topného rezistoru a ventilátoru	30
4.1.3 Obvod pro měření teploty.....	30
4.1.4 Obvod pro měření otáček ventilátoru	31
4.1.5 Fyzické provedení modulu	31
4.1.6 Vytápěné tepelné tělísko s topným rezistorem a snímačem teploty.....	32
4.1.7 Deska plošných spojů.....	32

5	NÁVRH PROGRAMOVÉHO VYBAVENÍ.....	33
5.1	INICIALIZACE.....	34
5.2	PROGRAM ŘÍZENÍ PERIODY VZORKOVÁNÍ	36
5.3	MĚŘENÍ TEPLoty TĚLÍSKA.....	36
5.4	MĚŘENÍ OTÁČEK VENTILÁTORU.....	38
5.5	OVLÁDÁNÍ MULTIPLEXERU	38
5.6	OVLÁDÁNÍ UŽIVATELSKÉHO ROZHRAŇÍ.....	38
5.6.1	Popis polí zobrazovací jednotky a ovládacích tlačítek.....	39
5.6.2	Ovládání zobrazovací jednotky	41
5.6.3	Vyhodnocení stisku tlačítek	41
5.6.4	Popis podprogramů knihovny	43
6	MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH A STATICKÝCH CHARAKTERISTIK MODULU.....	45
6.1	ZÁVISLOST OTÁČEK VENTILÁTORU NA ÚROVNI BUDICÍHO SIGNÁLU.....	45
6.2	STATICKÁ ZÁVISLOST TEPLoty TĚLÍSKA NA BUDICÍM SIGNÁLU TOPIDLA A OTÁČKÁCH VENTILÁTORU.....	46
6.2.1	Metoda měření a změřená data.....	46
6.2.2	Stanovení matematického modelu	47
6.3	DYNAMICKÁ ZÁVISLOST TEPLoty TĚLÍSKA NA VELIKOSTI BUDICÍHO SIGNÁLU TOPNÉHO REZISTORU	49
6.3.1	Metoda měření a změřená data.....	49
6.3.2	Identifikace soustavy	50
6.4	VOLBA PARAMETRŮ REGULÁTORU A OVĚŘENÍ JEHO FUNKCE.....	52
6.4.1	Regulace teploty pomocí výkonu topidla	52
6.4.2	Regulace teploty pomocí změny intenzity chlazení	53
6.4.3	Ověření funkce regulátoru.....	53
	ZÁVĚR	54
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	55
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	57
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	58
	SEZNAM OBRÁZKŮ	59
	SEZNAM TABULEK.....	60
	SEZNAM PŘÍLOH.....	61

ÚVOD

Rozvoj technologie výroby integrovaných elektronických prvků vedl k vytvoření situace, kdy je elektronika přítomna prakticky v každém zařízení, v němž je potřeba řešit problematiku řízení jeho chodu, regulace a komunikace s uživatelem, případně s dalšími zařízeními ve složitějších systémech. Elektronická výbava zařízení je velmi často realizována pomocí mikropočítačů. Jejich použití vede k dosažení nízké ceny, relativní jednoduchosti a značné spolehlivosti bez nutnosti významně omezovat složitost a náročnost funkcí zařízení.

Cílem bakalářské práce je navrhnout a vyrobit modul tepelné soustavy s odporovým topidlem s ventilátorem, který bude ve spojení s mikropočítačovým kitem sloužit jako výuková pomůcka k demonstraci možnosti využití mikropočítače jako řídicí jednotky tepelné soustavy. Mikropočítačový kit M68EVB908GB60 – vývojový panel – obsahuje mikropočítač MC9S08GB60 firmy Freescale.

Navržený modul a k němu náležející programové vybavení umožní manuální a mikropočítačem generované ovládání příkonu topného rezistoru topného tělíska, příkonu ventilátoru chlazení tělíska, měření teploty tělíska a měření otáček ventilátoru.

Teoretickými východisky realizace záměru jsou tři základní oblasti teoretických poznatků. Jsou to informace o uspořádání a funkci mikropočítače MC9S08GB60, informace o dostupných snímačích teploty a konečně teorie automatického řízení.

Praktická realizace modulu byla posloupností navazujících činností. Prvním krokem realizace byl návrh zapojení modulu. Po vytvoření obslužných programů byl k dispozici funkční systém, na němž byla provedena měření, na jejichž základě bylo možné formálně popsat vlastnosti systému. V závěrečné etapě činností pak byla ověřena funkce diskrétního PSD regulátoru teploty topného tělíska.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 MIKROPOČÍTAČ A VÝVOJOVÝ KIT M68EVB908GB60

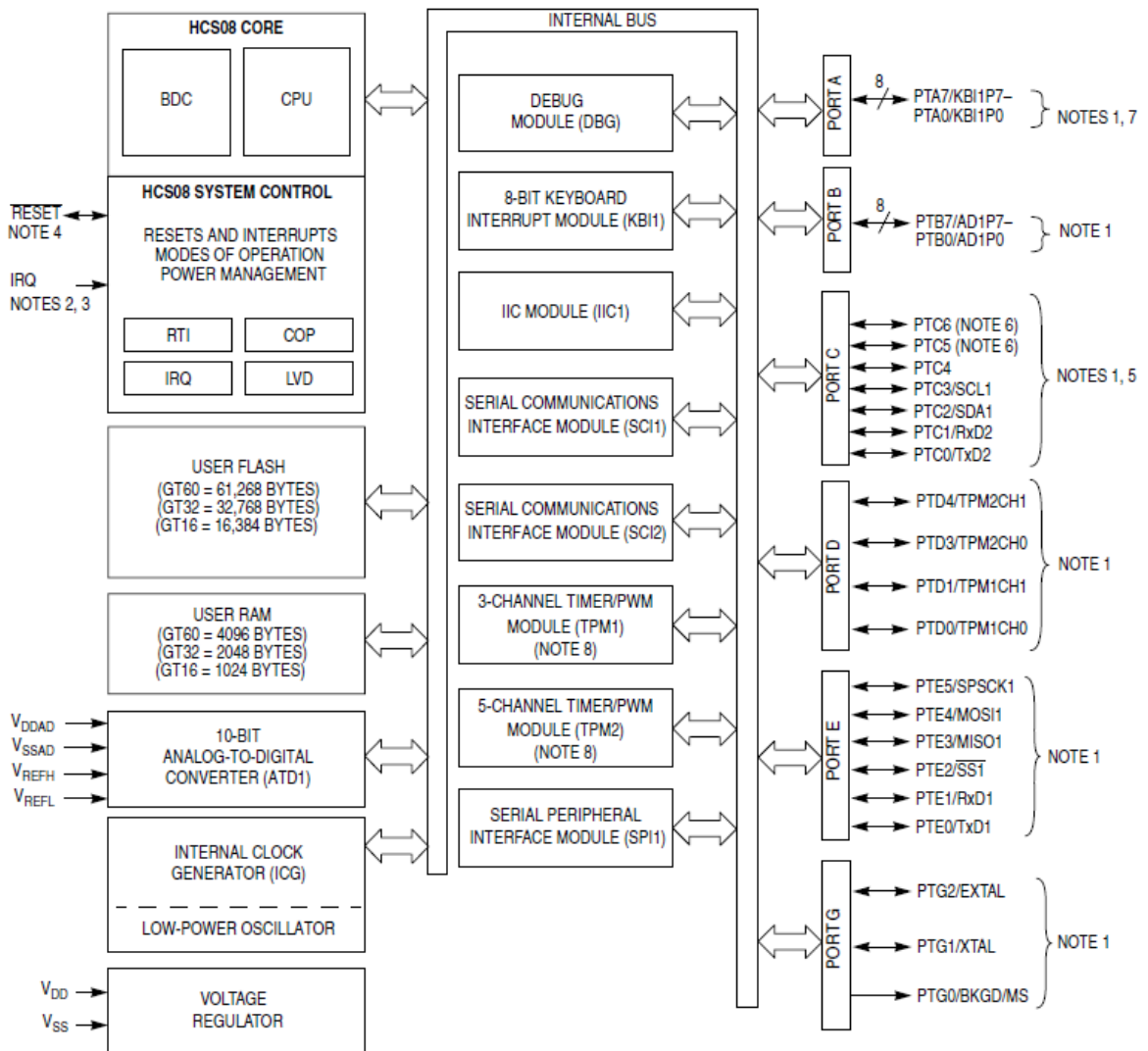
Mikropočítačový vývojový kit obsahuje integrovaný mikropočítač MC9S08GB60 firmy Freescale a podpůrné prvky pro komunikaci s uživatelem a pro připojení uživatelského hardware. Popis mikropočítače vychází z publikačních zdrojů [1] a [2].

1.1 Mikropočítač MC9S08GB60

1.1.1 Struktura mikropočítače

Struktura mikropočítače MC9S08GB60 je schematicky ukázána na Obr. 1.1. Je představitelem HCS08 8-bitových mikropočítačů s bohatým instrukčním souborem (CISC) von Neumannovy architektury.

Obsahuje 4 KB paměti RAM a 60 KB paměti FLASH. Systém vstupů a výstupů je tvořen 8 kanály 10-bitového A/D převodníku, 56 digitálními vstupy/výstupy, 8 kanály časovačů, dvěma moduly SCI pro sériovou komunikaci, sériovými rozhraními SPI a IIC. Plný počet vstupů a výstupů je k dispozici pouze v provedení v 64-vývodovém pouzdru. Některé kanály vstupů a výstupů vzájemně sdílejí vývody pouzdra.



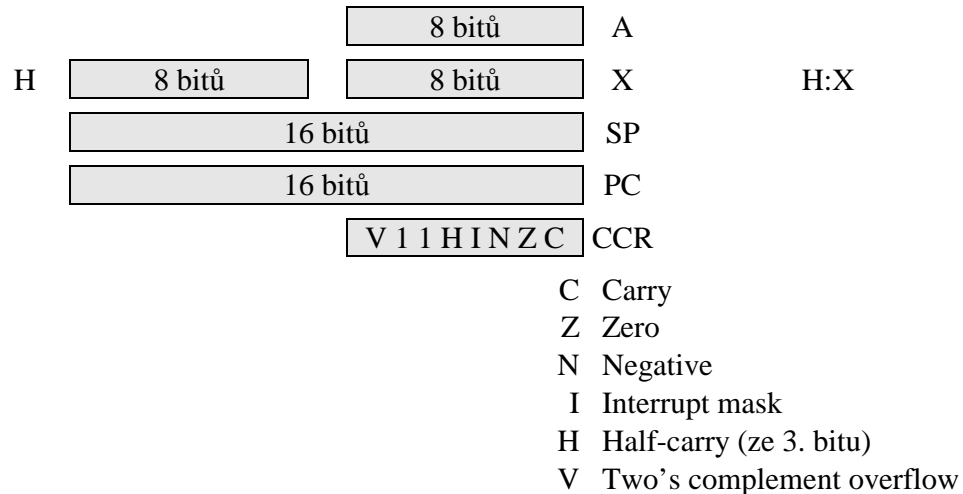
NOTES:

1. Port pins are software configurable with pullup device if input port.
2. Pin contains software configurable pullup/pulldown device if IRQ enabled (IRQPE = 1).
3. IRQ does not have a clamp diode to V_{DD} . IRQ should not be driven above V_{DD} .
4. Pin contains integrated pullup device.
5. High current drive
6. PTC[6:5] are not available on the 42-pin SDIP package.
7. Pins PTA[7:4] contain both pullup and pulldown devices. Pulldown available when KBI enabled (KBIPn = 1).
8. Only two timer channels per TPM are bonded out. All channels are available for use as software compare.

Obr. 1.1 – Blokové schéma mikropočítače MC9S08GB60

1.1.2 Registry CPU

CPU je vybavena 5 registry, jak ukazuje Obr. 1.2.



Obr. 1.2 – Registry CPU

8-bitový registr A (Accumulator) slouží zejména jako vstupní, a obvykle i výstupní, registr aritmetických a logických operací. Dvojice 8-bitových registrů H a X tvoří společně indexový registr H:X. Indexový registr je mnoha instrukcemi CPU využíván pro adresování paměti. Registr X může také sloužit jako druhý univerzální registr spolu s registrem A. 16-bitové registry SP (Stack Pointer) a PC (Program Counter) plní své obvyklé funkce ukazatele zásobníku a čítače instrukcí. Registr CCR (Condition Code Register) má délku 8 bitů. Ve svých jednotlivých bitech obsahuje příznaky výsledku právě vykonané instrukce.

1.1.3 Paměť

Mikro počítač MC9S08GB60 využívá celého adresovatelného rozsahu paměti 64 KB. Paměťový prostor je rozdělen mezi paměť RAM, FLASH a přímo adresovatelné registry. Rozvržení paměti ukazuje Tab. 1.1.

Prostor paměti od \$FFCC do \$FFFF je vyhrazen pro vektory přerušení.

Tab. 1.1 – Mapa paměti

\$0000	Direct Page Registers
\$007F	
\$0080	RAM
\$107F	
\$1080	FLASH
\$17FF	
\$1800	High Page Registers
\$182B	
\$182C	FLASH
\$FFFF	

1.1.4 Přerušování

Systém přerušování poskytuje způsob, jak při příchodu požadavku na přerušování uložit registry a stav CPU, vykonat programový kód příslušející danému zdroji přerušování a následně se vrátit k vykonávání kódu, který byl přerušován příchodem požadavku na přerušování.

V okamžiku přijetí požadavku na přerušování je nastaven bit I registru CCR na hodnotu 1. Tím je zabráněno přijetí dalšího přerušování v době, kdy obsluha přerušování již probíhá. Za normálních okolností je pak bit I nastaven na hodnotu 0 při obnově registrů v okamžiku návratu k běhu přerušovaného programu na konci obsluhy přerušování.

Přerušování může být vyvoláno programově, instrukcí SWI, nebo v důsledku přijetí požadavku na přerušování od některé periferie mikropočítače. Vstupy mikropočítače, případně čítače, mohou být zdroji požadavku na přerušování, je-li tato jejich funkce programově povolena zápisem příslušného kódu na příslušnou adresu v prostoru přímo adresovatelných registrů (Direct Page Registers).

Každý ze zdrojů přerušování má vyhrazeno místo v prostoru vektorů přerušování, na němž očekává adresu podprogramu své obsluhy.

1.1.5 Provozní režimy

Mikropočítač MC9S08GB60 může být uveden do jednoho z pěti provozních režimů. Běžnému provozu mikropočítače odpovídá režim Run (Run Mode).

Vykonáním instrukce WAIT je mikropočítač uveden do režimu Wait (Wait Mode). V tomto režimu jsou zastaveny hodinové impulzy a mikropočítač je uveden do stavu nízké spotřeby. Systém přerušování zůstává aktivní. Po příchodu požadavku na přerušování mikropočítač přechází zpět do normálního provozního režimu (Run Mode).

Vykonáním instrukce STOP je mikropočítač uveden, podle nastavení, do jednoho ze tří stavů Stop. Ze stavu Stop lze mikropočítač vyvést pouze Restartem. Význam Stop stavů spočívá v minimalizaci spotřeby energie při uchování stavu jeho podsystémů. Rozsah uchování stavu je minimální v režimu Stop 1, kdy je rovněž minimální příkon mikropočítače.

1.1.6 Paralelní vstupy a výstupy

Mikropočítač je vybaven sedmi univerzálními vstupně / výstupními porty. Každý z pinů těchto portů může být nezávisle naprogramován jako vstupní nebo výstupní. Porty C a F snesou zvýšené proudové zatížení. Vstupní porty mohou mít aktivován tzv. Internal Pullup Control (připojení rezistoru mezi vstupní port a kladné napájecí napětí). Některé výstupní porty mohou mít aktivován tzv. Slew Rate Control (řízení rychlosti přeběhu).

Piny některých portů jsou sdíleny s jinými vstupy nebo výstupy mikropočítače.

1.1.7 Časovače

Mikropočítač je vybaven dvěma časovači. Časovač TPM1 obsahuje tři kanály a časovač TPM2 pět kanálů. Každý z kanálů může být naprogramován jako vstupní nebo výstupní. Možné režimy funkce jsou uvedeny v tabulce Tab. 1.2.

Tab. 1.2 – Režimy funkce časovače

Vstup	Zachycení jen při nástupné hraně	
	Zachycení jen při sestupné hraně	
	Zachycení při nástupné i sestupné hraně	
Výstup	Srovnávání	Jen programové srovnávání
		Změna výstupu při srovnání
		Nulování výstupu při srovnání
		Nastavení výstupu při srovnání
	PWM	Zarovnání podle hrany
		Zarovnání na střed

Časovače mohou generovat požadavky na přerušení jak při přetečení, tak při výskytu události na vstupu časovače.

Vývody časovačů jsou sdíleny s porty D.

1.1.8 A/D převodník

Pro měření analogových napětí je u mikropočítače k dispozici 8-kanálový A/D převodník s postupnou aproximací. Převodník může být naprogramován jako 8-bitový nebo 10-bitový. Doba převodu je 14,0 μ s (10 bitů, frekvence řízení převodu 2 MHz). Rozsah měřeného napětí je dán rozdílem vnějších napětí VREFH a VREFL. Převodník může generovat požadavek na přerušení v okamžiku dokončení převodu. Výběr měřeného kanálu se provádí programově.

Vstupy jednotlivých kanálů jsou sdíleny s portem B.

1.1.9 Komunikační porty

Mikropočítač je vybaven dvěma nezávislými sériovými komunikačními rozhraními SCI (Serial Communication Interface). Tato rozhraní dovolují komunikaci např. s PC prostřednictvím rozhraní RS232. Může se dosáhnout celkové délky 15 metrů, při nižších rychlostech až 50 metrů. Může přenášet až 115200 b/s.

Pro synchronní sériovou komunikaci v režimu Master nebo Slave slouží rozhraní SPI (Serial Peripheral Interface) dovolující duplexní komunikaci s kompatibilním zařízením.

Sériovou komunikaci mezi více integrovanými obvody umožňuje kanál IIC (Inter-Integrated Circuit Module). IIC dosahuje vysoké rychlosti až 100 Kb/s.

Vývody signálů komunikačních portů jsou sdíleny s portem C a E.

1.2 Vývojový kit M68EVB908GB60

1.2.1 Napájení

Vývojový kit (panel) je napájen z externího zdroje napětí 9 V. Toto napětí je na desce sníženo dvěma stabilizátory na 5 V a 3,3 V. Pro napájení mikropočítače a jeho podpůrných obvodů slouží napětí 3,3 V. 5 V napájecího napětí se využívá jen pro obvody zobrazovací jednotky. Na desce je umístěn vypínač zařazený v přívodu vnějšího napájecího napětí.

Na konektoru MCU_PORT pro připojení experimentálního zařízení je k dispozici napětí 3,3 V.

1.2.2 Funkční části kitu

Kit obsahuje řadu funkčních částí. Hlavní funkční částí je samotný mikropočítač.

Přímo na desce jsou pro komunikaci s mikropočítačem k dispozici tlačítka Reset, IRQ a tlačítka SW1 až SW4 využitelná programově. Součástí kitu je rovněž LCD zobrazovací jednotka umožňující zobrazit dva řádky textu po 16 znacích. Ve funkci programově dostupných indikátorů lze použít svítivé diody LED1 až LED4.

Pro připojení vnějších zařízení slouží dvojice konektorů Canon RS232 portů COM1 a COM2. Port 422_485 je vyveden na svorkovnici. Je spojen s portem SCI2 mikropočítače a je kompatibilní s protokoly RS485 a RS422.

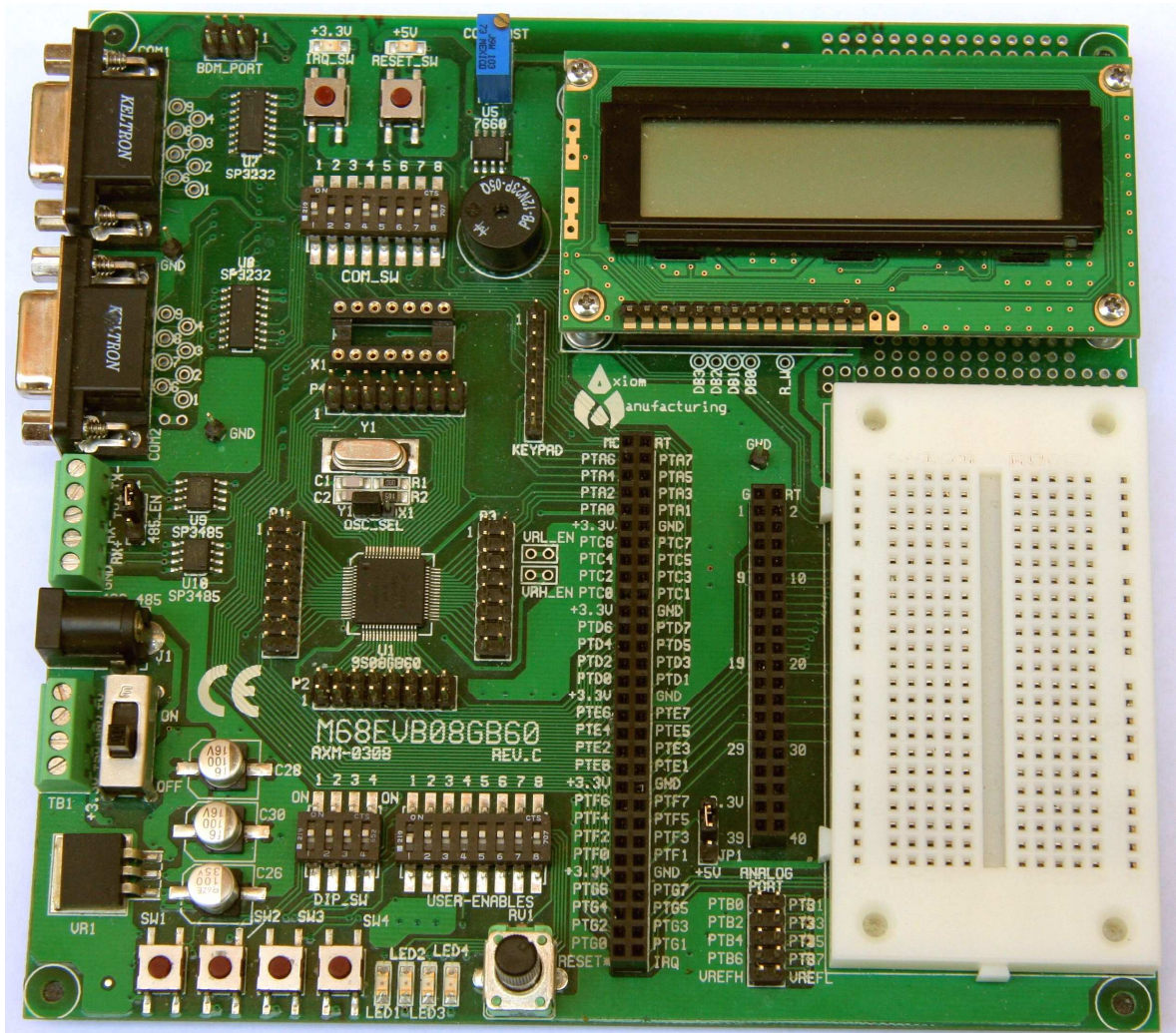
Standard RS232 definuje asynchronní sériové rozhraní pro přenos dat. K reprezentaci logické 0 a 1 se využívá napěťových úrovní 5 V, 10 V, 12 V nebo 15 V. Nejčastěji se používá varianta, při které logické hodnotě 1 odpovídá napětí -12 V a logické hodnotě 0 pak $+12$ V. Základními vodiči jsou GND, RxD (příjem) a TxD (vysílání). Volitelně mohou být využity další vstupní signály DCD (Data Carrier Detect), DSR (Data Set Ready), CTS (Clear To Send), RI (Ring Indicator) a výstupní signály DTR (Data Terminal Ready), RTS (Request To Send). Maximální přenosová rychlost bývá 115200 b/s. Délka vedení bývá do 15 až 20 m.

Standard RS485 sériové komunikace je navržen pro realizaci poloduplexního dvou vodičového vícebodového (až 32 zařízení) spoje. Má stejný základ jako RS232. Fyzicky se liší tím, že pro každý signál se využívá krouceného páru vodičů (tzv. Balanced data transmission, Differential voltage transmission). Delší vedení by na obou koncích měla být opatřena zakončovacími odpory 110Ω , délka vedení může dosahovat až 1200 m. Tento typ spojení dovoluje dosáhnout přenosových rychlostí až 10 Mb/s (pro vzdálenosti do 10 m). Čtyřvodičové linky implementující obousměrnou komunikaci bez vypínání výstupního kanálu bývají označovány jako RS422.

Podstatnou součástí kitu je konektor MCU_PORT pro připojení vnějšího experimentálního zařízení. Konektor je umístěn v blízkosti nepájivého propojovacího pole.

1.2.3 Uspořádání desky kitu

Uspořádání kitu je ukázáno na Obr. 1.3. Celkové rozměry desky jsou 15,25 mm x 15,75 mm (6" x 6,2"). Deska je opatřena pryžovými nožičkami.



Obr. 1.3 – Uspořádání vývojového kitu M68EVB908GB60

Konektory komunikačních portů a konektor přívodu napájení jsou umístěny na levém okraji desky. Vpravo nahoře je panel zobrazovací jednotky, pod ním 60-vývodový konektor MCU_PORT pro připojení experimentálního zařízení a nepájivé kontaktní pole. U dolního okraje desky vlevo jsou umístěna čtyři tlačítka (SW1 až SW4) a signalizační svítivé diody (LED1 až LED4).

1.2.4 Konektor pro připojení experimentálního zařízení k mikropočítači

Pro připojení experimentálního zařízení k vývojovému kitu slouží 60-vývodový konektor označený v dokumentaci kitu jako MCU_PORT. Funkce jednotlivých vývodů je uvedena v tabulce Tab. 1.3.

Tab. 1.3 – Signály na vývodech konektoru MCU_PORT

1	PTA6 / KBD6	2	PTA7 / KBD7
3	PTA4 / KBD4	4	PTA5 / KBD5
5	PTA2 / KBD2	6	PTA3 / KBD3
7	PTA0 / KBD0	8	PTA1 / KBD1
9	3,3 V	10	GND
11	PTC6	12	PTC7
13	PTC4 / CLKOUT	14	PTC5
15	PTC2 / SDA	16	PTC3 / SCL
17	PTC0 / TXD2	18	PTC1 / RXD2
19	3,3 V	20	GND
21	PTD6 / TPM2CH3	22	PTD7 / TPM2CH4
23	PTD4 / TPM2CH1	24	PTD5 / TPM2CH2
25	PTD2 / TPM1CH2	26	PTD3 / TPM2CH0
27	PTD0 / TPM1CH0	28	PTD1 / TPM1CH1
29	3,3 V	30	GND
31	PTE6	32	PTE7
33	PTE4 / MOSI	34	PTE5 / SPCK
35	PTE2 / SS	36	PTE3 / MISO
37	PTE0 / TXD1	38	PTE1 / RXD1
39	3,3 V	40	GND
41	PTF6	42	PTF7
43	PTF4	44	PTF5
45	PTF2	46	PTF3
47	PTF0	48	PTF1
49	3,3 V	50	GND
51	PTG6	52	PTG7
53	PTG4	54	PTG5
55	PTG2 / EXTAL	55	PTG3
57	PTG0 / BGND / MS	58	PTG1 / XTAL
59	RESET	60	IRQ

2 MĚŘENÍ TEPLOTY

Měření teploty patří v průmyslové praxi k velmi frekventovaným případům měření neelektrických veličin. Pro měření teploty se využívá řada fyzikálních principů. Tepelné vyzařování předmětů lze snímat radiačními pyrometry. Pro kontaktní měření se používají termočlánky využívající termoelektrického jevu na spojení dvou kovů nebo jejich slitin (NiCr-Ni, PtRh-Pt, Fe-Ko a další) nebo snímače odporové.

2.1 Odporové snímače teploty

Ve většině případů měření teploty v rozsahu od asi $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do několika set $^{\circ}\text{C}$ se používají kontaktní odporové teploměry. Využívají teplotní závislosti měrného odporu kovů a polovodičů.

2.1.1 Kovové odporové snímače teploty

Nejčastěji užívanými kovy pro konstrukci odporových snímačů jsou platina, zlato, stříbro, měď, železo a nikl. Závislost odporu na teplotě a teplotní rozsah je pro některé kovy uveden v Tab. 1.4 převzaté z [3]. Tato publikace byla použita při popisu odporových snímačů a jejich vlastností s výjimkou podkapitoly 2.1.4.

Tab. 1.4 – Závislost odporu na teplotě některých kovů

Kov	Teplotní součinitel odporu	Rozsah teplot
	$100\ \alpha_R\ [\text{K}^{-1}]$	$[^{\circ}\text{C}]$
Pt	0,385 – 0,391	-20 až +850
Ni	0,617 – 0,675	-70 až +150 (+200)
Cu	0,426 – 0,433	-50 až +150

2.1.2 Termistory

Dalším typem prvků s výrazně teplotně závislým odporem jsou termistory. Jsou vyráběny z oxidů kovů (Mn, Co, Ni, Cu, Ti,...) práškovou metalurgií. Teplotní součinitel odporu termistorů bývá asi o řád vyšší než u kovů.

Termistory se záporným teplotním součinitelem odporu se nazývají negastory (NTC). Rozsah pracovních teplot bývá od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotní součinitel odporu u nich nabývá hodnot od $0,03\text{ K}^{-1}$ po $-0,06\text{ K}^{-1}$.

Termistory s kladným teplotním součinitelem odporu se nazývají pozistory (PTC). Rozsah teplot bývá od 60 °C do 180 °C. Teplotní součinitel odporu je téměř konstantní v celém rozsahu teplot a jeho střední hodnota se pohybuje kolem 0,01 K⁻¹.

2.1.3 Polovodičové monokrystalické snímače teploty

Polovodičové monokrystalické snímače teploty jsou nejčastěji zhotovovány z germania, křemíku a india a jejich slitin.

V průmyslové praxi je nejpoužívanější Si snímač. Je vhodný k měření teploty v rozsahu od -55 °C do +150 °C. Snímač je založen na nevlastním polovodiči typu N, s dominantní elektronovou vodivostí. Typickými představiteli křemíkových monokrystalických snímačů jsou čidla řady KT a KTY. Teplotní součinitel odporu je téměř konstantní v celém rozsahu teplot a jeho střední hodnota se pohybuje kolem 0,01 K⁻¹. Linearita polovodičových snímačů je lepší než u NTC, ale horší než u kovů. Jsou stabilní, dosahují poměrně malého teplotního driftu kolem 0,2 K po 10000 hodinách provozu.

Pro vyšší rozsah teplot od -100 °C do +450 °C se používá snímač slitiny křemíku a uhlíku (SiC). Snímač se vyrábí tenkovrstvou technologií vysokofrekvenčním napařováním na substrát Al₂O₃.

2.1.4 Integrované snímače s digitálním výstupem

U integrovaných snímačů teploty tvoří vlastní snímač teploty a elektronický obvod jeden celek. V současné době jsou na trhu monolitické snímače teploty s číslicovým výstupem s konverzí na impulzní šířkovou modulaci (PWM), se zabudovaným A/D převodníkem.

Prvním zástupcem tohoto typu snímače je snímač DS18B20 od firmy Maxim Semiconductor. Umožňuje komunikaci po sběrnici. Konstrukční nevýhodou tohoto snímače je, že se vyrábí pouze v pouzdře TO-92, což komplikuje mechanické upevnění na měřené těleso. [11]

Druhým představitelem integrovaných snímačů je STM160-30 od firmy TEC. [10] Vyrábí se v pouzdře TO-220, které dovoluje snadnou montáž na povrch měřeného tělesa. Pouzdro má tři vývody. Dva z vývodů slouží pro připojení napájení, zem a +5 V, na třetím vodiči je k dispozici signál PWM o jmenovité frekvenci 4 kHz. Napájecí napětí se smí pohybovat v mezích od 4,75 V do 7 V, odběr snímače z napájecího zdroje je maximálně 200 μA.

Snímač umožňuje měřit teplotu s přesností 0,7 °C na rozsahu –30 °C až +100 °C a s přesností 1,2 °C na rozsahu –45 °C až +130 °C. C-MOS výstup snímače umožňuje připojení až na vzdálenost 20 m.

Měřená teplota ϑ se určí ze střídy s výstupního signálu podle vztahu

$$\vartheta = (s - 0,320) / 0,00470 \quad (1)$$

3 REGULACE DYNAMICKÉHO SYSTÉMU

V teorii řízení se systémem rozumí soustava souvisejících prvků tvořících celek, který plní nějakou funkci. Jeho interakce s okolím je zprostředkována množinou vstupů a množinou výstupů. Obsahuje-li systém prvky schopné akumulovat energii, popřípadě paměť, hovoříme o dynamickém systému. Časový průběh veličin na výstupech dynamického systému závisí na aktuálních hodnotách veličin na vstupech systému a na jeho vnitřním stavu. Chování systému může být ovlivněno tzv. poruchovými veličinami.

Regulací dynamického systému se rozumí automatické cílené působení na dynamický systém vedoucí k dosažení požadovaného chování systému. Technickým prostředkem plnícím tuto funkci je regulátor. Charakteristickým rysem procesu automatické regulace je přítomnost záporné zpětné vazby. Regulátor porovnává výstupy systému s požadovanými hodnotami výstupních veličin a generuje vstupní veličiny systému tak, aby se výstupy systému přiblížily hodnotám požadovaným.

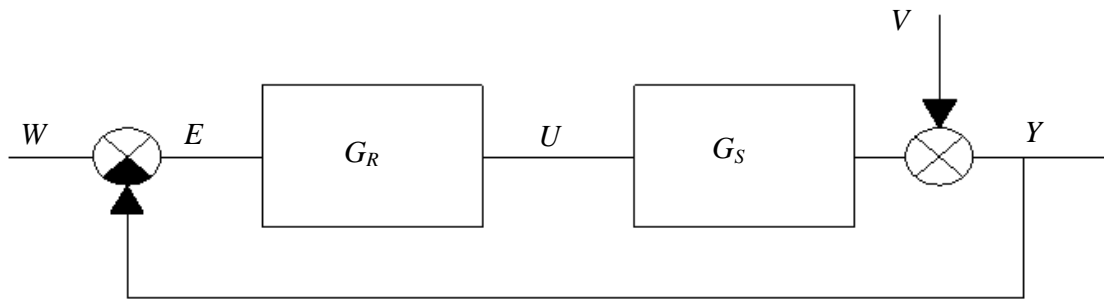
Dynamické systémy bývají dále klasifikovány jako lineární a nelineární, spojité nebo diskrétní, systémy s jedním nebo více vstupy a výstupy a podobně.

3.1 Regulační obvod lineární dynamické soustavy s jedním vstupem a jedním výstupem

Jednoduchým typem regulované soustavy je lineární dynamická soustava s jedním vstupem a jedním výstupem. Chování takové soustavy může být popsáno jejím přenosem $G_S(s)$. Přenos je definován jako podíl Laplaceova obrazu $Y(s)$ časového průběhu $y(t)$ výstupu systému a Laplaceova obrazu $U(s)$ časového průběhu $u(t)$ vstupu systému

$$G_s = \frac{L\{y(t)\}}{L\{u(t)\}} = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (2)$$

Regulační obvod soustavy je zobrazen na Obr. 1.4. V blokovém schématu je Y výstup soustavy, V poruchová veličina, U akční zásah, E regulační odchylka, W požadovaná hodnota, $G_R(s)$ přenos regulátoru a $G_S(s)$ přenos soustavy.



Obr. 1.4 – Regulační obvod soustavy s jedním vstupem a jedním výstupem

Přenos otevřené smyčky je

$$G_0(s) = G_R(s) \cdot G_S(s) \quad (3)$$

Přenos řízení je vyjádřen vztahem

$$G_{wy} = \frac{Y(s)}{W(s)} = \frac{G_0(s)}{1 + G_0(s)} \quad (4)$$

Přenos poruchy má tvar

$$G_{wE}(s) = \frac{E(s)}{W(s)} = \frac{1}{1 + G_0(s)} \quad (5)$$

3.2 Identifikace soustavy

Identifikace soustavy je postup, který vede k určení struktury a parametrů formálního popisu chování soustavy. Identifikace vychází z měření a analytického rozboru některé z charakteristik soustavy.

Užívanými charakteristikami soustavy jsou časové odezvy na definovaný vstupní signál. Impulzová charakteristika $i(t)$ je časovým průběhem výstupu soustavy, na jejíž vstup byl zaveden Diracův impulz $\delta(t)$. Přechodová charakteristika $h(t)$ je odezvou soustavy na jednotkový skok $\sigma(t)$, Heavisideovu funkci.

Přenos soustavy je také možno nalézt analýzou její amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky (Bodeho frekvenční charakteristiky).

Jednou z často užívaných metod identifikace statických soustav je metoda navržená prof. Vladimírem Strejcem. [4]

Metoda je založena na analýze přechodové charakteristiky soustavy. Na základě posouzení podílu doby průtahu a doby náběhu je v rámci této metody rozhodnuto, zda má být k aproximaci přechodové charakteristiky soustavy použito soustavy 2. řádu se dvěma časovými konstantami.

$$G_S(s) = \frac{K_S}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (6)$$

nebo soustavy vyššího než prvního řádu s jednou časovou konstantou

$$G_S(s) = \frac{K_S}{(Ts + 1)^n}; \quad n \geq 2 \quad (7)$$

3.3 PID regulátor

K nejčastěji užívaným regulátorům v průmyslové praxi patří regulátor PID. Je klasickým spojitým regulátorem s pevně danou strukturou. Akční zásah generovaný tímto regulátorem obsahuje proporcionální (P), integrační (I) a derivační (D) složku.

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) \quad (8)$$

$$u_p(t) = r_0 e(t) \quad (9)$$

$$u_i(t) = r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (10)$$

$$u_d(t) = r_1 \frac{de(t)}{dt} \quad (11)$$

Přenos PID regulátoru je tak možné zapsat ve tvaru

$$G_R(s) = r_0 \left(1 + \frac{1}{\frac{r_0}{r_{-1}} s} + \frac{r_1}{r_0} s \right) = K_R \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (12)$$

3.3.1 Nastavení PID regulátoru metodou požadovaného modelu

Pro nastavení parametrů PID regulátoru byla navržena řada metod. [5]

Pro soustavu s přenosem podle (6) se jeví jako jednoduchá a efektivní metoda vycházející s požadovaného tvaru přenosu řízení, který bude mít pro tento typ soustavy tvar

$$G_{wy} = \frac{1}{T_w s + 1} \quad (13)$$

kde T_w je zvolená požadovaná časová konstanta odezvy řízené soustavy na jednotkový skok žádané hodnoty. Metoda předepíše parametry regulátoru vztahy

$$K_R = \frac{T_1 + T_2}{K_S T_w} \quad (14)$$

$$T_i = T_1 + T_2 \quad (15)$$

$$T_d = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} \quad (16)$$

3.3.2 Diskrétní PSD regulátor

Pro periody vzorkování T_0 mnohem menší než časové konstanty soustavy je možno nahradit PID regulátor regulátorem PSD. Akční zásah PSD regulátoru pak bude dán výrazem

$$u(kT_0) = K_R \left[e(kT_0) + \frac{T_0}{T_i} \sum_{i=0}^k e(iT_0) + \frac{T_d}{T_0} [e(kT_0) - e((k-1)T_0)] \right] + u(0) \quad (17)$$

Přepisem do diferenčního tvaru dostaneme alternativní vyjádření řídicího zákona ve tvaru

$$\begin{aligned} \nabla u(kT_0) &= u(kT_0) - u((k-1)T_0) = \\ &= K_R \left[\left(1 + \frac{T_0}{T_i} + \frac{T_d}{T_0} \right) e(kT_0) - \left(1 + 2\frac{T_d}{T_0} \right) e((k-1)T_0) + \frac{T_d}{T_0} e((k-2)T_0) \right] \end{aligned} \quad (18)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 NÁVRH MODULU TEPELNÉ SOUSTAVY S VENTILÁTOREM

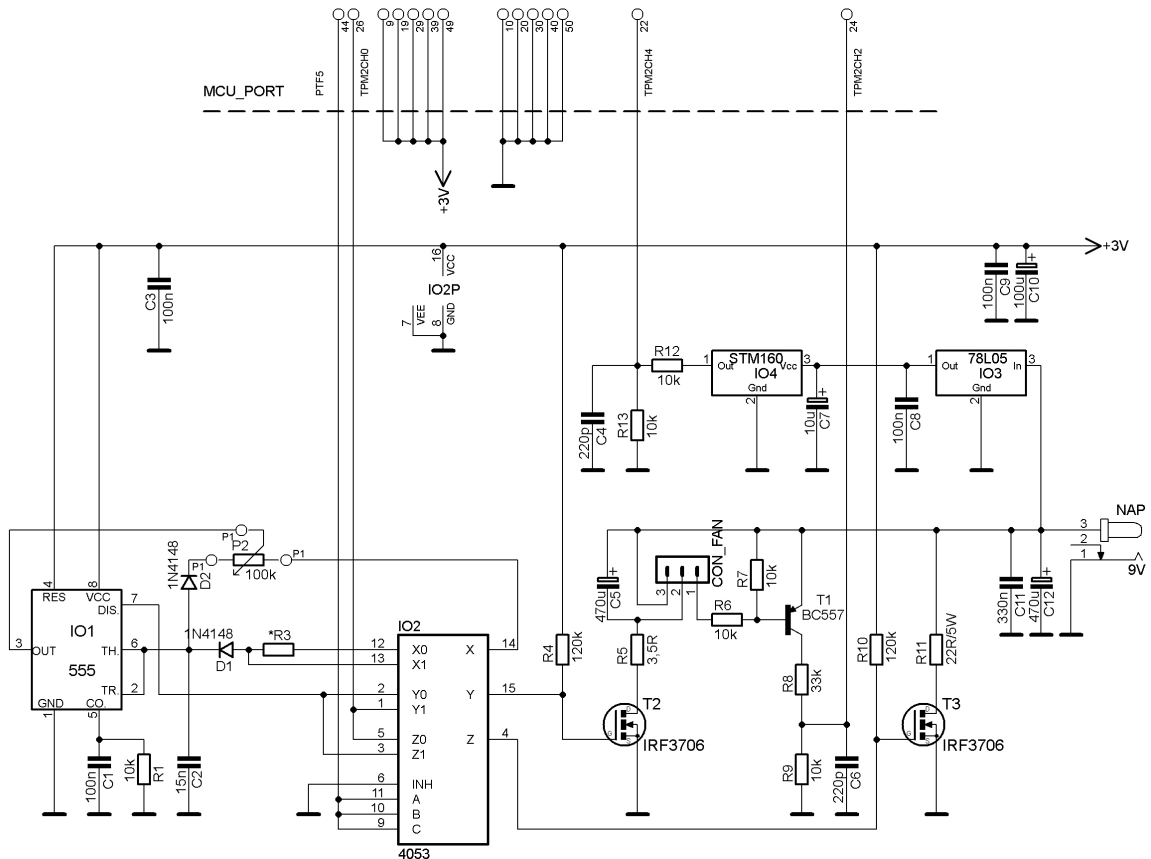
Při návrhu modulu tepelné soustavy s ventilátorem se vycházelo z omezení maximální možné velikosti desky plošných spojů modulu 80 x 100 mm a z omezené proudové zatížitelnosti napájecího zdroje. Pro vytápění tepelného tělíska byl zvolen keramický rezistor o hodnotě 22 Ω . Pro chlazení tělíska byl použit ventilátor KDE1204PFV1 s maximálním napájecím napětím 12 V. Proudový odběr topného rezistoru je asi 0,41 A, proudový odběr ventilátoru je menší než 0,1 A. Proudová zatížitelnost vnějšího napájecího zdroje kitu je 1,1 A a poskytuje tak dostatečnou rezervu pro napájení kitu a dalších obvodů modulu tepelné soustavy.

Modul obsahuje výkonové zesilovače s tranzistory MOSFET IRF3706 [8] pro napájení topného rezistoru a pro napájení ventilátoru. Výkonové stupně spínají napájecí napětí 9 V. Pro buzení výkonových stupňů se využívá budicích pulzních signálů s šířkovou modulací (PWM). Jedním zdrojem budicího signálu je generátor PWM s integrovaným časovačem NE555 [6]. Střídá jím generovaných pulzů je řízena potenciometrem. Druhým zdrojem budicího PWM signálu je časovač vývojového kitu. Pro přepínání obou budicích signálů mezi vstupy výkonových zesilovačů je použit integrovaný analogový multiplexer 74HC4053 [7]. Modul obsahuje také obvody pro napěťové přizpůsobení výstupních signálů snímače teploty a snímače otáček ventilátoru vstupům vývojového kitu.

Ovládání modulu je prováděno jednak manuálně potenciometrem, jednak prostřednictvím vývojového kitu vybaveného vhodným programem. Pro interakci ovládacího programu s uživatelem je využito ovládacích tlačítek, zobrazovací jednotky a LED indikátorů, jež jsou součástí vývojového kitu.

4.1 Návrh zapojení modulu

Schéma zapojení modulu je ukázáno na Obr. 2.1. Ze schématu je patrné, že obvod je tvořen několika funkčními bloky.



Obr. 2.1 – Schéma zapojení modulu tepelné soustavy s ventilátorem

Pro napájení celého modulu je použito napětí 9 V a 3,3 V. Zvláštním kabelem přivedené napětí 9 V přímo využívají výkonové zesilovače. Na desce modulu je toto napětí sníženo integrovaným stabilizátorem 78L05 [9] (IO3) na napětí 5 V potřebné pro napájení integrovaného snímače teploty STM160 (IO4). Obvod NE555 (IO1) a multiplexer 4053 (IO2) jsou napájeny napětím 3,3 V přivedeným do modulu přes konektor MCU_PORT.

4.1.1 Obvod manuálně ovládaného generátoru PWM a multiplexer

Obvod manuálně ovládaného generátoru PWM je tvořen integrovaným časovačem IO1, rezistory R1 a R3, kondenzátory C1 a C2, diodami D1 a D2 a ovládacím potenciometrem P2. Princip činnosti obvodu spočívá v periodickém nabíjení a vybíjení kondenzátoru C2 napětím z výstupu (OUTPUT - vývod 3) časovače. Kondenzátor je nabíjen přes diodu D1 a příslušnou část odporové dráhy potenciometru a vybíjen přes diodu D2 a doplňkovou část odporové dráhy potenciometru. Nabíjení a vybíjení je řízeno pomocí vnitřního komparátoru integrovaného obvodu (THRESHOLD – vývod 6 a TRIGGER – vývod 2). Rezistor R1 poněkud snižuje vnitřní řídicí napětí komparátorů a tím i hysterezi. Tato úprava vedla k mírnému rozšíření pásma regulace. Kondenzátor C1 plní filtrační, blokovací funkci. Rezistor

R3 je do obvodu zařazen multiplexerem tehdy, kdy je časovač používán k buzení výkonového stupně pro napájení ventilátoru. Zajišťuje spolehlivý chod i rozběh ventilátoru při nastavení ovládacího potenciometru na minimum. Experimentálně byla nalezena jeho vhodná hodnota 19,2 k Ω (ve schématu je odpor označen hvězdičkou).

Frekvence impulzů generátoru se poněkud mění se střídou pulzů od 610 Hz do 695 Hz

Výstupem generátoru PWM je kolektor spínacího tranzistoru (DISCHARGE - vývod 7).

Analogový multiplexer je tvořen integrovaným obvodem IO2. Je řízen přímo signálem PTF5 mikropočítače (vývod 44 konektoru MCU_PORT). Podle logické úrovně přepíná výstup s IO1 a výstup PWM z časovače TPM2CH0 mikropočítače (vývod 26 konektoru MCU_PORT) na hradla polem řízených tranzistorů T2 a T3 výkonových zesilovačů. Multiplexer rovněž zařazuje do obvodu nebo z obvodu vyřazuje rezistor R3.

4.1.2 Výkonové stupně pro napájení topného rezistoru a ventilátoru

Oba výkonové stupně pracují s MOSFET tranzistorem IRF3706. Výrobce tranzistoru zaručuje velikost spínacího napětí hradla v rozsahu od 0,6 V do 2,0 V. Odpor kanálu DS v sepnutém stavu nepřekročí 11 m Ω . Výrobce zaručené maximální napětí U_{DS} je 20 V. Maximální povolený trvalý proud kanálem DS je 54 A.

Budicí signál PWM je u obou zesilovačů zaveden na hradlo tranzistoru, které je připojeno ještě na napětí 3,3 V přes rezistor 120 k Ω zajišťující správnou funkci i při buzení z “otevřeného kolektoru“ na vývodu DISCHARGE časovače NE555. Vývody S polem řízených tranzistorů jsou připojeny na společnou zem napájení.

Tranzistor T3 slouží jako výkonový zesilovač pro napájení topného rezistoru R11. Rezistor R11 je jedním vývodem připojen na kladné napájecí napětí 9 V a druhým na vývod D tranzistoru T3.

Ventilátor je napájen přes tranzistor T2. Ventilátor je jedním vývodem připojen na kladné napájecí napětí 9 V a druhým vývodem přes rezistor R5 na vývod D tranzistoru T2. Pro lepší funkci ventilátoru je k němu paralelně zapojen kondenzátor C5.

4.1.3 Obvod pro měření teploty

Teplota je snímána pomocí integrovaného snímače teploty STM160 (IO4). Snímač je napájen napětím 5 V. Amplituda výstupních šířkově modulovaných pulzů je snížena na 2,1 V odporovým děličem složeným z rezistorů R12 a R13. Výstup děliče je ošetřen proti rušení

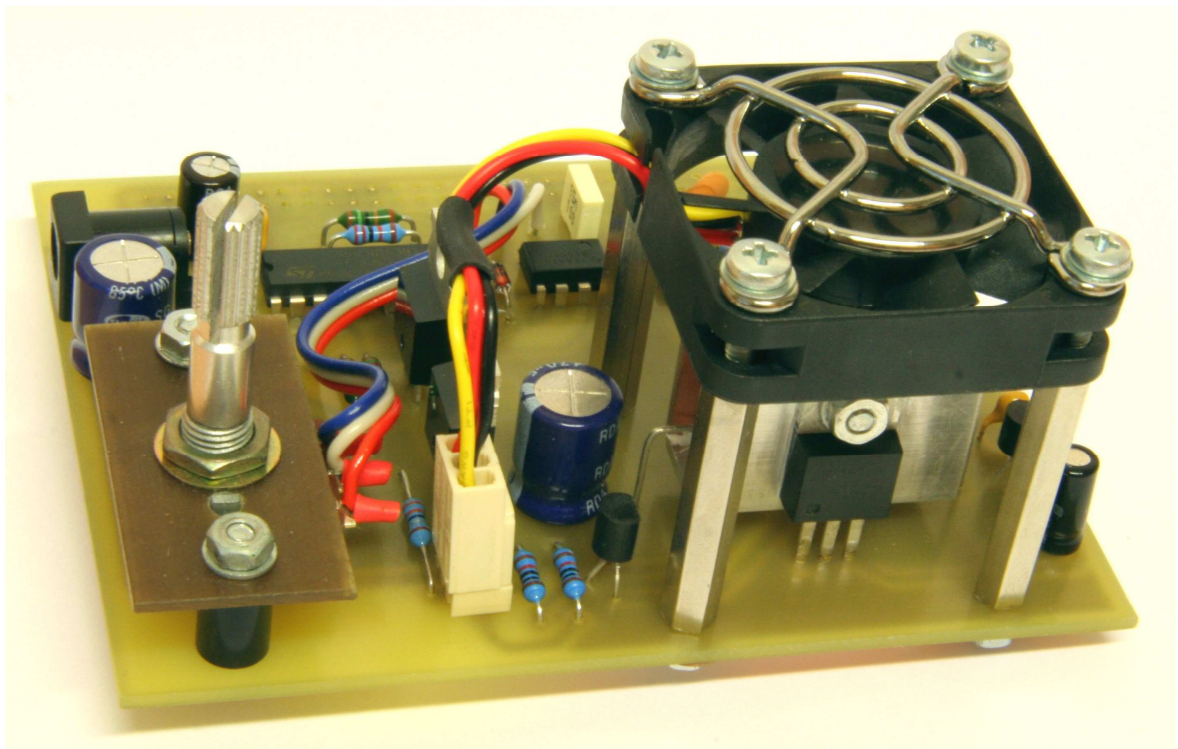
kondenzátorem C4 a zaveden na čítačový vstup TPM2CH4 mikropočítače (vývod 22 konektoru MCU_PORT).

4.1.4 Obvod pro měření otáček ventilátoru

Pro snímání otáček je ventilátor vybaven vývodem, který je za běhu rotoru periodicky připojován na přívod záporného pólu napájecího napětí ventilátoru. Tento vývod je připojen na dělič tvořený rezistory R6 a R7. Výstup děliče je zaveden na bázi tranzistoru T1 vodivosti PNP. V kolektoru tohoto tranzistoru pracujícího ve spínacím režimu je zařazen odporový dělič s rezistory R8 a R9, který snižuje amplitudu výstupních pulzů na 2,1 V. Výstup děliče je zaveden na čítačový vstup TPM2CH2 mikropočítače (vývod 24 konektoru MCU_PORT). Proti případným vysokofrekvenčním poruchám je ošetřen kondenzátorem C6.

4.1.5 Fyzické provedení modulu

Fyzické provedení modulu je ukázáno na Obr. 2.2. Obrázek ukazuje polohu ventilátoru upevněného pomocí distančních sloupků nad tepelným tělískem.

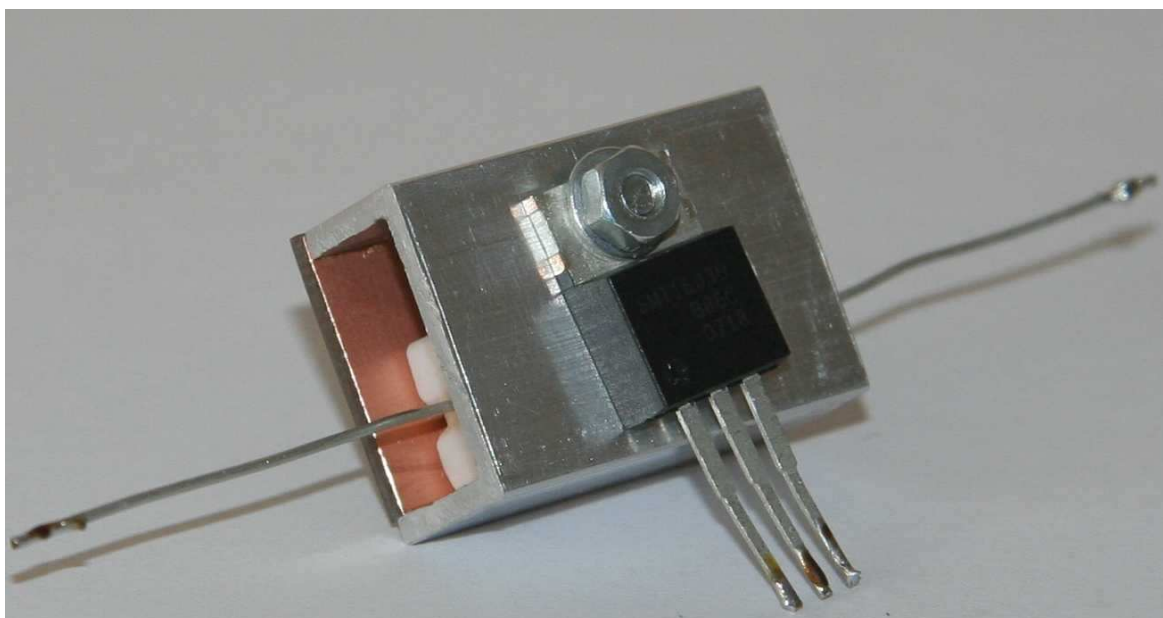


Obr. 2.2 – Fyzické uspořádání modulu tepelné soustavy s ventilátorem

Z obrázku je patrná celková koncepce mechanického řešení, jehož cílem bylo dosáhnout maximální robustnosti konstrukce.

4.1.6 Vytápěné tepelné tělísko s topným rezistorem a snímačem teploty

Funkčně velmi důležitou součástí modulu je tepelné tělísko tvořící vlastní tepelnou soustavu. Je tvořeno 28 mm dlouhým hliníkovým U-profilem šířky 19,7 mm a hloubky 11,7 mm. Tloušťka stěny hliníkového profilu je 1,6 mm. Uvnitř profilu je umístěn topný rezistor TR5W v keramickém pouzdře o rozměrech 10 x 9,5 x 22 mm. Ke stěně profilu je přitisknut šroubem prostřednictvím pásky sklolaminátu. Mezi stěnou profilu a pouzdrům rezistoru je nanesena silikonová pasta pro zvýšení tepelného kontaktu obou dílů. Šroub, který přitlačuje upevňovací pásek rezistoru, současně upevňuje na vnějším povrchu profilu snímač teploty. Styčná plocha snímače je rovněž pokryta silikonovou pastou. Detail uspořádání tepelného tělíska je na Obr. 2.3.



Obr. 2.3 – Tepelné tělísko s topným rezistorem a snímačem teploty

Tepelné tělísko je na desku plošných spojů modulu upevněno jen prostřednictvím vývodů topného rezistoru a snímače teploty. Takovéto uspořádání zajišťuje poměrně dobré proudění vzduchu hnaného ventilátorem kolem tělíska. Ventilátor je upevněn nad tepelné tělísko na distančních sloupcích délky 30 mm.

4.1.7 Deska plošných spojů

K návrhu desky plošných spojů jsem použil program Eagle verze 5.6.0. Rozměry desky jsou 80 x 100 mm. Předloha desky plošných spojů i výkres rozmístění součástek jsou obsaženy v přílohách.

5 NÁVRH PROGRAMOVÉHO VYBAVENÍ

Program ovládání modulu tepelné soustavy s ventilátorem je rozdělen do několika funkčních částí.

Program v jazyce C je tvořen hlavním modulem se standardním vstupním bodem *main*, podprogramy *modin*, *TepSysInit*, *GetTemperature*, *Omez*, *N2T*, *T2D* a podprogramy obsluhy přerušení *timer1_ovf*, *timer2_ovf*, *timer2_ch2* a *timer2_ch4*. Podprogramy *modin*, *TepSysInit*, *GetTemperature* a podprogramy obsluhy přerušení *timer1_ovf*, *timer2_ovf*, *timer2_ch2* a *timer2_ch4* představují základní knihovnu pro práci s modulem. Ve verzi knihovny v jazyku C jsou jejich jména ponechána v uvedeném tvaru, názvy odpovídajících podprogramů v jazyku symbolických adres mají jména modifikována připojením písmene A (*modinA*, *TepSysInitA*, *GetTemperatureA*, *timer1_ovfA*, *timer2_ovfA*, *timer2_ch2A* a *timer2_ch4A*).

Při zavedení programu do paměti jsou nastaveny vektory přerušení. Po svém spuštění program nejprve ziniculuje proměnné, volá podprogram inicializace knihovny pro ovládání zobrazovací jednotky, podprogram nastavení portů a časovačů a povolí funkci přerušení. Po dokončení inicializace zahájí nekonečné opakování hlavního cyklu programu.

V okamžiku povolení přerušení vstupují do činnosti obslužné podprogramy přerušení od časovačů. Časovač TPM1 čítá hodinové impulzy procesoru a procedura obsluhy přerušení od jeho přetečení generuje příznaky *iSmpl* a *iNuper* a *iTick* pro časování programu. Druhý kanál časovače TPM2 generuje přerušení vždy při příchodu náběžné nebo sestupné hrany impulsu snímače otáček ventilátoru a podprogram obsluhy tohoto přerušení inkrementuje obsah proměnné *iCount*, z níž je vypočítáván údaj o otáčkách ventilátoru.

Při každém průchodu programu hlavním cyklem je aktualizována hodnota bitu 5 portu F ovládání multiplexeru a hodnota registru TPM2C0V určující střidu budícího signálu PWM generovaného mikropočítačem.

Při každém průchodu programu hlavním cyklem jsou také testovány příznaky definující časování programu a je vyvolán podprogram `__RESET_WATCHDOG` pro sledování funkčnosti systému.

Na základě testu příznaků časování je s periodou 1/16 s vyhodnocován stisk tlačítek SW1 až SW4. Vyhodnocení stisku tlačítek vede ke změně některé z nastavovaných číselných hodnot, případně pracovního režimu programu. Bezprostředně po vyhodnocení stisku tlačítek program testuje příznaky časování na požadavek zahájení periody vzorkování. Perioda vzorkování je 1 s. V případě rozpoznání zahájení periody vzorkování program vypočítá, v závislosti na

nastaveném režimu programu, akční zásah PSD regulátoru. Po tomto podmíněném výpočtu program obnoví zobrazené údaje voláním podprogramu *T2D* pro obsluhu zobrazovací jednotky.

5.1 Inicializace

V inicializační sekvenci program volá podprogramy *TepSysInit*, který dále volá podprogramy *dinit* a *dcls* pro inicializaci knihovny obsluhy zobrazovací jednotky a vymazání jejího obsahu, podprogram *modin* pro nastavení portu F a časovačů, povolí přerušeni a nastaví počáteční hodnoty proměnných.

Řídící byte TPM1SC časovače TPM1 je nastaven na hodnotu \$4D způsobující vynulování příznaku přetečení, povolení přerušeni, nastavení příjmu hodinových pulzů ze sběrnice mikropočítače a nastavení vnitřního děliče na dělení v poměru 1:32. Registr TPM1MOD je nastaven na hodnotu \$9897. Výsledkem tohoto nastavení je, že podprogram *timer1_ovf* obsluhy přerušeni je spouštěn s periodou 1/16 s.

Řídící byte TPM2SC časovače TPM2 je nastaven na hodnotu \$4A. Nastavení časovače TPM2 se tak liší jen v nastavení vnitřního děliče. Jeho poměr je v případě TPM2 1:4. Registr TPM2MOD je nastaven na hodnotu 2000. Toto nastavení způsobí, že frekvence PWM impulzů generovaných kanálem TPM2CH0 je 2,5 kHz.

Kanál 0 časovače TPM2 je naprogramován pro funkci generátoru PWM impulzů (mód zarovnání na hranu - edge aligned) nastavením řídicího byte TPM2C0SC na hodnotu \$28. Kanály 2 a 4 jsou naprogramovány nastavením TPM2C2SC a TPM2C4SC na hodnotu \$4C pro generování požadavku přerušeni při příchodu náběžné i sestupné hrany na jejich vstupy.

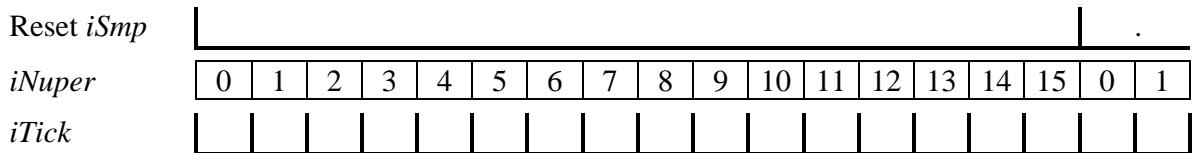
Typ, počáteční hodnota a význam proměnných programu je uveden v Tab. 2.1. Proměnné definované uvnitř knihovny podprogramů jsou označeny * ve sloupci typu.

Tab. 2.1 – Typ, počáteční hodnota a význam proměnných programu

Proměnná	Typ	Poč. h.	Popis
Časování			
<i>iNuper</i>	int *	0	Čítač intervalů 1/16 s v rámci periody vzorkování.
<i>iSmpl</i>	int *	0	Čítač taktů při měření teploty (střídy PWM).
<i>iTick</i>	int *	0	Indikátor změny <i>iNuper</i> .
Měření otáček ventilátoru			
<i>iCnt</i>	int *	0	Počet pulzů snímače otáček ventilátoru za jednu periodu.
<i>iCount</i>	int *	0	Čítač pulzů snímače otáček ventilátoru.
Režim programu			
<i>iMode</i>	int	0	Režim: 0-Manual, 1-set P, 2-set I, 3-set D, 4-PSD reg.
<i>iF5</i>	int *	1	Ovládání multiplexeru: 0-topení, 1-ventilátor.
Výstupní signál PWM z mikropočítače			
<i>iPow</i>	int *	0	Nastavení střídy PWM v rozsahu 0 až 2000 (0%-100%).
<i>iPowLim</i>	int	0	Dolní mez nastavení střídy PWM (0 nebo 60 podle <i>iF5</i>).
Měření teploty			
<i>iTemp</i>	int	0	Změřená teplota v 0,1 °C.
<i>aiSamples[20]</i>	int	-1	Průběžné stavy čítače při měření teploty.
Zobrazování			
<i>acTC[4]</i>	char	‘ ‘	Výsledné pole znaků při zobrazení čísla (výstup N2T).
<i>acTD1[17]</i>	char	, ,\0	Obraz 1. řádku pro zobrazovací jednotku.
<i>acTD2[18]</i>	char	, ,\0	Obraz 2. řádku pro zobrazovací jednotku.
Nastavení regulátoru PSD			
<i>iWTemp</i>	int	30	Žádaná hodnota teploty.
<i>iSetP</i>	int	0	Změna nastavení výchozí hodnoty P složky v dB.
<i>iSetI</i>	int	0	Změna nastavení výchozí hodnoty I složky v dB.
<i>iSetD</i>	int	0	Změna nastavení výchozí hodnoty D složky v dB.
Výpočet akčního zásahu			
<i>fKf</i>	float	-0.5	Zesílení soustavy řízení ventilátoru.
<i>fKh</i>	float	5.0	Zesílení soustavy při řízení topení.
<i>fP</i>	float	0.0	Aktuální velikost složky P.
<i>fI</i>	float	0.0	Aktuální velikost složky I.
<i>fD</i>	float	0.0	Aktuální velikost složky D.
<i>fP0</i>	float	1.0	Výchozí velikost složky P.
<i>fI0</i>	float	1./110	Výchozí velikost složky I.
<i>fD0</i>	float	13	Výchozí velikost složky D.
<i>fEp</i>	float	0.0	Velikost odchylky v předešlé periodě vzorkování.
<i>fE</i>	float	0.0	Aktuální velikost regulační odchylky.
<i>fInt</i>	float	0.0	Integrál regulační odchylky.
Pomocné proměnné			
<i>iCas</i>	int	0	Pomocný údaj o času uplynulém od předešlé změny.
<i>iStep</i>	int	0	Požadovaný krok změny nastavované hodnoty.
<i>bC</i>	byte	1	Znaková pozice kurzoru.
<i>bR</i>	byte	2	Sloupcová pozice kurzoru.
<i>iTL</i>	int	0	Obraz 3 následných vzorků stavu tlačítek SW1 až SW4.
<i>iTLM</i>	int	0	Maskovaný obraz <i>iTL</i> .

5.2 Program řízení periody vzorkování

Řízení periody vzorkování vychází z funkce TPM1. Obslužný program přerušení *timer1_ovf* spolu s kódem obsaženým v hlavním cyklu programu generuje taktovací signály *iTick*, *iNuper* a *iSmp* řídících běh programu. Průběh signálů a jejich změn ukazuje Obr. 2.4.



Obr. 2.4 – Časový průběh signálů řídících časování a jejich změn

Na začátku periody vzorkování je nastavením proměnné *iSmp* na hodnotu 0 odstartováno měření střidy PWM signálu ze snímače teploty. Perioda vzorkování je 1 s.

Po vyhodnocení jednotkové hodnoty proměnné *iTick* se v hlavním cyklu programu provede test stavu tlačítek a obnoví se obsah údajů na zobrazovací jednotce. Proměnná *iTick* je resetována. Perioda cyklů nastavení proměnné *iTick* je 1/16 s.

V automatickém režimu, kdy je soustava řízena PSD regulátorem, je akční zásah vypočítáván v každé periodě vzorkování při aktivním signálu *iTick* a při hodnotě proměnné *iNuper* rovné 1.

5.3 Měření teploty tělíska

Určení teploty tělíska se provádí výpočtem podle vzorce (1). Do vzorce vstupuje údaj o střídě impulzů generovaných snímačem teploty. Střída s měřenosného signálu je v podprogramu *GetTemperature* vypočítávána jako poměr doby τ_1 trvání logické úrovně 1 a doby τ_2 trvání logické úrovně 0 po dobu trvání tří po sobě následujících period signálu snímače podle vztahu

$$s = \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_0} \quad (19)$$

Požadavku zpracování třech po sobě následujících period signálu snímače odpovídá velikost pole *aiSamples*, která je rovna $2 + 3 \cdot 4 = 14$. Zvětšení počtu period signálu snímače zahrnutých do měření by zvýšilo přesnost stanovení střidy signálu, ale prodloužilo by dobu měření.

Data pro výpočet τ_1 a τ_2 shromažďuje podprogram *timer2_ch4*. Časovač TPM2 čítá hodinové impulzy o frekvenci 5 MHz s vynulováním čítače při dosažení stavu 2000. Při frekvenci signálu snímače 4 kHz odpovídá jedné periodě signálu snímače 1250 impulzů načtených čítačem, to zajišťuje možnost určení střidy signálu ze snímače s přesností řádově převyšující přesnost snímače. Přesnost stanovení střidy přibližně odpovídá teplotnímu intervalu 0,2 °C

udávanému výrobcem snímače jako opakovatelnost měření. Program vypočítává střidu signálu ze tří po sobě následujících period signálu snímače, což přesnost měření poněkud zvyšuje, doba měření je asi 0,75 ms.

Kanál 4 časovače TPM2 vyvolá požadavek na přerušení při příchodu náběžné nebo sestupné hrany impulzu na jeho vstup. Tento vstupní signál je programově dostupný v bitu 7 portu D.

V obsluze přerušení se nejprve testuje signál *iSmpl*. Je li *iSmpl* větší nebo rovno 0 a současně menší než 14, vykonají se následující dva řádky kódu

```
1 aiSamples[iSmpl++] = TPM2C4V;          // obsah čítače
2 aiSamples[iSmpl++] = PTDD_PTDD7;      // bit 7 portu D
```

Po naplnění vektoru *aiSamples* v rozsahu od indexu 0 do indexu 13 je možno vypočítat změřenou teplotu v desetínách °C podprogramem *GetTemperature*:

```
1 int GetTemperature()
2 {
3     int i;
4     int j;
5     int iD;
6     int iT[2];
7     float fD;
8     iT[0] = 0;
9     iT[1] = 0;
10    for (i = 0; i < 14 / 2 - 1; ++i)
11        {
12            j = 2 * i;
13            iD = aiSamples[j + 2]-aiSamples[j];
14            if (iD < 0)
15                iD += 2000;
16            ++j;
17            iT[aiSamples[j]] += iD;
18        }
19    fD = iT[1];
20    fD /= iT[1] + iT[0];
21    fD = (fD - 0.32f)/0.0047f;
22    fD *= 10;
23    i = fD;
24    return i;
25 }
```

Na řádcích 8 a 9 jsou vynulovány prvky celočíselného pole *iT*. V cyklu od řádku 10 do řádku 18 jsou do těchto prvků přičítány přírůstky zaznamenaného obsahu registru čítače. Při výpočtu

přírůstku je zohledněno čítání v aritmetice modulo 2000 – řádky 13 až 15. Přičtení přírůstku obsahu čítače do příslušných prvků pole se provádí na řádku 17. Na řádcích 19 a 20 je vypočítána střída impulsů a na řádcích 21 a 22 je vypočítána měřená teplota v desetinách °C. Řádek 23 zajišťuje konverzi číselného typu.

5.4 Měření otáček ventilátoru

Princip měření otáček ventilátoru spočívá v prostém čítání nástupných a sestupných hran pulzů z měřicího výstupu ventilátoru. V obslužném podprogramu *timer2_ch2* je jen inkrementován obsah proměnné *iCount*. V podprogramu *timer1_ovf* je jednou za periodu vzorkování obsah proměnné *iCount* přenesen do proměnné *iCnt*. Proměnná *iCount* je pak vynulována. Po dobu následující periody je pak údaj o otáčkách ventilátoru k dispozici v proměnné *iCnt*.

5.5 Ovládání multiplexeru

Ovládání multiplexoru spočívá v prostém přenesení obsahu proměnné *iF5* do bitu 5 brány F.

5.6 Ovládání uživatelského rozhraní

Uživatelské rozhraní poskytuje uživateli informace prostřednictvím zobrazovací jednotky a umožňuje mu ovládat modul pomocí tlačítek SW1 až SW4 kitu a pomocí potenciometru na modulu tepelné soustavy.

Zobrazovací jednotka trvale zobrazuje teplotu tepelného tělíska (vpravo nahoře) ve °C, otáčky ventilátoru v % maximálních otáček (vpravo dole) a údaj v % o střídě signálu vystupujícího z mikropočítače (vlevo dole). V závislosti na zvoleném režimu pak zobrazovací jednotka ukazuje (vlevo nahoře) požadovanou teplotu tepelného tělíska ve °C, velikost změny v dB nastavení parametrů regulátoru oproti jejich výchozí velikosti a informaci o tom, zda signál PWM generovaný počítačem ovlivňuje výkon topení nebo otáčky ventilátoru. Průběžný čas v manuálním režimu (vlevo nahoře) je zobrazen v sekundách.

Parametru P odpovídá veličina K_R v rovnici (17), parametru I podíl T_o/T_i v rovnici (17) a parametru D podíl T_d/T_o v téže rovnici.

Tlačítka je možno volit režim funkce modulu. K dispozici je 5 režimů a to režim ručního ovládání, tři režimy pro nastavení velikosti změny velikosti tří parametrů regulátoru oproti jejich výchozím hodnotám a režim automatické regulace. Dále je možno nezávisle ovládat

multiplexer, to znamená, zda signál PWM generovaný počítačem ovlivňuje výkon topení nebo otáčky ventilátoru.

5.6.1 Popis polí zobrazovací jednotky a ovládacích tlačítek

Popis polí zobrazovací jednotky a funkci tlačítek názorně ukazuje tabulka Tab. 2.2.

Tlačítkem SW2 se cyklicky přepínají režimy Manual, Set P, Set I, Set D a Auto. Tlačítkem SW1 je cyklicky měněno nastavení multiplexeru. Tlačítka SW3 a SW4 slouží k snižování, respektive ke zvyšování nastavované hodnoty. Přidržení těchto tlačítek způsobí rychlou změnu nastavované hodnoty.

Tab. 2.2 – Obsah polí zobrazovací jednotky v jednotlivých režimech

		PWM signál z mikropočítače ovládá (SW1)												
		Topení		Ventilátor										
		Potenciometr ovládá												
Režim (SW2)		Ventilátor		Topení										
		Manual	<table border="1"> <tr> <td>t</td> <td>345</td> <td>37,5</td> </tr> <tr> <td>U>F</td> <td>45</td> <td>95</td> </tr> </table> <p>SW3 a SW4 ovládají U</p>	t	345	37,5	U>F	45	95	<table border="1"> <tr> <td>t</td> <td>345</td> <td>37,5</td> </tr> <tr> <td>U>H</td> <td>45</td> <td>95</td> </tr> </table> <p>SW3 a SW4 ovládají U</p>	t	345	37,5	U>H
t	345	37,5												
U>F	45	95												
t	345	37,5												
U>H	45	95												
Set P	<table border="1"> <tr> <td>p</td> <td>-25</td> <td>37,5</td> </tr> <tr> <td>U>F</td> <td>45</td> <td>95</td> </tr> </table> <p>SW3 a SW4 ovládají P</p>	p	-25	37,5	U>F	45	95	<table border="1"> <tr> <td>p</td> <td>-25</td> <td>37,5</td> </tr> <tr> <td>U>H</td> <td>45</td> <td>95</td> </tr> </table> <p>SW3 a SW4 ovládají P</p>	p	-25	37,5	U>H	45	95
p	-25	37,5												
U>F	45	95												
p	-25	37,5												
U>H	45	95												
Set I	<table border="1"> <tr> <td>i</td> <td>20</td> <td>37,5</td> </tr> <tr> <td>U>F</td> <td>45</td> <td>95</td> </tr> </table> <p>SW3 a SW4 ovládají I</p>	i	20	37,5	U>F	45	95	<table border="1"> <tr> <td>i</td> <td>20</td> <td>37,5</td> </tr> <tr> <td>U>H</td> <td>45</td> <td>95</td> </tr> </table> <p>SW3 a SW4 ovládají I</p>	i	20	37,5	U>H	45	95
i	20	37,5												
U>F	45	95												
i	20	37,5												
U>H	45	95												
Set D	<table border="1"> <tr> <td>d</td> <td>-10</td> <td>37,5</td> </tr> <tr> <td>U>F</td> <td>45</td> <td>95</td> </tr> </table> <p>SW3 a SW4 ovládají D</p>	d	-10	37,5	U>F	45	95	<table border="1"> <tr> <td>d</td> <td>-10</td> <td>37,5</td> </tr> <tr> <td>U>H</td> <td>45</td> <td>95</td> </tr> </table> <p>SW3 a SW4 ovládají D</p>	d	-10	37,5	U>H	45	95
d	-10	37,5												
U>F	45	95												
d	-10	37,5												
U>H	45	95												
Auto	<table border="1"> <tr> <td>w</td> <td>31</td> <td>37,5</td> </tr> <tr> <td>U>F</td> <td>45</td> <td>95</td> </tr> </table> <p>SW3 a SW4 ovládají W</p>	w	31	37,5	U>F	45	95	<table border="1"> <tr> <td>w</td> <td>31</td> <td>37,5</td> </tr> <tr> <td>U>H</td> <td>45</td> <td>95</td> </tr> </table> <p>SW3 a SW4 ovládají W</p>	w	31	37,5	U>H	45	95
w	31	37,5												
U>F	45	95												
w	31	37,5												
U>H	45	95												

5.6.2 Ovládání zobrazovací jednotky

Podprogram ovládání zobrazovací jednotky *T2D* udržuje reprezentaci obsahu obou řádků zobrazovací jednotky ve znakových polích *acTD1* a *acTD2*. Podprogram postupně vyhodnocuje aktuální režim funkce modulu a aktualizuje obsah jednotlivých polí. Pro převod číselných údajů do znakového vyjádření využívá podprogramu *N2T*, jehož vstupem je celé číslo a výstupem jeho textová reprezentace v poli *acTC* znaků. Po aktualizaci oba řádky zobrazí prostřednictvím volání podprogramů knihovny *disp_60gb*.

5.6.3 Vyhodnocení stisku tlačítek

Vyhodnocení stisku tlačítek se provádí periodicky s periodou 1/16 s vždy na začátku hlavního cyklu programu, jak ukazuje následující výpis kódu:

```
1   ...
2   while (1)
3   {
4       if (iTick == 1)
5       {
6           iTick = 0;
7           iTL = iTL>>4;
8           iTL |= (PTAD & 0xF0)<<4;
9
10          iTLM = iTL & 0x111;
11          if ((iTLM & 0x111) == 0x011)
12          {
13              iF5 = (iF5 + 1) % 2;
14          }
15
16          iTLM = iTL & 0x222;
17          if ((iTLM & 0x222) == 0x022)
18          {
19              iMode = (iMode + 1) % 5;
20          }
21
22          iStep = 0;
23          iTLM = iTL & 0x444;
24          if ((iTLM == 0) || (iTLM == 0x044))
25          {
26              iStep = -1;
27              iCas = 0;
```

```
28         }
29
30         iTLM = iTL & 0x888;
31         if ((iTLM == 0) || (iTLM == 0x88))
32         {
33             iStep = 1;
34             iCas = 0;
35         }
36         ...
37     }
38     ...
39 }
40 ...
```

Je-li hodnota proměnné *iTick* rovna 1, je okamžitě nastavena na hodnotu 0. Následně je obsah proměnné *iTL* posunut o čtyři bity vpravo, řádky 6 až 7. Proměnná *PTAD* typu BYTE reprezentuje port D mikropočítače, v rámci portu D jsou tlačítka SW1 až SW4 reprezentována bity 4 až 7, tedy horní polovinou BYTE, přitom klidovému stavu tlačítka odpovídá hodnota 1 a stisknutému tlačítku hodnota 0. Po vykonání příkazu na řádku 8 obsahuje proměnná *iTL* obraz tří po sobě sejmutých stavů bitů 4 až 7 portu D.

Postupným maskováním, řádky 10, 16, 23 a 30, je tak získán obraz stavu a jeho historie pro bity odpovídající tlačítkům SW1, SW2, SW3 a SW4. Jako prostý stisk tlačítka je vyhodnocena posloupnost {0, 1, 1} jeho stavů, posloupnost {0, 0, 0} odpovídá trvalému drženému stisku tlačítka. Testy na tyto posloupnosti jsou prováděny na řádcích 11, 17, 24 a 31. Výsledkem vyhodnocení stisku tlačítek pak jsou změny proměnných vedoucí ke změnám souvisejícím s funkcí jednotlivých tlačítek.

5.6.4 Popis podprogramů knihovny

Přehled podprogramů a jejich parametrů je uveden v tabulce Tab. 2.3.

Tab. 2.3 Přehled podprogramů a jejich parametrů

<i>modin</i> <i>modinA</i>	Podprogram nastavuje režim potřebných pinů portů A a F (PTA4, PTF0, PTF1, PTF5).		
	parametry	void	
	návratová hodnota	void	
<i>timer1_ovf</i> <i>timer1_ovfA</i>	Podprogram obsluhy přerušení od přetečení TPM1 nastavuje proměnné <i>iTick</i> a <i>iNuper</i> řízení periody vzorkování, nuluje proměnnou <i>iSmpl</i> pro řízení měření časových intervalů 4. kanálem časovače TPM2.		
	parametry	void	
	návratová hodnota	void	
<i>timer2_ovf</i> <i>timer2_ovfA</i>	Podprogram obsluhy přerušení od přetečení TPM2. Podprogram pouze zpracovává nastavené přerušení a nevykonává žádnou další funkci.		
	parametry	void	
	návratová hodnota	void	
<i>timer2_ch2</i> <i>timer2_ch2A</i>	Podprogram obsluhy přerušení od nástupné a sestupné hrany signálu na vstupu 2. kanálu časovače TPM2 pro měření otáček ventilátoru. Podprogram inkrementuje proměnnou <i>iCount</i> .		
	parametry	void	
	návratová hodnota	void	
<i>timer2_ch4</i> <i>timer2_ch4A</i>	Podprogram obsluhy přerušení od nástupné i sestupné hrany signálu na vstupu 4. kanálu časovače TPM2 pro měření střidy PWM signálu od snímače teploty. Podprogram podmíněně, v závislosti na hodnotě <i>iSmpl</i> , zaznamenává stav čítače a logickou úroveň vstupního signálu do pole <i>aiSamples</i> a inkrementuje proměnnou <i>iSmpl</i> .		
	parametry	void	
	návratová hodnota	void	
<i>TepSysInit</i> <i>TepSysInitA</i>	Podprogram provádí inicializaci knihovny. Volá podprogramy <i>dinit</i> a <i>dcls</i> a nastavuje globální proměnné knihovny na počáteční hodnoty.		
	parametry	void	
	návratová hodnota	void	
<i>GetTemperature</i> <i>GetTemperatureA</i>	Podprogram pro výpočet teploty snímače. Podprogram nejprve vypočítá průměrnou střidu PWM signálu ze snímače z údajů uložených v poli <i>iSamples</i> a pak ji přepočítá na údaj o teplotě v 0,1 °C podle vztahu (1).		
	parametry	void	
	návratová hodnota	int	Teplota změřená snímačem v 0,1 °C.
<i>T2D</i>	Podprogram aktualizuje informace zobrazované zobrazovací jednotkou. Vyhodnocuje nastavený režim, převádí a s využitím funkce <i>N2T</i> formátuje číselné hodnoty pro zobrazení podle Tab. 2.2.		
	parametry	void	
	návratová hodnota	void	

<i>N2T</i>	Podprogram formátuje celé číslo, které přijímá jako parametr, do textového tvaru pro zobrazení. Výstupní řetězec znaků ukládá do globálního znakového pole <i>acTC</i> .		
	parametry	int <i>iN</i>	
	návratová hodnota	void	
<i>Omez</i>	Podprogram pro omezení celého čísla zadanými mezemi.		
	parametry	int <i>iN</i>	Vstupní číselná hodnota.
		int <i>iNmin</i>	Dolní mez číselné hodnoty.
		int <i>iNmax</i>	Horní mez číselné hodnoty.
návratová hodnota	int	Omezená číselná hodnota.	

6 MĚŘENÍ DYNAMICKÝCH A STATICKÝCH CHARAKTERISTIK MODULU

Pro stanovení rozsahu teplot tělíska pro celý rozsah řízení příkonu topného rezistoru a celý rozsah použitelných otáček ventilátoru je nutno provést měření statické charakteristiky soustavy.

Návrh regulátoru soustavy pak vychází z časových konstant soustavy určených pomocí Strejcovy metody z přechodových charakteristik systému.

Na základě identifikace systému je možno nastavit PSD regulátor a pak otestovat jeho funkci.

Měření charakteristik systému bylo provedeno v manuálním režimu a testování regulace teploty v režimu automatickém.

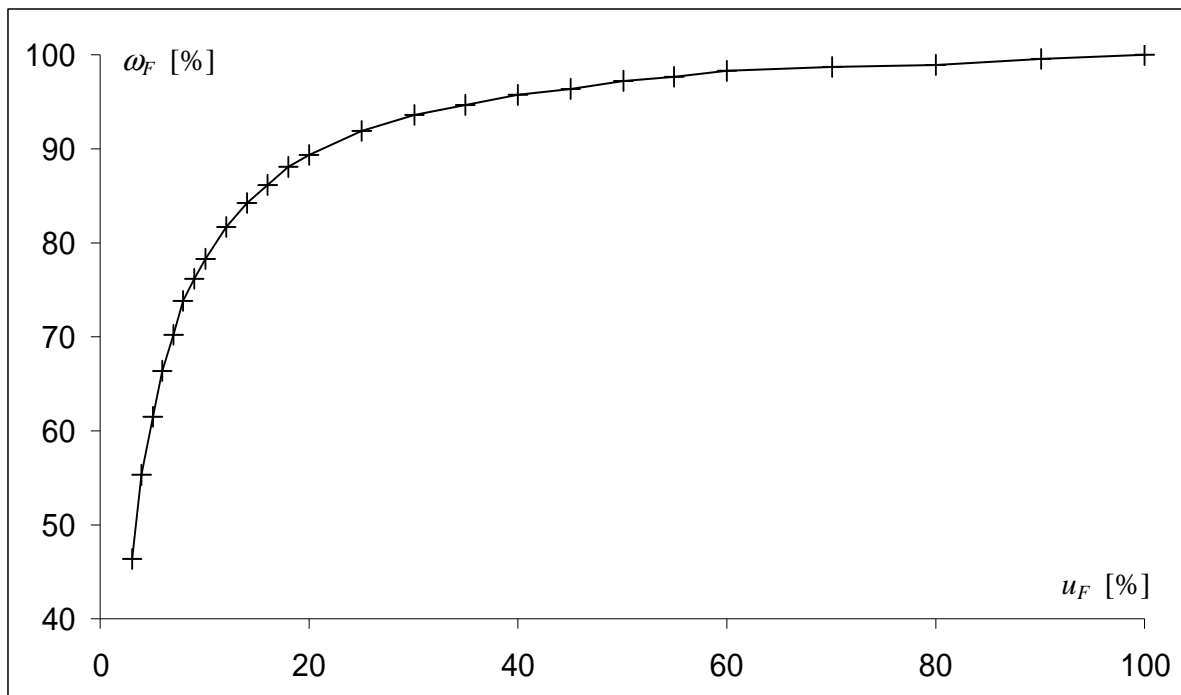
6.1 Závislost otáček ventilátoru na úrovni budicího signálu

Maximální velikost otáček ventilátoru při jeho trvalém napájení 9 V je 5670 ot/min. Tato velikost otáček byla vzata jako 100 %. Pro účel měření této charakteristiky byl program modifikován tak, aby údaj o otáčkách vypisoval v počtu pulzů za 1 s. Výsledky měření relativní velikosti ω_F otáček v % v závislosti na relativní velikosti u_F budicího signálu, stříde PWM budicího signálu, jsou shrnuty v tabulce Tab. 2.4.

Tab. 2. 4 – Závislost relativní velikosti otáček ω_F na velikosti u_F budicího signálu.

u_F [%]	pulzů / s	ω_F [%]	u_F [%]	pulzů / s	ω_F [%]
3	182	46,3	25	361	91,9
4	217	55,2	30	368	93,6
5	242	61,6	35	372	94,7
6	261	66,4	40	376	95,5
7	276	70,2	45	379	96,4
8	290	73,8	50	382	97,2
9	299	76,1	55	384	97,7
10	308	78,4	60	386	98,2
12	321	81,7	70	388	98,7
14	331	84,2	80	389	99,0
16	339	86,3	90	391	99,5
18	246	88,0	100	393	100,0
20	351	89,3			

Graf závislosti ω_F na u_F je ukázán na Obr. 2.5. Z grafu je patrná značná nelinearita závislosti. Pro stanovení zesílení soustavy, jejímž vstupem je u_F , byla stanovena maximální hodnota odhadu derivace této závislosti $k_F = 9$.



Obr. 2.5 – Graf závislost relativní velikosti otáček ω_F na velikosti u_F budicího signálu.

6.2 Statická závislost teploty tělíska na budicím signálu topidla a otáčkách ventilátoru

Statická závislost rozdílu ϑ_t teploty okolí ϑ_a a teploty tělíska byla změřena pro pět různých hodnot nastavení příkonu u_H topného rezistoru a devět hodnot nastavení otáček ω_F ventilátoru.

6.2.1 Metoda měření a změřená data

Měření statických charakteristik bylo prováděno tak, že pro každé nastavení otáček ventilátoru byl postupně měněn příkon topného rezistoru od 0 % do 100 %. Teplota tělíska pro příkon topidla 0 % pak byla odečtena od teplot dosažených pro nenulové úrovně topného příkonu pro dané otáčky ventilátoru. Teploty byly odečítány vždy po uplynutí doby 900 s od okamžiku provedení změny nastavení. Doba ustálení odezvy soustavy byla zvolena s ohledem na dostatečné doznění přechodového děje soustavy a na přijatelnou celkovou dobu měření. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce Tab. 2.5.

Tab. 2.5 – Závislost zvýšení ϑ [°C] teploty tělíska nad teplotu okolí na otáčkách ω_F ventilátoru a příkonu u_H topného rezistoru.

		u_H [%]				
		0	25	50	75	100
ω_F [%]	55	0,0	9,1	17,4	25,6	23,6
	59	0,0	8,4	16,9	24,7	32,8
	63	0,0	8,0	15,7	23,4	31,0
	69	0,0	7,0	14,5	21,7	28,6
	75	0,0	6,7	13,5	20,2	27,2
	80	0,0	6,4	12,9	19,2	25,9
	86	0,0	6,3	12,5	18,1	24,4
	93	0,0	6,2	12,0	17,8	23,7
	100	0,0	5,2	10,4	16,2	21,9

6.2.2 Stanovení matematického modelu

Údaje v tabulce Tab. 2.5 jsou zatíženy chybami měření, jako je kolísání okolní teploty, kolísání otáček ventilátoru, chyba měření teploty a podobně. Pro statistické snížení chyb byly metodou nejmenších čtverců nalezeny koeficienty funkce aproximující danou závislost. Funkce byla hledána ve tvaru

$$\vartheta = u_H (a_2 \omega_F^2 + a_1 \omega_F + a_0) \quad (20)$$

Výpočtem získané koeficienty jsou

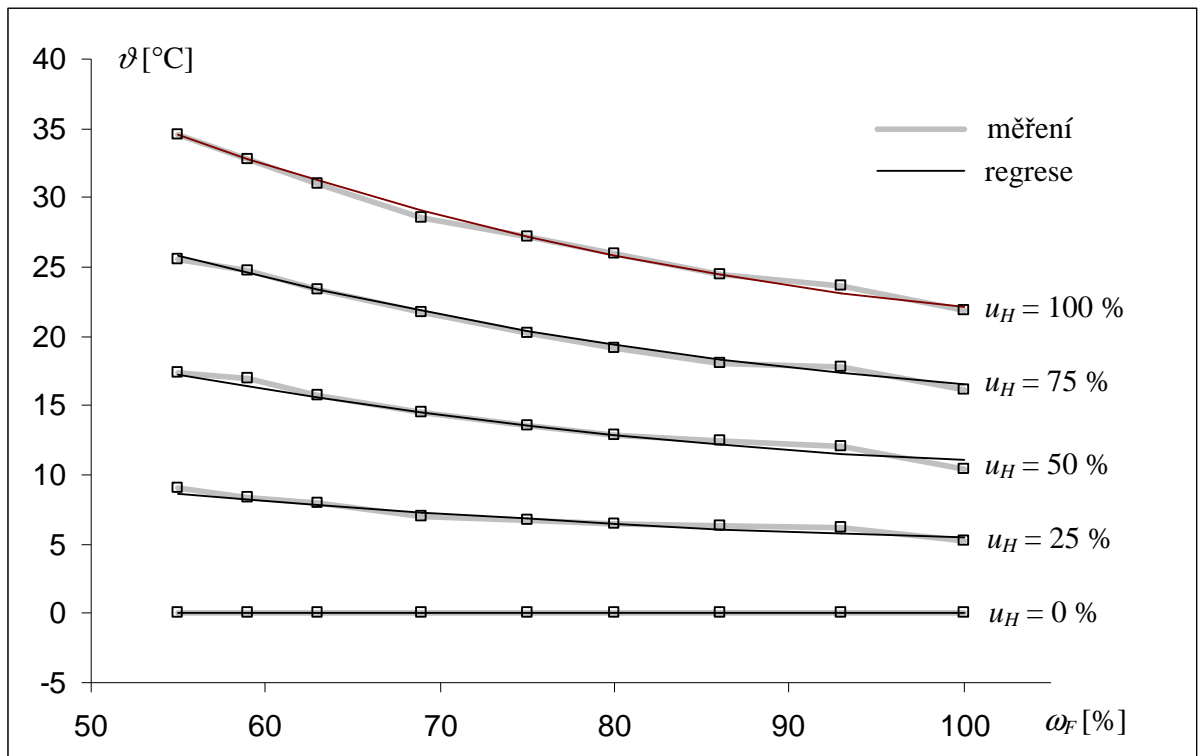
$$a_0 = 0,69290 \text{ °C}$$

$$a_1 = -0,82944 \cdot 10^{-2} \text{ °C/\%}$$

$$a_2 = 0,357449 \cdot 10^{-4} \text{ °C/\%}^2$$

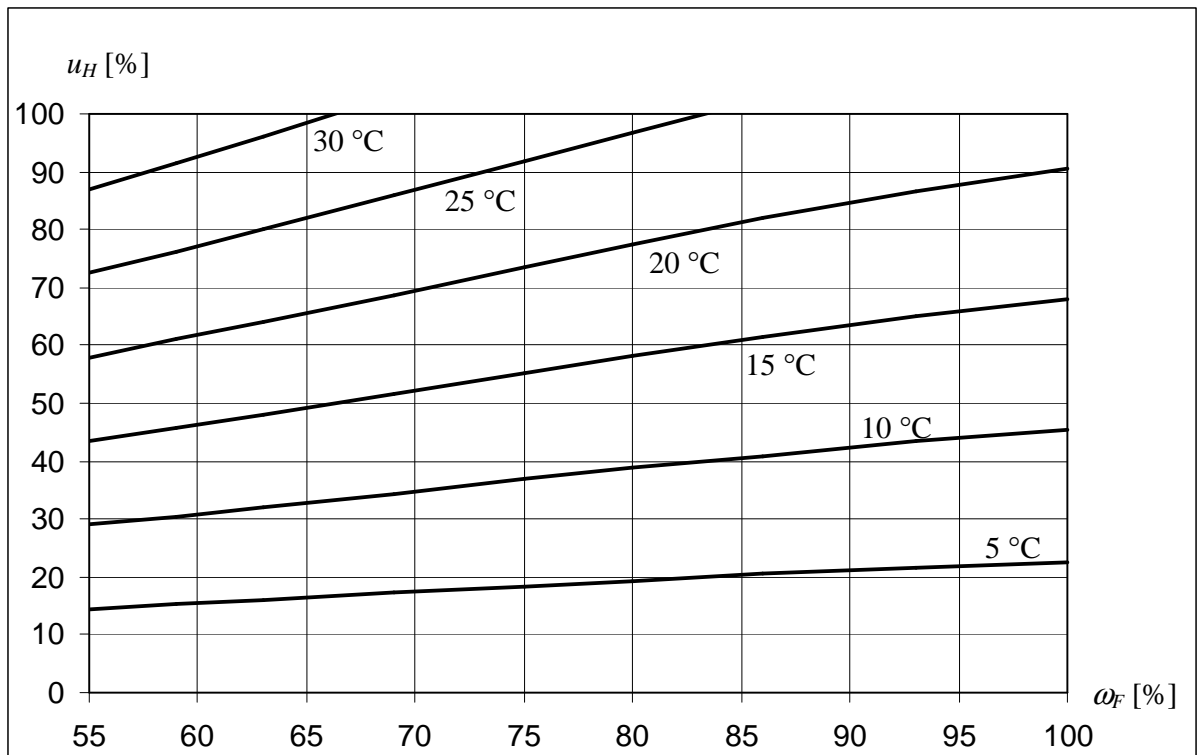
Střední kvadratická chyba aproximace je menší, než 0,3 °C. Popis řešení je uveden v příloze.

Srovnání naměřených a aproximovaných křivek závislosti ϑ na ω_F pro různé hodnoty u_H ukazuje graf na Obr. 2.6.



Obr. 2.6 – Graf závislosti ϑ na ω_F pro různé hodnoty u_H .

Alternativním vyjádřením statických charakteristik soustavy je pole izoterm přírůstků teploty tělíska nad teplotu okolí v rovině (ω_F, u_H) jak ukazuje Obr. 2.7.



Obr. 2.7 – Graf pole izoterm přírůstků teploty tělíska nad teplotu okolí v rovině (ω_F, u_H) .

6.3 Dynamická závislost teploty tělíska na velikosti budicího signálu topného rezistoru

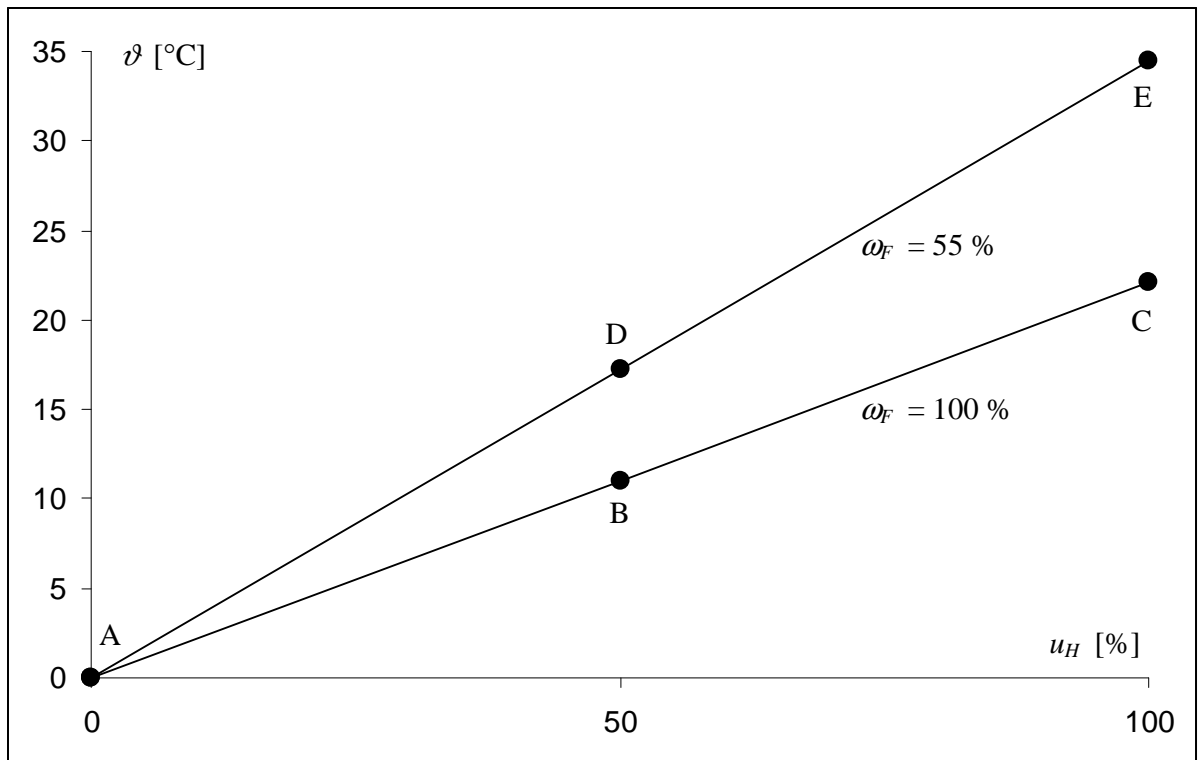
Dynamické vlastnosti tepelné soustavy byly měřeny jako soubory přechodových charakteristik soustavy, na jejímž vstupu působí relativní velikost příkonu u_H topného rezistoru a jejíž výstupní veličinou je přírůstek ϑ teploty tělíska nad teplotu okolí při různých otáčkách ventilátoru.

6.3.1 Metoda měření a změřená data

Velikost otáček ω_F ventilátoru ovlivňuje dynamické charakteristiky soustavy. Se vzrůstající intenzitou proudění vzduchu kolem tepelného tělíska vzrůstá rychlost odezvy soustavy na změnu příkonu topného rezistoru.

Měření přechodových charakteristik bylo provedeno pro minimální a maximální otáčky ventilátoru. Měření bylo prováděno mezi ustálenými stavy znázorněnými na Obr. 2.8

vyjadřujícím závislost teploty ϑ na příkonu u_H topného rezistoru pro minimální a maximální otáčky ventilátoru.



Obr. 2.8 – Graf závislosti teploty ϑ na příkonu u_H pro minimální a maximální otáčky ventilátoru

Přechodové charakteristiky byly změřeny pro přechody mezi stavy AC, CA, AB, BC, CB a BA a dále pro přechody AE, EA, AD, DE, ED a DA. Přechodové charakteristiky byly normovány a zprůměrovány zvlášť pro maximální (první skupina) a minimální (druhá skupina) otáčky ventilátoru. Tabulky změřených hodnot přechodových charakteristik jsou uvedeny v přílohách.

6.3.2 Identifikace soustavy

Průměrné přechodové charakteristiky byly aproximovány charakteristikami soustavy druhého řádu s rozdílnými časovými konstantami metodou prof. Strejce. Časové konstanty soustavy pro minimální otáčky ventilátoru jsou

$$T_{L1} = 95,2 \text{ s}$$

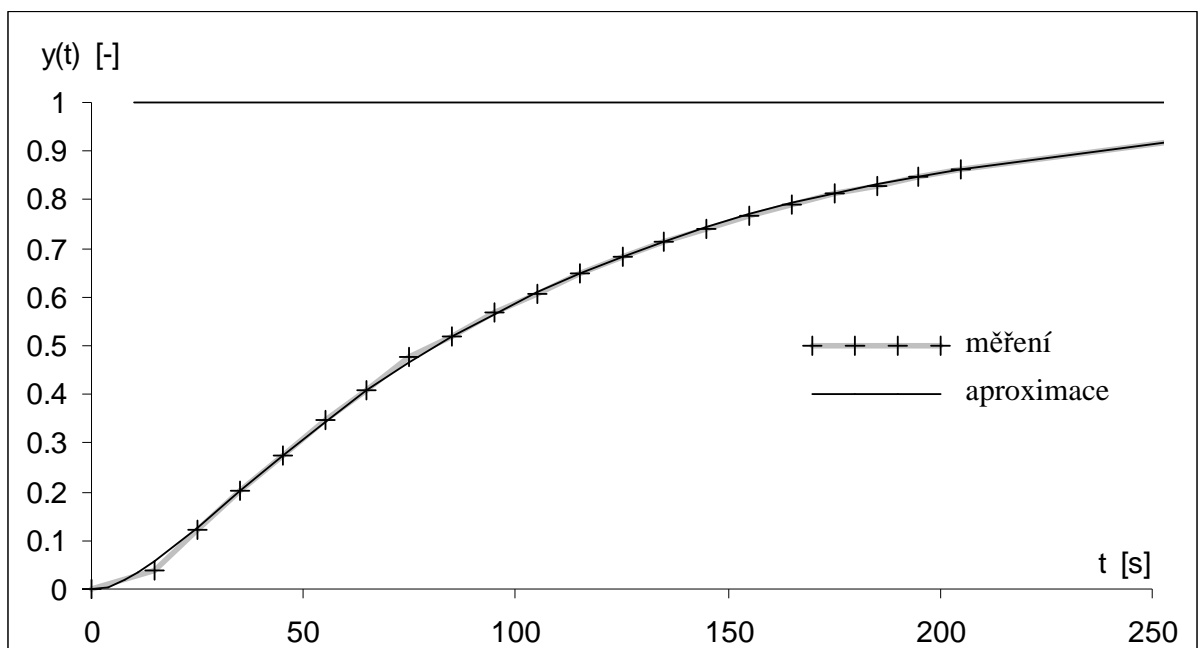
$$T_{L2} = 14,3 \text{ s}$$

a pro maximální otáčky ventilátoru pak

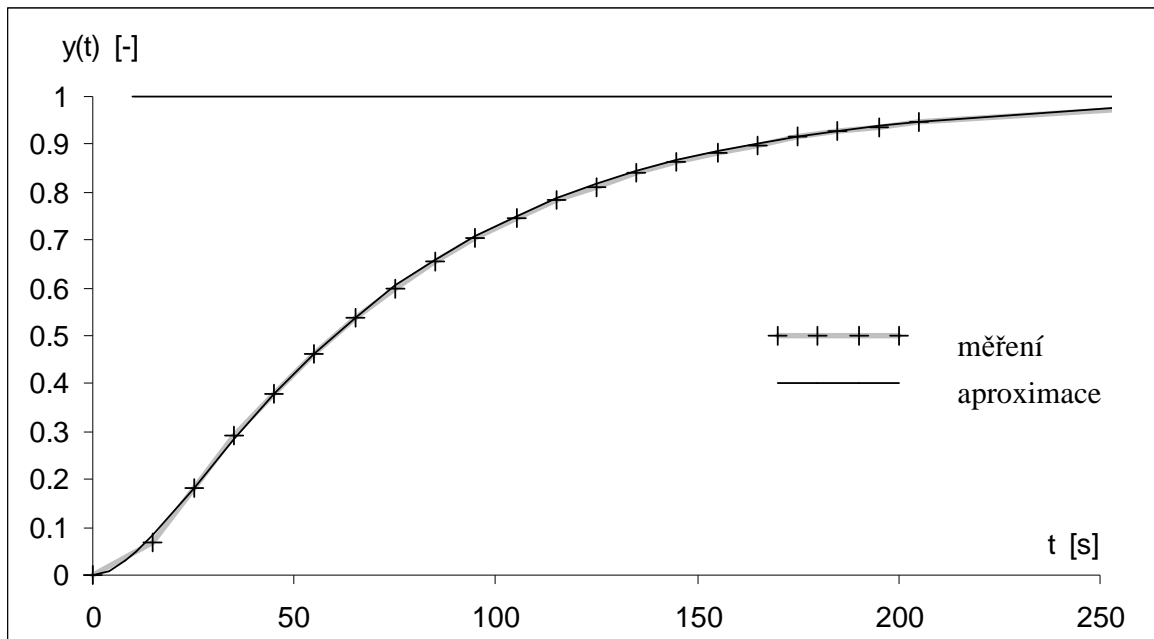
$$T_{H1} = 64,7 \text{ s}$$

$$T_{H2} = 13,6 \text{ s}$$

Srovnání průměrných normovaných přechodových charakteristik a aproximovaných přechodových charakteristik při obou extrémních hodnotách otáček ventilátoru je ukázáno v grafech na Obr. 2.9 a Obr. 2.10. Obrázky neukazují přechodové charakteristiky v celém intervalu provedených měření (0 s až 1000 s), ale jen v rozsahu zajímavém pro srovnání měřené a aproximované přechodové charakteristiky.



Obr. 2.9 – Grafy průměrné a aproximované přechodové charakteristiky pro minimální otáčky ventilátoru



Obr. 2.10 – Grafy průměrné a aproximované přechodové charakteristiky pro maximální otáčky ventilátoru

6.4 Volba parametrů regulátoru a ověření jeho funkce

Parametry regulátoru byly nalezeny metodou požadovaného modelu pro soustavu s minimálními otáčkami regulátoru.

Časové konstanty regulátoru tak byly zvoleny $T_i = 110$ s a $T_d = 13$ s.

Při volbě časové konstanty $T_w = 55$ s tak podle (14) pro zesílení regulátoru pro řízení příkonem topení dostáváme $K_{RH} = 5$ a pro zesílení regulátoru pro řízení ventilátorem dostáváme $K_{RF} = -0,5$.

6.4.1 Regulace teploty pomocí výkonu topidla

Zesílení soustavy řízené příkonem topidla je

$$K_H(\omega_F) = \frac{\partial \vartheta}{\partial u_H} = a_2 \omega_F^2 + a_1 \omega_F + a_0 \quad (21)$$

V pracovním rozsahu je toto zesílení v rozsahu od $0,120$ °C/% do $0,384$ °C/%, největší hodnoty dosahuje pro $\omega_F = 55$ %. Při návrhu regulátoru jsem vycházel z hodnoty $K_H = 0,4$ °C/%.

Při volbě časové konstanty $T_w = 55$ s tak podle (21) dostáváme zesílení regulátoru $K_{RH} = 5$.

6.4.2 Regulace teploty pomocí změn intenzity chlazení

Zesílení soustavy řízené prostřednictvím otáček ventilátoru je

$$K_F(u_H, \omega_F) = \frac{\partial \vartheta}{\partial \omega_F} = u_H (2a_2 \omega_F + a_1) \quad (22)$$

Zesílení je nulové pro $u_H = 0 \%$. Při $u_H = 100 \%$ se zesílení mění s velikostí ω_F od $-0,110 \text{ C}/\%$ do $-0,434 \text{ C}/\%$. Absolutní hodnota zesílení je největší pro $\omega_F = 55 \%$.

Při volbě časové konstanty $T_w = 55 \text{ s}$ tak podle (22) dostáváme s přihlédnutím k přítomnosti dalšího zesílení $k_F = 9$ (odstavec 6.1) zesílení regulátoru $K_{RF} = -0,5$.

6.4.3 Ověření funkce regulátoru

Nalezené časové konstanty regulátorů a jejich zesílení jsou programově implementovány jako výchozí nastavení regulátorů (odstavec 5.1). Pro tato nastavení byla ověřena funkce regulátorů v obou režimech regulace.

V režimu, kdy regulátor působí na soustavu prostřednictvím příkonu topidla, pracuje regulátor v souladu s požadavkem na přenos řízení. Volba $T_w = 55 \text{ s}$ vede k výpočtu akčních zásahů, u nichž se poměrně zřídka projeví omezení akčního zásahu, který musí být z intervalu $\langle 0 \%; 100 \% \rangle$. Změna intenzity chlazení kvalitu regulačního děje ovlivňuje minimálně.

V režimu, kdy regulátor působí na soustavu prostřednictvím změn otáček ventilátoru, je kvalita regulace výrazně horší než v předešlém případě. Silněji se projevuje vliv omezení akčního zásahu, musí ležet v intervalu $\langle 55 \%; 100 \% \rangle$, a regulační děj rovněž nepříznivě ovlivňuje nelinearita statické charakteristiky i závislost časových konstant soustavy na velikosti akčního zásahu.

ZÁVĚR

V rámci bakalářské práce byl navržen a zhotoven modul tepelné soustavy s ventilátorem. Řešení vycházelo z teoretických poznatků obsažených ve studijním programu mého studijního oboru a z doporučené literatury. Při konstrukci tohoto modulu bylo využito technické dokumentace vývojového kitu M68EVB908GB60, dokumentace v něm obsaženého mikropočítače MC9S08GB60 a technické dokumentace použitých elektronických prvků.

Pro ovládání modulu byl navržen program. Většina kódu programu je napsána v programovacím jazyce C, podprogramy základní knihovny jsou napsány i v jazyce symbolických adres. Všeobecně lze říci, že použití jazyka C se jeví pro daný účel jako optimální. Jeho použití zajišťuje přehlednost, čitelnost a snadnou modifikovatelnost kódu při udržení jeho výkonnosti a kompaktnosti.

Zvláštní pozornost byla při návrhu programu věnována problému zpracování PWM signálu z integrovaného snímače teploty. Za hlavní přednosti použitého způsobu zpracování tohoto signálu považuji jednak minimalizaci rozsahu kódu obsluhy přerušení od příslušného časovače, jednak možnost snadno zvětšit nebo i zmenšit počet period měronosného signálu zahrnutých do měření jeho průměrné střídy.

Při návrhu způsobu komunikace programu s uživatelem jsem se snažil o možnost ovlivňovat všechny potřebné parametry při zachování jednoduchosti a intuitivnosti ovládání.

V práci jsem věnoval značnou pozornost popisu chování realizované tepelné soustavy. Soustava se ukázala být poměrně komplikovanou v tom smyslu, že obsahuje nelinearity statických charakteristik a dokonce vykazuje závislost dynamických vlastností na velikosti svých vstupních veličin.

Pro regulaci soustavy byl navržen PSD regulátor metodou požadovaného modelu. Při stanovení parametrů regulátoru jsem vycházel z maximálních velikostí absolutní hodnoty zesílení soustavy v obou režimech a z maximální velikosti časových konstant. Navržený systém regulace soustavy lze považovat za uspokojivý v režimu, kdy regulátor ovlivňuje příkon topného rezistoru a chlazení ventilátorem představuje poruchový signál. V režimu, kdy regulátor ovlivňuje intenzitu chlazení, pracuje regulátor s výrazně nižší kvalitou regulačního děje. Řízení soustavy by pravděpodobně bylo možné výrazně zlepšit užitím pokročilejšího typu regulátoru. Touto oblastí jsem se ve své bakalářské práci nezabýval a považuji ji za jednu z možností dalšího vývoje modulu tepelné soustavy.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The module of thermal system with a fan was designed and manufactured within the work on this bachelor thesis. The solution was based on theoretical knowledge covered by the program of my field of university study and knowledge contained in the recommended literature. Technical documentation of the development kit M68EVB908GB60, therein documentation of MC9S08GB60 microcomputer and also technical documentation of applied electronic components were utilized.

The module operation is ensured by a program designed for this purpose. Most of the program code is written in C programming language. The subroutines of a basic library are written also in an assembler. In general application of the C language appears to be optimal for a given purpose. It ensures clarity, readability and easily modifiable code while preserving its performance and compactness.

A particular attention was paid to the design of the code for processing the PWM signal from the integrated temperature sensor. The main advantages of the method used are both the minimization of the code extent of the interrupt handling routine and also the ability to increase and decrease the number of PWM signal periods included to the measurement of the average duty cycle.

The design of the user interface was governed by the concern to give the user a possibility to modify all the substantial parameters while maintaining the simplicity and intuitiveness of manipulations.

A considerable attention was devoted to description of the thermal system behaviour. The system proved to be quite complicated in the sense that it contains static nonlinearities and even shows the dependence of dynamic properties on the input signals.

A PSD controller for the given thermal system was designed by the method based on a desired model. The maximum of absolute system gain and maximum of time constants were taken into account during the PSD controller parameters determination. The proposed control system can be considered satisfactory in the mode when the controller affects the input power of the heating resistor and when the cooling fan operates as a source of a fault signal. The quality of the control process is significantly lower in the mode when the controller affects the intensity of cooling. The quality of the system control could probably be considerably improved by application of a more advanced controller. This area is

beyond my thesis and I did not deal with it but I consider it to be one of the options for further development of the thermal system module.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] AXIOM MANUFACTURING. M68EVB908GB60: Development Board for Freescale MC9S08GB60. [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.axman.com>
- [2] FREESCALE SEMICONDUCTOR. HCS08 Microcontrollers. [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.freescale.com>
- [3] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 239 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0145-4.
- [4] BOBÁL, Vladimír. Identifikace systémů: Určeno pro posl. fak. technologické. 1. vyd. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1990, 186 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0125-7.
- [5] BALÁTĚ, Jaroslav. Automatické řízení: Určeno pro posl. fak. technologické. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 663 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-730-0020-2.
- [6] ST MICROELECTRONICS. Data sheet NE555. [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.st.com>
- [7] TEXAS INSTRUMENTS. Data Sheet 74HC4053. [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com>
- [8] INTERNATIONAL RECTIFIER. Data Sheet IRF3706. [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.irf.com>
- [9] TEXAS INSTRUMENTS. 3-Terminal positive regulators: 78L05. [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.ti.com>
- [10] SENSOR - TEC. Temperature sensor with digital output: Specification sheet SMT 160-30. [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: <http://www.smartsensors.biz>
- [11] MAXIM SEMICONDUCTOR. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. [online]. [cit. 2012-05-16]. Dostupné z: <http://www.maxim-ic.com>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- A/D Analogově / digitální převodník.
- CPU (Central processing unit), centrální procesorová jednotka.
- IIC (Inter-integrated circuit), sběrnice pro vnitřní komunikaci mezi zařízeními.
- LCD (Liquid crystal display), obrazovka z tekutých krystalů.
- NTC (Negative termistor coefficient), negastor.
- PC (Personal computer), osobní počítač.
- PID Analogový regulátor s proporcionální, integrační a derivační složkou.
- PSD Diskrétní regulátor s proporcionální, sumační a derivační složkou.
- PTC (Pozitive termistor coefficient), pozistor.
- PWM (Pulse width modulation), pulzní šířková modulace.
- RAM (Random access memory), paměť s náhodným přístupem.
- SCI (Serial communication interface), sériové komunikační rozhraní.
- SPI (Serial peripheral interface), sériové periferní rozhraní.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 – Blokové schéma mikropočítače MC9S08GB60.....	12
Obr. 1.2 – Registry CPU	13
Obr. 1.3 – Uspořádání vývojového kitu M68EVB908GB60.....	18
Obr. 1.4 – Regulační obvod soustavy s jedním vstupem a jedním výstupem.....	24
Obr. 2.1 – Schéma zapojení modulu tepelné soustavy s ventilátorem.....	29
Obr. 2.2 – Fyzické uspořádání modulu tepelné soustavy s ventilátorem.....	31
Obr. 2.3 – Tepelné tělísko s topným rezistorem a snímačem teploty	32
Obr. 2.4 – Časový průběh signálů řídicích časování a jejich změn	36
Obr. 2.5 – Graf závislost relativní velikosti otáček ω_F na velikosti u_F budicího signálu.	46
Obr. 2.6 – Graf závislosti ϑ na ω_F pro různé hodnoty u_H	48
Obr. 2.7 – Graf pole izoterem přírůstků teploty tělíska nad teplotu okolí v rovině (ω_F, u_H)	49
Obr. 2.8 – Graf závislosti teploty ϑ na příkonu u_H pro minimální a maximální otáčky ventilátoru.....	50
Obr. 2.9 – Grafy průměrné a aproximované přechodové charakteristiky pro minimální otáčky ventilátoru.....	51
Obr. 2.10 – Grafy průměrné a aproximované přechodové charakteristiky pro maximální otáčky ventilátoru	52

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1 – Mapa paměti	14
Tab. 1.2 – Režimy funkce časovače.....	15
Tab. 1.3 – Signály na vývodech konektoru MCU_PORT	19
Tab. 1.4 – Závislost odporu na teplotě některých kovů	20
Tab. 2.1 – Typ, počáteční hodnota a význam proměnných programu	35
Tab. 2.2 – Obsah polí zobrazovací jednotky v jednotlivých režimech.....	40
Tab. 2.3 - Přehled podprogramů a jejich parametrů	43
Tab. 2. 4 – Závislost relativní velikosti otáček ω_F na velikosti u_F budicího signálu.....	45
Tab. 2.5 – Závislost zvýšení ϑ [°C] teploty tělíska nad teplotu okolí na otáčkách ω_F ventilátoru a příkonu u_H topného rezistoru.....	47

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Metoda nejmenších čtverců
- P II Měření přechodových charakteristik
- P III Obrazec desky plošných spojů a osazovací výkres

PŘÍLOHA P I: METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ

Hledání koeficientů aproximující funkce

$$\vartheta = u_H (a_2 \omega_F^2 + a_1 \omega_F + a_0) \quad (\text{P I.1})$$

metodou nejmenších čtverců spočívá v minimalizaci funkce

$$S(a_0, a_1, a_2) = \sum_{i=1}^n \left[\vartheta_i - u_{Hi} (a_2 \omega_{Fi}^2 + a_1 \omega_{Fi} + a_0) \right]^2, \quad (\text{P I.2})$$

přičemž veličiny ϑ_i , ω_{Fi} a u_{Hi} , jsou prvky posloupnosti $\{\vartheta_i, \omega_{Fi}, u_{Hi}\}_{i=1, \dots, n}$ bodů získaných měřením. Stacionární bod funkce $S(a_0, a_1, a_2)$ se hledá jako řešení soustavy

$$\frac{\partial S}{\partial a_j} = 0; \quad \text{pro } j \in \{0, 1, 2\} \quad (\text{P I.3})$$

Výsledná soustava rovnic pro koeficienty aproximující funkce pak je

$$\begin{aligned} a_0 \sum_{i=1}^n u_{Hi}^2 + a_1 \sum_{i=1}^n u_{Hi}^2 \omega_{Fi} + a_2 \sum_{i=1}^n u_{Hi}^2 \omega_{Fi}^2 &= \sum_{i=1}^n \vartheta_i u_{Hi} \\ a_0 \sum_{i=1}^n u_{Hi}^2 \omega_{Fi} + a_1 \sum_{i=1}^n u_{Hi}^2 \omega_{Fi}^2 + a_2 \sum_{i=1}^n u_{Hi}^2 \omega_{Fi}^3 &= \sum_{i=1}^n \vartheta_i u_{Hi} \omega_{Fi} \\ a_0 \sum_{i=1}^n u_{Hi}^2 \omega_{Fi}^2 + a_1 \sum_{i=1}^n u_{Hi}^2 \omega_{Fi}^3 + a_2 \sum_{i=1}^n u_{Hi}^2 \omega_{Fi}^4 &= \sum_{i=1}^n \vartheta_i u_{Hi} \omega_{Fi}^2 \end{aligned} \quad (\text{P I.4})$$

Funkce S má ve stacionárním bodu (a_0, a_1, a_2) , kde a_0 , a_1 a a_2 jsou řešením soustavy (P I.4), lokální minimum. Střední kvadratická odchylka aproximující funkce od bodů podle měření je pak dána jako

$$\delta_{RMS} = \frac{1}{n} S(A_0, A_1, B_2) \quad (\text{P I.5})$$

PŘÍLOHA P II: MĚŘENÍ PŘECHODOVÝCH CHARAKTERISTIK

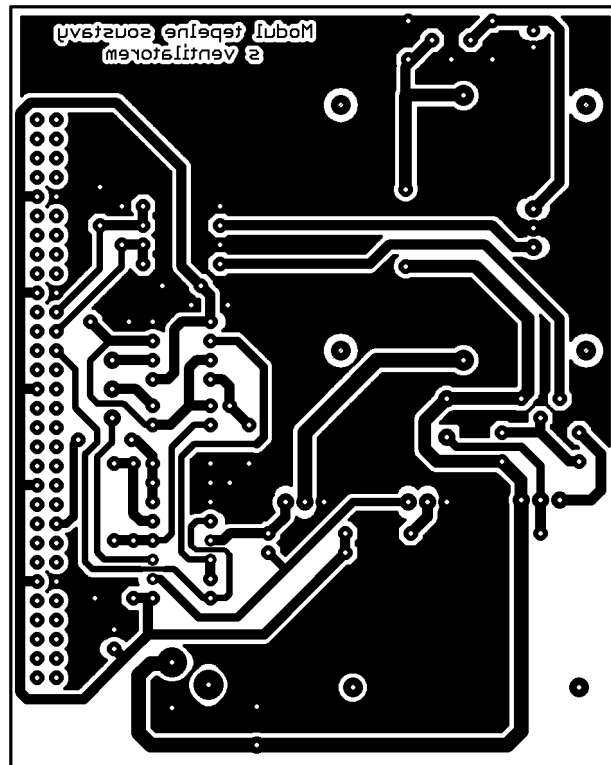
Tab P II.1 - Měření přechodových charakteristik pro přechody mezi ustálenými stavy A, B a C (podle Obr. 2.8) při otáčkách ventilátoru 55 %.

t [s]	θ [°C]					
	AC	CA	AB	BC	CB	BA
0	24,1	57,6	24,1	41,0	57,5	41,1
15	25,7	57,2	25,0	41,9	56,7	40,9
25	28,7	53,5	26,4	43,2	55,6	39,6
35	31,4	50,9	27,6	44,6	54,2	38,1
45	33,9	48,4	29,0	45,8	53,1	36,9
55	36,3	46,1	30,1	47,1	52,0	35,5
65	38,2	44,0	31,2	48,1	51,1	34,5
75	42,0	42,1	32,3	49,1	50,1	33,4
85	41,8	40,3	33,1	50,0	49,3	32,6
95	43,3	38,7	33,9	50,9	48,5	31,7
105	44,7	37,3	34,6	51,5	47,9	31,0
115	45,9	36,1	35,2	52,3	47,1	30,3
125	47,2	34,8	35,8	52,8	46,6	29,9
135	48,2	33,8	36,3	53,3	46,1	29,2
145	49,2	32,8	36,8	53,8	45,8	28,8
155	50,0	32,1	37,2	54,2	45,3	28,3
165	50,9	31,3	37,5	54,7	44,9	27,9
175	51,6	30,6	38,0	54,9	44,6	27,4
185	52,2	30,0	38,3	55,3	44,4	27,1
195	52,8	29,4	38,6	55,5	44,0	26,9
205	53,3	28,8	38,9	55,8	43,8	26,7
255	55,1	27,3	39,7	56,8	42,6	25,7
305	56,0	25,9	40,2	57,2	42,1	25,3
355	56,4	25,1	40,6	57,7	41,7	24,8
405	56,9	24,6	40,8	57,8	41,4	24,5
455	57,0	24,3	40,8	57,7	41,2	24,4
555	57,2	24,2	40,9	57,7	41,0	24,4
1000	57,6	24,1	41,0	57,7	41,1	24,0

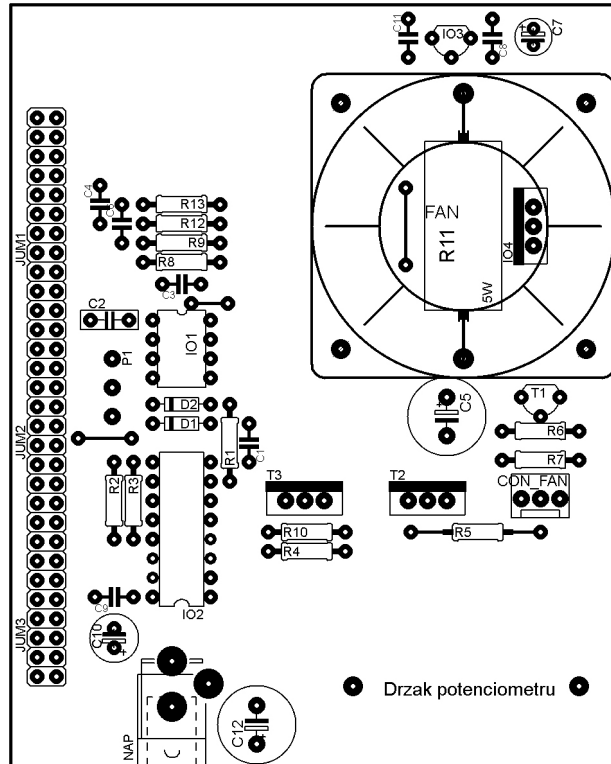
Tab. P II.2 - Měření přechodových charakteristik pro přechody mezi ustálenými stavy A, B a C (podle Obr. 2.8) při otáčkách ventilátoru 100 %.

t [s]	ϑ [°C]					
	AE	EA	AD	DE	ED	DA
0	24,1	47,0	24,4	35,5	47,1	35,8
15	25,9	45,3	25,4	36,2	46,3	35,3
25	28,4	42,9	26,7	37,6	45,0	33,9
35	30,7	40,4	28,0	38,8	43,9	32,5
45	32,9	38,2	29,0	39,8	42,8	31,6
55	34,8	36,3	29,8	40,8	41,9	30,6
65	36,4	34,6	30,8	41,6	41,1	29,6
75	37,9	33,1	31,4	42,4	40,5	28,8
85	39,1	31,8	32,0	43,1	39,9	28,2
95	40,3	30,9	32,5	43,8	39,2	27,6
105	41,3	29,8	33,0	44,1	38,7	27,1
115	42,0	29,1	33,5	44,6	38,3	26,7
125	42,7	28,3	33,7	44,9	38,0	26,3
135	43,2	27,7	34,1	45,3	37,7	26,0
145	43,7	27,1	34,4	45,6	37,4	25,8
155	44,2	26,7	34,6	45,8	37,3	25,5
165	44,7	26,3	34,8	45,9	37,0	25,4
175	45,1	25,9	35,0	46,1	36,9	25,2
185	45,3	25,7	35,1	46,2	36,7	24,9
195	45,6	25,4	35,2	46,2	36,6	24,9
205	45,9	25,2	35,3	46,3	36,5	24,7
255	46,6	24,6	35,4	46,7	35,9	24,6
305	46,9	24,1	35,4	46,9	35,8	24,3
355	47,2	23,9	35,4	47,0	35,6	24,1
405	47,1	24,0	35,5	47,2	35,9	24,0
455	47,0	23,8	35,6	47,3	35,9	24,0
555	47,0	23,7	35,6	47,1	35,8	23,8
1000	47,0	23,9	35,5	47,1	35,8	23,9

**PŘÍLOHA P III: OBRAZEC DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ A
OSAZOVACÍ VÝKRES**



Obr. P III.1 – Obrazec desky plošných spojů



Obr. P III.2 – Osazovací výkres