

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce
Obor: Aplikovaná elektrotechnika



Pec pro kompozitní materiály

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Daniel Měkota
Vedoucí práce: Ing. Pavel Koblík, Ph.D.
Rok: 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Měkota** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **499270**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Pec pro kompozitní materiály

Název bakalářské práce anglicky:

Furnace for Composite Materials

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte studii možných řešení realizace pece pro kompozitní materiály.
2. Navrhněte a realizujte automatizační proces pro vypékání kompozitních materiálů.
3. Zajistěte sběr potřebných dat pro vyhodnocení kvality regulačních pochodů.
4. Sebraná data zpracujte a výsledky zhodnoťte podle relevantních kritérií.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Callister, W., Rethwisch, D. G., Fundamentals of materials science and engineering : SI version, Wiley, Singapore, 2013.
- [2] Barbero, E. J., Introduction to composite materials design, CRC Press, Boca Raton, USA, 2011.
- [3] Šulc, B., Vítečková, M., Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů, Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004.
- [4] Lu, Ch., Du, S., Kuo, S., Development of an Online Blast Furnace Burden Profile Measuring System, China Steel Technical Report, No. 23, 2010.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Koblre, Ph.D. katedra elektrických pohonů a trakce

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

Datum zadání bakalářské práce: **11.02.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Pavel Koblre, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 22. května 2024

.....
Daniel Měkota

Poděkování

V první řadě děkuji Fakultě elektrotechnické ČVUT a týmu eForce Prague Formula za poskytnutí finančních prostředků, díky kterým bylo možné tento komplexní projekt realizovat.

Navazují díky samotným členům týmu eForce, jmenovitě kolegům Tomáši Krejčímu, Tomáši Zavadilovi, Hynkovi Novákovi za pomoc s mechanickou zástavbou pece, Karolovi Marinicovi za pomoc při tvorbě krytu rozváděče, Václavu Mikulcovi za velkou pomoc s mechanickou zástavbou a s vyztužením roštu a konečně Janu Cábovi, který vše zastřešil po administrativní stránce.

Díky patří též Ing. Lukáši Dvořáčkovi, Ph.D. za konstruktivní připomínky k psané stránce práce.

Velké poděkování patří Ing. Pavlu Kobrlemu, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, podnětné návrhy, které ji obohatily a za čas, který mi věnoval.

Závěrem děkuji své rodině a nejbližšímu okolí, jenž mi byly oporou jak během tvorby práce, tak během celého studia.

Daniel Měkota

Abstrakt: Tato práce se zabývá realizací pece pro kompozitní materiály a návrhem algoritmu pro řízení teploty pece. Teplota v peci je snímána termočlánky typu K. Vypékací algoritmus obsažený v mikrokontroléru ESP32 zajišťuje požadovanou regulaci teploty. Mikrokontrolér je doplněn modulem s displejem, který disponuje grafickým rozhraním, jenž umožňuje uživatelsky přívětivé ovládání pece.

Součástí práce je také tvorba mechanické zástavby pece, ve které dochází k vytvrzování kompozitních materiálů. Pro zajištění možnosti regulace teploty byl recyklován a modifikován rozváděč z pece, která byla v provozu doposud. K tomuto rozváděči byla zhotovena dokumentace. Finální výrobek byl podroben testům na reálných kompozitních dílech, které budou součástí monopostu participujícím v soutěži Formula Student. Nasbíraná data byla vyhodnocena pro různé tepelné sekvence dle relevantních kritérií.

Klíčová slova: kompozity, pec, regulace, tvrzení, Formula Student

Abstract: This thesis describes the design of a furnace for composite materials and the design of a furnace temperature control algorithm. The temperature in the furnace is sensed by K-type thermocouples. The curing algorithm implemented in the ESP32 micro-controller provides demanded temperature control. The micro-controller is complemented by a display module, which has a graphical interface that allows user-friendly control of the oven.

The work also includes the creation of a mechanical furnace housing in which the curing of composite materials takes place. To provide the possibility of temperature control, the switchboard from the furnace that was in operation until now was recycled and modified. Documentation was created for this switchboard. The work was tested on real composite parts that will be part of a mono-post participating in a Formula Student competition. The data collected during the different temperature sequences were evaluated according to the relevant criteria.

Key words: composites, furnace, regulation, curing, Formula Student

Obsah

Úvod	1
1 Soutěž Formula Student	3
1.1 Monocoque	4
1.1.1 Trubkový prostorový monocoque	4
1.1.2 Kompozitní monocoque	5
2 Kompozitní materiály	7
2.1 Rozdělení	7
2.2 Uhlíkové kompozity	8
2.2.1 Disperze	8
2.2.2 Matrice	9
2.2.3 Tvrdidlo	11
2.2.4 Prepreg	11
2.3 Výrobní proces	12
3 Termodynamika	15
3.1 Základní pojmy	15
3.1.1 Termodynamický systém	15
3.1.2 Druhy přenosu tepla	15
3.2 Tepelné procesy pece	16
3.2.1 Matematický aparát	16
3.2.2 Simulace	17
4 Existující provedení pecí	21
4.1 Domácí provedení	22
4.2 Průmyslové provedení	22
4.2.1 Pec s externí vývěvou	22
4.2.2 Autokláv	23
4.2.3 Odvod tepla	24
4.2.4 Normované měření teploty	24
5 Mechanická zástavba	25
5.1 Požadavky	25
5.2 Kovová konstrukce	26
5.2.1 Kostra	26
5.2.2 Oplechování	27
5.2.3 Rošt	28
5.3 Izolace	29
5.3.1 Vlastnosti izolace	29
5.3.2 Výběr a aplikace izolace	29
5.4 MDF obložení	31

6	Regulace teploty	33
6.1	Požadavky	33
6.2	Terminologie	33
6.2.1	Regulační obvod	34
6.2.2	Typy regulace	35
6.3	Regulace teploty v peci	37
6.3.1	Regulace statické hodnoty	37
6.3.2	Regulace dynamické hodnoty	38
7	Elektrotechnický hardware	39
7.1	Požadavky	39
7.2	Napájecí síť	39
7.3	Komponenty	40
7.3.1	Pec	40
7.3.2	Rozváděč	41
7.4	Dokumentace	42
8	Elektronický hardware	43
8.1	Požadavky	43
8.2	Snímání teploty	43
8.2.1	Senzor teploty	44
8.2.2	Rozmístění senzorů	46
8.3	Řídicí systém	47
8.3.1	Výběr řídicího systému	47
8.3.2	Signálová deska	48
8.3.3	Výkonová deska a periferie	49
8.3.4	DPS	52
9	Řídicí software	53
9.1	Požadavky	53
9.2	Backend	54
9.2.1	Měření teploty	54
9.2.2	Regulace teploty	54
9.2.3	Ukládání dat	57
9.3	Uživatelské ovládání	57
9.3.1	GUI	57
9.3.2	Manuál	59
10	Ověření kvality regulace	61
10.1	Metodologie měření	61
10.2	Matematický aparát	62
10.3	Naměřená data a zhodnocení	63
	Závěr	69
	Bibliografie	71
	Přílohy	75
A	Výkonová deska	75
A.1	Schéma	75
A.2	DPS	79
B	Dokumentace	83
C	Manuál	89

Nomenklatura

Obecné značení

y	Regulovaná veličina
u	Akční veličina
d, v	Poruchové veličiny
e	Regulační odchylka
w	Požadovaná veličina
Y	Obraz regulované veličiny
U	Obraz akční veličiny
D, V	Obrazy poruchových veličin
E	Obraz regulační odchylky
G_R	Přenos regulátoru
G_S	Přenos soustavy
N	Počet naměřených dat

Seznam veličin a konstant

R_m [Pa]	Mez pevnosti v tahu
E [Pa]	Modul pružnosti v tahu (Youngův modul)
ρ [kg · m ⁻³]	Hustota
η [-]	Účinnost
P_{in} [W]	Vstupní výkon
P_{out} [W]	Výstupní výkon
λ [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	Součinitel tepelné vodivosti
T [K]	Teplota
hys [°C]	Hystereze

q [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]	Hustota tepelného toku
Q [J]	Teplo
S [m^2]	Sledovaná plocha
d [m]	Tloušťka stěny
α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]	Koeficient přestupu tepla prouděním
ε [–]	Emisivita tělesa
σ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]	Stephan Boltzmanova konst. $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
T_1 [K]	Teplota chladnější strany stěny
T_2 [K]	Teplota teplejší strany stěny
P [W]	Výkon
U [V]	Elektrické napětí
I [A]	Elektrický proud
R [Ω]	Elektrická rezistivita
t_h [hod]	Čas měřený v hodinách
\bar{T} [$^{\circ}\text{C}$]	Aritmetický průměr naměřených teplot
T_i [$^{\circ}\text{C}$]	Teplota i-tého naměřeného vzorku
T_{trg} [$^{\circ}\text{C}$]	Teplota žádaná
s [$^{\circ}\text{C}$]	Směrodatná odchylka měření teploty
S_{reg} [$^{\circ}\text{C} \cdot \text{hod}^{-1}$]	Absolutní regulační plocha

Seznam zkratk

FS	Formula Student
FSE.01	Formula Student Electric první generace
FSE.11	Formula Student Electric jedenácté generace
TFT	Tenkovrstvý tranzistor (Thin film transistor)
PLC	Programovatelný logický kontrolér (Programmable logic controller)
TUS	Testování homogenního rozložení teploty (Temperature uniformity survey)
SAT	Testování přesnosti systému (System accuracy test)
MDF	Dřevěná deska z lisovaných pilin (Medium density fiber)
PID	Proporcionálně-integrační-derivační

TN-C	Typ sítě s vodičem PEN (Terre neutre combinée)
TN-S	Typ sítě s vodiči N a PE (Terre neutre séparé)
PEN	Vodič PEN
N	Střední vodič
PE	Ochranný vodič
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
NTC	Polovodičový teploměr s negativním teplotním koeficientem (Negative temperature coefficient)
PTC	Polovodičový teploměr s pozitivním teplotním koeficientem (Positive temperature coefficient)
SPI	Sériové periferní rozhraní (Serial peripheral interface)
MCU	Mikrokontrolér (Microcontroller unit)
CPU	Procesor (Central processing unit)
SD	Zabezpečená digitální (Secure digital)
LED	Světlo emitující dioda (Light emitting diode)
IR	Infračervené (Infrared)
GUI	Grafické uživatelské rozhraní (Graphical user interface)

Seznam obrázků

1.1	Soutěž Formula Student [2]	3
1.2	FSE.01 [3]	4
1.3	FSE.11 [3]	5
2.1	Rozdělení kompozitních materiálů [8]	8
2.2	Srovnání uhlíkových tkanin	9
2.3	Vytvrzená epoxidová pryskyřice s viditelným odlomením [11]	10
2.4	Prepreg [13]	11
2.5	Proces výroby kompozitního rámu	12
3.1	Vývoj teploty v materiálech o tloušťce 1 mm	17
3.2	Vývoj teploty v materiálech o tloušťce 10 cm	18
3.3	Vývoj teploty ve složené stěně	19
3.4	Křivky oteplování objektů pece	20
4.1	Model výhřevné komory [18]	22
4.2	Externí vývěva složená z motoru a pumpy	23
4.3	Autokláv umožňující změnu tlaku	23
5.1	Počátek mechanické zástavby	25
5.2	Kovová kostra pece	26
5.3	Oplechování pece	27
5.4	Srovnání provedení roštu	28
5.5	Pokládání izolace	30
5.6	Izolovaná pec	30
5.7	Pec s MDF obkladem	32
6.1	Schéma regulační smyčky [28]	34
6.2	Princip lineární interpolace [30]	38
7.1	Grafické znázornění rozváděče	42
8.1	Původní využití termočlánků v chladicím okruhu	45
8.2	Termočlánek spirály v kovovém obalu [39]	45
8.3	Senzory v prostoru pece	46
8.4	Přední strana modulu s displejem [41]	48
8.5	Zadní strana modulu s čipem a periferiemi [41]	48
8.6	Elementární topologie spínání	49
8.7	Detailní topologie spínání	49
8.8	Schéma spínacího obvodu [44]	50
8.9	Diskretizace a kvantifikace signálu ADC	51
8.10	Render přední strany DPS	52

9.1	Topologie systému	53
9.2	Sekvence měření teplot v jedné periodě	54
9.3	Rozhodovací proces režie	55
9.4	Rozhodovací proces režie s hysterezí	56
9.5	Struktura uživatelského rozhraní	58
9.6	Úvodní obrazovka	58
9.7	Volba sekvence	59
10.1	Důsledek chybného algoritmu	63
10.2	Srovnání měření teplot referenčního měřidla s měřidlem pece	63
10.3	Teploty spirál při ohřevu pece	64
10.4	Teploty při ohřevu pece	64
10.5	Průběh teploty při sekvenčním cyklu	65
10.6	Oscilace teploty spirál	65
10.7	Rozdílné průběhy teplot při rozdílných regulacích	66
10.8	Srovnání homogenity ohřátí pece při různých režimech větráků	67
10.9	Přirozený pohled na pec	68
10.10	Pohled na pec termokamerou	68

Seznam tabulek

2.1	Srovnání mechanických vlastností materiálů [9] [10] [1]	8
2.2	Srovnání časů vytvrzení [15]	13
2.3	Sekvence optimálního vytvrzení pryskyřice [15]	13
2.4	Přepočtená sekvence optimálního vytvrzení pryskyřice	13
3.1	Teploty stran stěn s různými λ při $d = 1$ mm	18
3.2	Teploty stran stěn s různými λ při $d = 10$ cm	18
3.3	Parametry stěn a prostředí	19
5.1	Žádané vnitřní využitelné rozměry pece	26
5.2	Rozměry pece s izolací	31
5.3	Konečné rozměry pece	32
8.1	Srovnání teplotních rozsahů sensorů teploty [36] [37] [38]	45
9.1	Struktura zpráv pece	57
10.1	Sekvence regulace s hysterezí	62
10.2	Vypočtené statistické údaje pro různé typy regulace	66
10.3	Směrodatné odchylky při měření homogenity teploty	67

Úvod

Hlavním cílem této práce je výroba nízkoteplotní pece s vlastním řídicím algoritmem pro vypékání kompozitních materiálů, které slouží k výrobě dílů elektrické formule.

Vybrání tohoto tématu bylo podmíněno rozebráním nespolehlivé a nebezpečné stávající pece pro kompozitní materiály týmu eForce Prague Formula.

Bude tedy nutné navrhnout a vyrobit pec s požadovanými vlastnostmi při zachování minimální finanční investice.

Zásadní je mechanická zástavba, jejíž provedení musí korelovat s potřebami vytvrzování kompozitních materiálů, a zároveň svým chováním nesmí v žádném případě ohrozit bezpečnost a zdraví uživatelů. S inspirací značně pomohou již realizovaná řešení.

Vymezenému objemu prostoru mechanickou zástavbou bude nutné dodat potřebnou energii ve formě tepla pro dosažení zvýšení teploty. To vede k nutnosti výběru topných těles a adekvátních spínacích prvků, které zajistí regulaci energie do topných těles vstupující.

Regulaci zajistí správný výběr řídicího systému, který bude snímat teplotu v peci vybranými senzory a patřičně ji modifikovat dle preferencí uživatelů.

Vyhodnocování uživatelských žádostí společně se správou dějů v peci bude mít na starosti vlastnoručně sepsaný řídicí algoritmus nahraný v řídicím systému.

Po výsledném zhotovení funkční pece budou proměřeny různé tepelné procesy, a bude vyhodnocena kvalita regulace teploty pro dosažení optimálních výsledků vytvrzování kompozitních materiálů.

Kapitola 1

Soutěž Formula Student

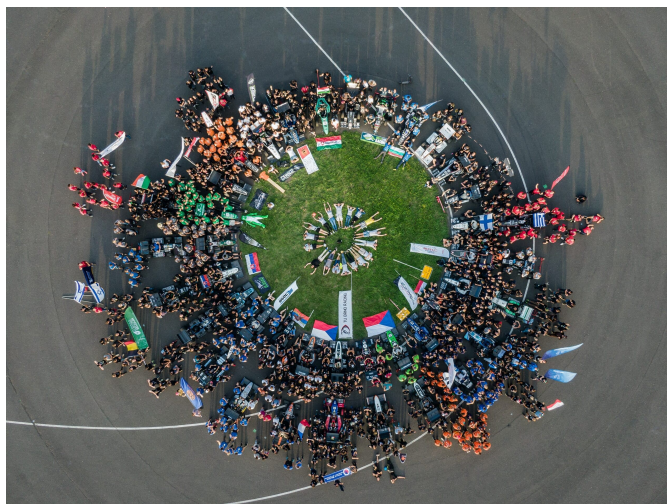
Celosvětová závodní a technická soutěž, které se účastní přes 800 univerzit z celého světa. Studentské týmy participující v soutěži mají za úkol každý rok navrhnout, vyrobit a předvést monopost ve stylu formule.

Tento monopost je následně hodnocen dle mnoha kritérií, která korelují s disciplínami, jež se vyskytují na závodech konajících se o letních prázdninách. Disciplíny lze rozdělit do dvou hlavních kategorií: [1]

Dynamické disciplíny Při těchto disciplínách se testují jízdní schopnosti formule a to hned několika metodami. Zásadní je zrychlení, které otestuje "Akcelerace". Důležitá je stabilita při působení velkých laterálních sil, kterou otestuje "Skid pad". Výdrž formule testuje disciplína "Endurance", tedy závod na 22 km. [1]

Statické disciplíny Statické disciplíny prověřují schopnost týmu zdůvodnit své postupy při výrobě monopostu. Zejména při události "Engineering design", kdy do pitu týmu přijde porota složená z předních inženýrů světových automotive značek. Technika jde vždy ruku v ruce s financemi, proto následuje událost "Cost and manufacturing", při které tým představí, co vše bylo nutné investovat, aby vznikla daná formule. Zakončení představuje "Business plan", kdy členové týmu prezentují fiktivní plán, jak přesvědčit investory ke sponzoringu nápadu zahrnujícího formuli. [1]

Fotografie ze závodů FS je patrná na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Soutěž Formula Student [2]

1.1 Monocoque

Monocoque je společně s dalšími komponenty integrální součástí monopostu, neboť právě zde dochází k usazení pilota. Ačkoliv je v dnešní době již možná jízda autonomní, tedy bez pilota, stále je monocoque nepostradatelný. Ať už proto, že jej vyžadují pravidla, tak proto, že poskytuje prostor pro většinu elektronických, mechanických a autonomních systémů.

Technologie, kterou je monocoque vytvořen, je definována zkušenostmi a finančními prostředky týmu. Možným řešením je výroba trupu z ocelových trubek či z kompozitních materiálů.

1.1.1 Trubkový prostorový monocoque

Trubkový rám představuje odrazový můstek pro většinu týmů díky jednoduchosti své výroby. Příprava tohoto typu konstrukce nemusí trvat ani týden, což usnadní řadu věcí.

Do jisté míry stačí správné naměření vzdáleností trubek a práce šikovního svářeče. Kompenzací jsou nevýhody v podobě vysoké hmotnosti a omezené modifikovatelnosti a tvárnosti.

Daný rám se kvůli bezpečnosti a snížení odporu vzduchu pokrývá aditivními materiály. Pro představu, u první generace elektrické formule týmu eForce se jednalo o tvrzený plast. [3]

Váha celého monopostu FSE.01 potom dosáhla 322 kg, což bylo na první generaci vozu nového týmu v roce 2012 úctyhodné, nicméně současná úroveň strojů vyžaduje užití komplexnějších metod.

Model FSE.01 je k vidění na obrázku 1.2.



Obr. 1.2: FSE.01 [3]

1.1.2 Kompozitní monocoque

Rám sendvičového typu z uhlíkových vláken prosycených pryskyřicí, jehož středem je hliníková voština, umožňuje týmům posunout hranice svých monopostů ještě dál, než tomu bylo v případě kovového rámu. Není náhodou, že nejlepší týmy FS soutěže používají právě tuto technologii. [4]

Důvodem jsou vlastnosti kompozitních materiálů, které zajišťují vysokou pevnost rámu, a to při zachování minimální váhy.

Analogickou výhodou je vysoká míra tvárnosti, což umožňuje navrhnout rám přímo na komponenty potřebné pro provoz monopostu.

Takto vytvořené formule tak mohou dosahovat až poloviční hmotnosti oproti výše uvedené FSE.01. Pro představu lze uvést FSE.11, které váha naměřila 198 kg. Snížení hmotnosti potom pozitivně ovlivňuje vlastnosti celého auta.

Nevýhodou, která se na první pohled nemusí zcela projevit, je náročný postup přípravy takového dílu. Pro dosažení výsledků známých ze supersportů je zapotřebí dodržet řadu kroků s maximální pečlivostí. Pečlivost se zde může projevit i při návrhu rámu s požadavkem na co nejlepší servisovatelnost. Ta bývá totiž v porovnání s trubkovým rámem nižší, neboť uhlíkový rám je vcelku, kdežto ocelový nikoliv. Při snaze dostat se k elektronickým jednotkám tak nemusí vždy být cesta snadná.

Příprava kompozitních materiálů se tedy může prodloužit na týdny až měsíce. Vždy je určena financemi, neboť týmy, které si mohou zaplatit výrobu dílů u specializovaných firem, snižují riziko vlastního pochybení. Ideální je v tomto případě navázání vzájemně výhodné partnerské dohody, ze které mohou profitovat obě strany.

Model FSE.11 je k vidění na obrázku 1.3.



Obr. 1.3: FSE.11 [3]

Kapitola 2

Kompozitní materiály

Samotnému popisu tvorby pece předchází úvod do kompozitních materiálů, neboť právě pro tyto materiály je pec určena. Vlastnosti a chování pece tedy korelují s požadavky výroby kompozitů, pro dosažení optimálních výsledků jak během procesu vypékání, tak po jeho skončení.

Ačkoliv kompozitní materiály na Zemi existují déle, než lidstvo samotné, došlo k jejich vlastní klasifikaci ve třídách materiálů až v polovině dvacátého století. [5]

Hlavní příčina, stojící za zrodem samostatného označení, byla jejich úmyslná výroba. Kompozity do té doby známé, byly přirozené a tedy stvořené bez zásahu člověka. Kompozitní materiál v dnešní době je tedy uměle vytvořený. [5]

Jedná se o materiály, které jsou složeny ze dvou či více materiálů – fází. Tedy z materiálů, které do sebe vzájemně nedifundují a v každém okamžiku a prostoru je tak možné rozlišit jejich disjunktní fyzikální struktury. Takové spojení vede k pozoruhodnému jevu známému jako synergie. [6]

Synergie je jev, při kterém dochází ke zlepšení vlastností spojených materiálů, a to převyšujíc prostý součet vlastností původních. Příkladem může být beton, který je kombinací kamínků a cementu. Kamínky zajišťují pevnost, zatímco cement tvárnost. [7] To je tedy produkt, který byl vytvořen člověkem. Z přírodních materiálů lze s jistou rezervou, právě kvůli výše zmíněné klasifikaci, jmenovat dřevo, nejstarší z kompozitů, složené z celulózových vláken uložených v ligninu. [7]

2.1 Rozdělení

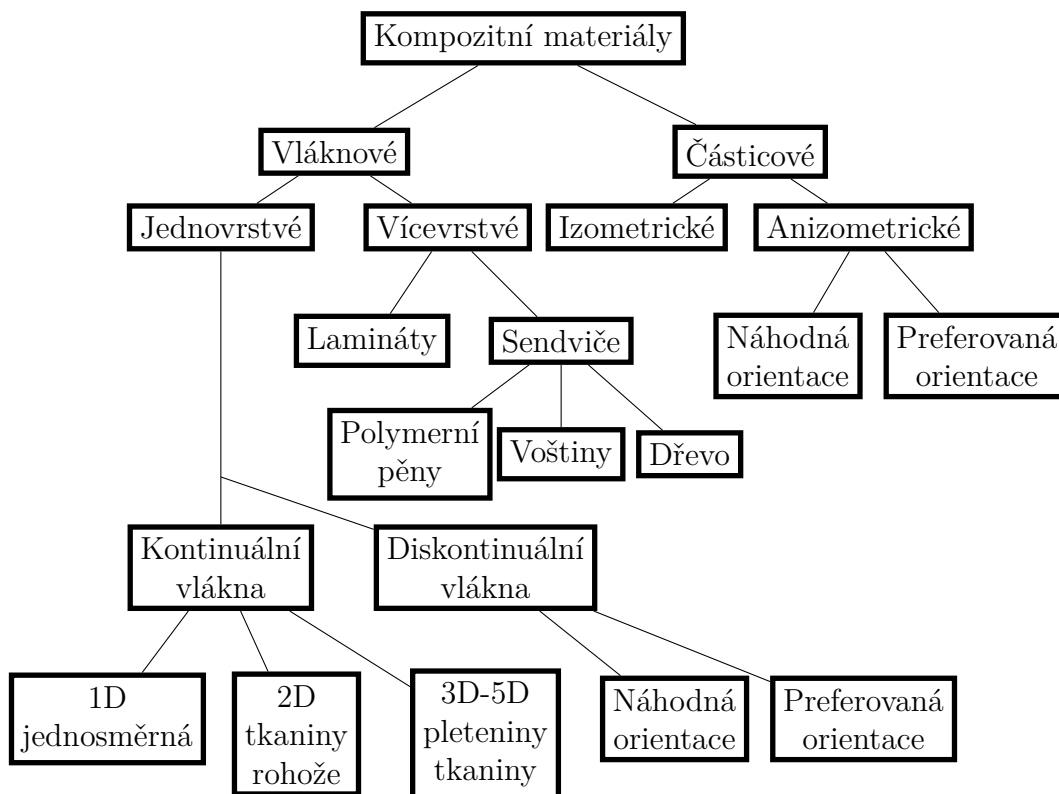
Z předchozích odstavců je zřejmé, že unikátních vlastností kompozitů je dosaženo spojením převážně dvou fyzikálních substancí, které lze rozdělit na složky.

Matrice (matrix) Pojivá spojitá složka zajišťující tvárnost.

Plnivo (disperse) Nespojité složky zajišťující pevnost.

Synergii lze také chápat jako potlačení negativních vlastností materiálů, kterými materiály disponují v případě jejich odděleného využití. Zmínit lze pryskyřici, která je velmi tvárná, avšak křehká, či uhlíková vlákna, která samostatně nelze zformovat do požadovaného tvaru. [5]

Konfigurací, kterých mohou tyto materiály nabývat, je mnoho a jsou určeny zejména vlastnostmi disperzní fáze. Obrázek 2.1 znázorňuje dělení kompozitů.



Obr. 2.1: Rozdělení kompozitních materiálů [8]

2.2 Uhlíkové kompozity

Z obrázku 2.1 je patrné, že existuje mnoho typů kompozitních materiálů. Pro účely FS soutěže se využívají převážně kompozity, kde disperzi tvoří uhlíková vlákna.

Výroba aerodynamických prvků a uhlíkového rámu se spoléhá na užití kontinuálních vláken naskládaných přes sebe, takzvaných tkanin uložených v matrici. Části mechanicky více namáhané kromě uhlíkových vláken obsahují i voštiny či polymerní pěny. Ty zajišťují výztuž potřebnou k odolání náporu. Navrstvené tkaniny tak přechází do vícevrstvých sendvičových struktur.

2.2.1 Disperze

Uhlíková vlákna disponují vysokou pevností v tahu, vysokým modulem pružnosti a nízkou hustotou v porovnání s alternativními materiály pro danou aplikaci. Srovnání je uvedeno v tabulce 2.1.

Tab. 2.1: Srovnání mechanických vlastností materiálů [9] [10] [1]

Materiál	Mez pevnosti v tahu	Modul pružnosti	Hustota
Uhlíková vlákna	3 – 7 GPa	200 – 500 GPa	2.00 g/cm ³
Ocel 4130	540 MPa	205 GPa	7,85 g/cm ³

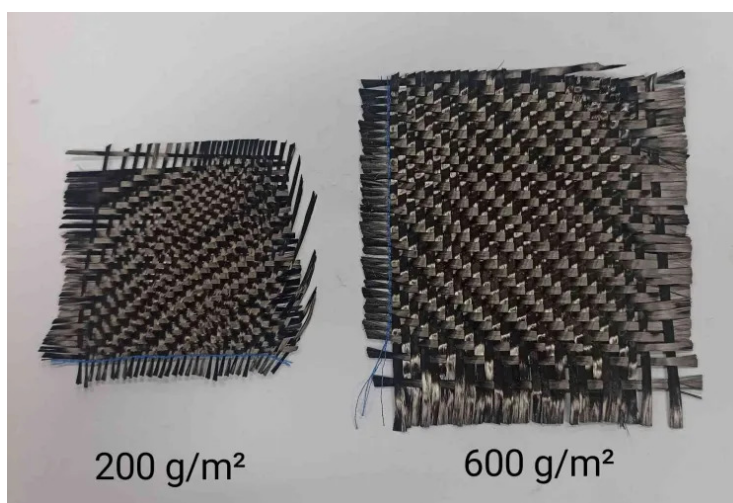
Tvoří dominantní prvek závodního automobilového průmyslu, který stojí za zrodem FS. Také proto mají studentské formule s automobilovým průmyslem tolik společného. [9]

Užití samostatných vláken je ojedinělé. Ve většině případů je využíváno vláken spletených do tkanin.

Tkaniny lze rozdělit do více kategorií dle gramáže. Příklady jsou viditelné na obrázku 2.2:

200 g/m² Tkanina s jemnější strukturou a nižší pevností ve srovnání s níže uvedeným typem.

600 g/m² Tkanina s hrubší strukturou a vyšší pevností ve srovnání s výše uvedeným typem.



Obr. 2.2: Srovnání uhlíkových tkanin

2.2.2 Matrice

Spojité fáze kompozitu s řadou funkcí. Zásadní je vázání uhlíkových vláken vedoucí k rovnoměrné distribuci zátěže po celé ploše disperze. Některé vlastnosti materiálu jako jsou příčná tuhost a pevnost závisí právě na typu užití matrice. Vlastnosti celého kompozitu jsou tedy převážně definovány volbou matrice.

Dále matrice ovlivňuje teplotní a chemickou odolnost kompozitu. Odolnosti potom určují podmínky, kterým se může kompozit vystavit. [7]

V neposlední řadě má matrice vliv na tepelnou a elektrickou vodivost. Kombinace s vodivými uhlíkovými vlákny tak může vytvořit potenciálně vodivý povrch. Tento fakt implikuje nutnost testování elektrické rezistivity čtyřsvorkovou metodou na závodech. [1]

Způsob skladování je téměř libovolný, dokud nedojde ke smíchání s tvrdidlem.

Typů matic je mnoho, zde bude uvedeno hlavní rozdělení:

1. Termosetové matrice
2. Termoplastické matrice

Termosetové matrice

Formované nevratnými chemickými přeměnami pryskyřice do křížově propojené polymerní matrice. Obecně je polymer nazýván pryskyřicí v průběhu výroby a matricí po vytvrzení. [7] Pro svou nízkou viskozitu se užívají pro impregnaci u rychlých výrobních procesů a jejich dělení je následující:

Polyesterové pryskyřice s výhodným poměrem ceny a výkonu užívané v chemicky škodlivých prostředích s teplotami do 121 °C.

Vinyl esterové pryskyřice s vyšší korozní odolností v porovnání s polyesterovými. Přechodník v poměru ceny a výkonu ve srovnání s epoxidovými pryskyřicemi.

Epoxidové pryskyřice s vynikajícími mechanickými, antikorozními vlastnostmi a nízkým smršťovacím poměrem ve srovnání s ostatními materiály. Nabízí jednoduchý postup vytvrzení při maximální teplotě 150 °C. Po vytvrzení nabízí teplotní odolnost dosahující až 175 °C. Vytvrzená pryskyřice je k vidění na obrázku 2.3.

Fenolické pryskyřice mají nízkou hořlavost a nižší produkci kouře v případě hoření ve srovnání s levnějšími pryskyřicemi.



Obr. 2.3: Vytvrzená epoxidová pryskyřice s viditelným odlomením [11]

Termoplastické matrice

Tyto pryskyřice neprochází při vytvrzování chemickými přeměnami. Dochází u nich k přechodu polymeru z pevného do měkkého stavu, ve kterém dojde k formaci dle požadavků. Po tomto procesu dochází k chladnutí a opětovnému návratu do pevného stavu.

Ačkoliv při zpracování dochází k měknutí polymeru, stále pryskyřice disponuje vysokou viskozitou, které tak musí být přizpůsoben celý proces výroby.

Výhodou je možná oprava dílů, neboť matrice může být přivedena do modifikovatelného stavu opakovaně zvýšením teploty. [7]

2.2.3 Tvrdidlo

Chemické látky, které reagují s termosetovou pryskyřicí. Pryskyřice se při této reakci – polymeraci stává matricí a tvrdne.

Používá se několik druhů tvrdidel pro epoxidové pryskyřice. Každý typ disponuje různými mechanickými a chemickými vlastnostmi, čímž určuje možnosti své aplikace:

Aminová tvrdidla mají rychlou reakci, která může proběhnout při pokojové či mírně zvýšené teplotě. To limituje čas, ve kterém se může pryskyřice zpracovat.

Anhydridová tvrdidla přichází na řadu při aplikacích, které vyžadují delší čas zpracovatelnosti, neboť k aktivaci s epoxidem dochází až při zvýšené teplotě.

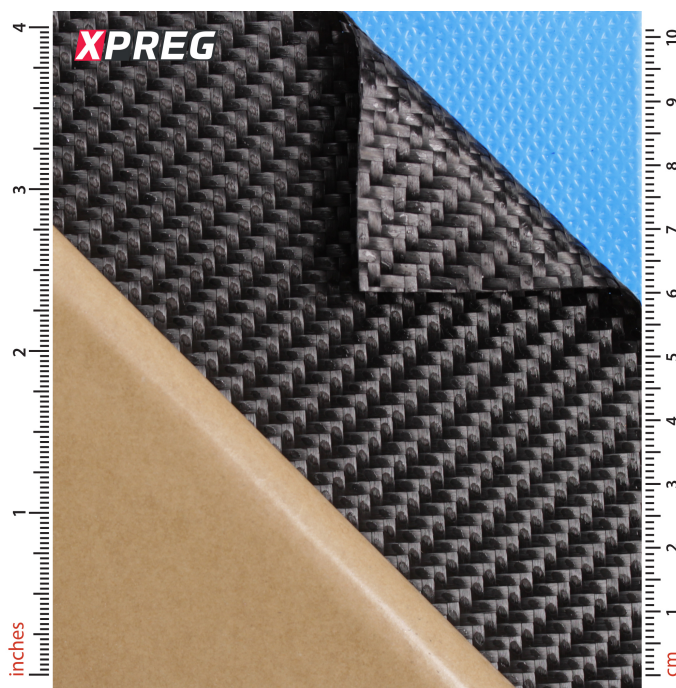
Karbonylová tvrdidla využívána při lepení a laminaci pro své funkční skupiny obsahující uhlík a kyslík.

Fenolická tvrdidla pro aplikace vyžadující vysokou teplotní a chemickou odolnost. [12]

2.2.4 Prepreg

Polotovar uhlíkové tkaniny s nevytvrzenou pryskyřicí a tvrdidlem viditelný na obrázku 2.4. V matrici, která vznikne po vytvrzení, je tak minimalizován výskyt defektů, jako jsou vzduchové bubliny, které mohou vzniknout při tvorbě vlastní emulze.

Faktory limitující užití prepregu jsou vysoká cena a nutnost skladovat předem prosycené role v mrazácích o velmi nízké teplotě pro potlačení chemických reakcí, které by proběhly při teplotě pokojové.

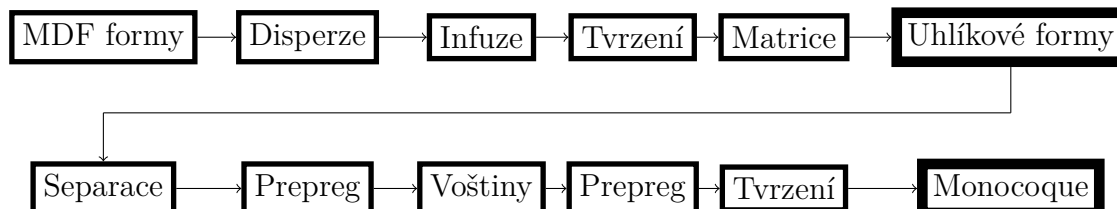


Obr. 2.4: Prepreg [13]

2.3 Výrobní proces

Využití kompozitního materiálu se svými unikátními vlastnostmi předchází řada procesů, které musí být dodrženy s maximální pečlivostí pro dosažení optimálních výsledků.

Pro vyrobení různých komponent jsou procesy odlišné. Zde uvedené procesy stojí za zrodem uhlíkového rámu formule.



Obr. 2.5: Proces výroby kompozitního rámu

Celý proces by mohl být podrobně popsán. To však není tématem této práce, proto zde bude rozebrán pouze krok "Tvrzení", při kterém přichází na řadu pec pro kompozitní materiály.

Z obrázku 2.5 je patrné, že pro výrobu rámu je nutné provést tvrzení alespoň dvakrát. Důvodem je výroba kompozitní formy, do které se posléze vyskládá uhlíkový monocoque sendvičové struktury.

Uhlíkové formy totiž mají stejnou tepelnou roztažnost jako uhlíkový rám, a tak dochází v průběhu tvrzení k minimálnímu nežádoucímu pnutí.

Tvrzení

Ať se jedná o uhlíkovou tkaninu prosycenou pryskyřicí či prepreg, pro dosažení výrobcem udávaných parametrů musí dojít k adekvátnímu vytvrzení.

K tomu dochází v závislosti na typu užití pryskyřice při pokojové či zvýšené teplotě. Dodání tepla spouští u epoxidových pryskyřic polymerizaci.

Vypékání může zastávat dvě rozličné funkce:

Curing Vypékání modulární pryskyřice vedoucí k jejímu ztvrdnutí. Po celou dobu musí být vypékaná komponenta vakuována, aby došlo k optimálnímu propojení disperze s matricí. V případě výroby kompozitních forem má tlak sekundární funkci a to vytlačení přebytečné pryskyřice do filcu, jenž se nachází na povrchu prosycené tkaniny. [14]

Post curing Též známý jako dovytvrzení matrice při zvýšené teplotě, která již není v modulární formě. V tomto případě se nemusí prvek vakuovat.

Před samotným působením zvýšené teploty musí dojít ke smíchání pryskyřice s tvrdidlem v poměru, který je uveden výrobcem. Tím se zahájí modulární fáze, při které může dojít k vlastnoručnímu sycení tkanin štětcem či více pokročilé infuzi.

Infuze zajistí rovnoměrný prostup emulze tkaninami za působení podtlaku, který emulzi do tkanin vtahuje.

Jako příklad lze uvést epoxidovou pryskyřici EL160 s aminovým tvrdidlem, u kterých dochází k částečnému vytvrzení při pokojové teplotě. [11]

Pro dosažení vlastností udávaných výrobcem je důležité matrici plně vytvrdit. Z tabulky 2.2 je patrné, že se při pokojové teplotě jedná o dlouhodobou záležitost, a proto přichází na řadu zvýšená teplota.

Tab. 2.2: Srovnání časů vytvrzení [15]

Čas tvrzení @ 25 °C	Plné vytvrzení @ 25 °C
24 Hours	7 Days

Zvýšená teplota může být konstantní či v čase proměnná.

V tabulce 2.3 je znázorněna sekvence ideálního vypékání. Za povšimnutí stojí dlouhá oteplovací rampa s nízkým teplotním gradientem minimalizující riziko deformace.

Tab. 2.3: Sekvence optimálního vytvrzení pryskyřice [15]

Krok	Počáteční Teplota	Rychlost Stoupání	Doba Trvání	Koncová Teplota	Uplynulý Čas
1	50 °C	0.1 °C/min	14:10 h	135 °C	14:10 h
2	135 °C	Impregnace	3:00 h	135 °C	17:10 h
3	135 °C	Přirozené chladnutí	00:45 h	~20 °C	17:55 h

Tento proces lze přepočítat na rozdílný časový interval při působení vyšší teploty. Přichází tak na řadu následující tepelná sekvence 2.4, která zajistí optimální vytvrzení kompozitní formy.

Tab. 2.4: Přepočtená sekvence optimálního vytvrzení pryskyřice

Krok	Počáteční Teplota	Rychlost Stoupání	Doba Trvání	Koncová Teplota
1	50 °C	0.1 °C/min	15:00 h	140 °C
2	140 °C	Impregnace	3:00 h	140 °C
3	140 °C	Přirozené chladnutí	1:00 h	20 °C

Uvedenou rampu lze aproximovat skokovým zvedáním teploty o 12 °C po každých dvou hodinách. [15] Zápor je fakt, že se touto regulací vnáší do procesu nežádoucí odchylka, která může potenciálně způsobit nesprávné vytvrzení pryskyřice.

Možnou alternativou by byla jemnější manuální modifikace teploty, která by však znamenala časově náročnou činnost vyžadující stálý dohled alespoň jednoho člověka.

Pro dosažení optimálního vytvrzení kompozitních materiálů s jistou úsporou vlastního času je tak výhodné mít vlastní pec schopnou regulovat spojitě teplotu dle různorodých požadavků.

Kapitola 3

Termodynamika

Pece odjakživa sloužily k záměrnému zvýšení teploty v určitém objemu prostoru. Není tedy od věci přiblížit si vědní oblast, která se zkoumáním tepelných procesů zabývá.

3.1 Základní pojmy

Tepelné procesy jsou vždy sledovány v určitém prostoru, který je označován systémem. Prostor ležící mimo sledovanou oblast nese název okolí. [16]

3.1.1 Termodynamický systém

Rozlišují se tři varianty systému:

Izolovaný – zabraňuje výměně látky a energie systému s okolím.

Uzavřený – umožňuje výměnu energie systému s okolím, látky však nikoliv.

Otevřený – umožňuje výměnu energie i látky systému s okolím.

3.1.2 Druhy přenosu tepla

Přenos tepla lze rozdělit do tří hlavních kategorií:

Kondukcce – přenos tepla vedením, ke kterému dochází při přímém kontaktu dvou či více látek všech skupenství.

Konvekce – přenos tepla prouděním. K tomuto přenosu tak může docházet pouze u tekutin, nikoliv u pevných látek. Dle intenzity rozlišována přirozená, nucená, smíšená.

Radiace – přenos tepla vyzařováním, které je úměrné teplotě záření emitujícího záření. Energie přenáší fotonem nepotřebuje k šíření látkové prostředí, což umožnilo vznik života na Zemi. [16]

Termodynamický systém tedy zahrnuje každou pozorovanou oblast, proto i na pec pro kompozitní materiály bude nahlíženo touto optikou.

3.2 Tepelné procesy pece

Jak bude uvedeno v dalších kapitolách této práce, pec sestává z izolovaného objemu vzduchu, kterému je dodáváno teplo prostřednictvím elektrických topných spirál.

V ideálním případě by se jednalo o izolovaný systém, který by v sobě uchovával veškerou energii. V praxi nicméně vždy dochází ke ztrátám, které účinnost snižují.

Účinnost je faktor udávající výhodnost provozu zařízení.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.1)$$

Čitatel výrazu 3.1 představuje výkon, který poskytuje dané zařízení, jmenovatel představuje příkon, který zařízení odebírá. Výkony v čase představují energii, proto by zápis s energiemi byl analogický.

3.2.1 Matematický aparát

V subsekcí 3.1.2 byly uvedeny tři typy šíření tepla, pro které existuje matematický popis udávající tepelný tok. [16]

Fourierův zákon – Konduktce

Základní zákon vedení tepla, při kterém je tepelný tok přímo úměrný gradientu teplot a součiniteli tepelné vodivosti λ .

Záporné znamínko ve vzorci 3.2 indikuje směr tepelného toku od teplejšího konce k chladnějšímu.

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \nabla T \quad (3.2)$$

Množství tepla, které projde určitou plochou za dobu τ v jednorozměrném prostředí představuje výraz 3.3. Pokud není rozhodující směr proudění, lze znaménka vyjmout.

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{d} \cdot \tau \quad (3.3)$$

Newtonův ochlazovací zákon - Konvekce

Ze vzorce 3.4 je patrné, že přenos tepla je přímo úměrný velikosti koeficientu α a rozdílu teplot.

$$q = \alpha \cdot \Delta T \quad (3.4)$$

α není materiálovou vlastností a bývá určena experimentálně.

Radiace

Přenos tepla sáláním je dán velikostí čtvrtých mocnin teplot, emisivitou daného materiálu $\varepsilon \in (0, 1)$ a Stefan-Boltzmannovou konstantou $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \Delta T^4. \quad (3.5)$$

3.2.2 Simulace

Při návrhu pece je zásadní brát v potaz schopnosti materiálů vést teplo, tedy vyrovnávat teplotu v tělese vzájemným působením částic.

Zdejší simulace obsahující maximální provozní teplotu pece 150 °C pomohou odhalit potřebné vlastnosti materiálů pro mechanickou zástavbu pece tak, aby došlo k minimalizaci ztrát a tedy maximální účinnosti.

Neméně důležitým kritériem je povrchová teplota pece, která z vnější strany musí být taková, aby nedošlo k ohrožení zdraví osob či nevratnému poškození materiálu.

Tepelný tok jednoduchou stěnou

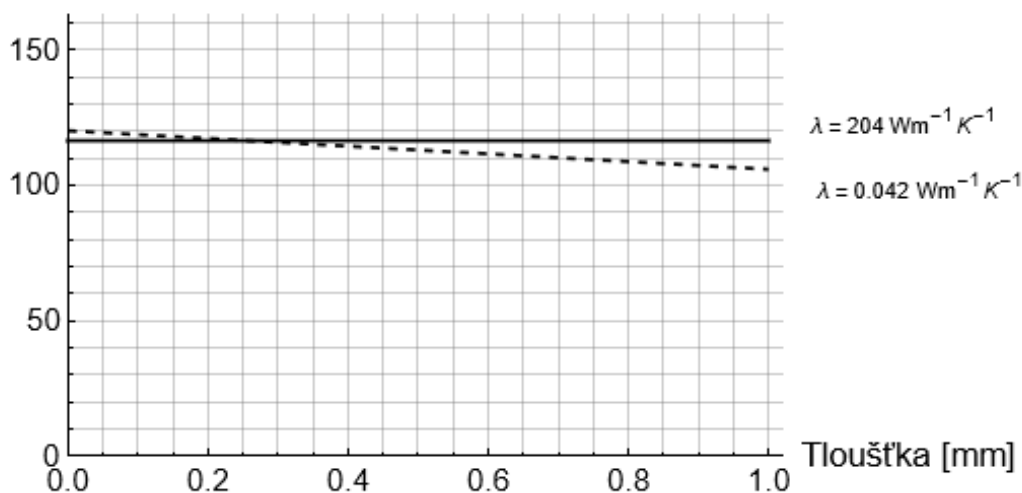
Simulace průběhu teploty v homogenním tělese vychází z upravené rovnice 3.2 pro jednodimenzionální užití. Dvě teploty představují teplotu na dvou stranách stěny (T_2 je teplota teplejší strany a T_1 je teplota chladnější strany). Jmenovatel d představuje tloušťku dané stěny.

$$q = \lambda \cdot \frac{T_2 - T_1}{d} \quad (3.6)$$

Ze vzorce 3.6 je patrné, že hustota tepelného toku a tedy i teplota a ztráty v materiálu závisí na rozdílu teplot daném aplikací, ale i na ovlivnitelných vlastnostech, kterými jsou tloušťka a součinitel tepelné vodivosti materiálu. [17]

Průběh teploty v materiálech o tloušťce 1 mm

Teplota [°C]



Obr. 3.1: Vývoj teploty v materiálech o tloušťce 1 mm

Graf 3.1 indikuje rozdílný vývoj teplot v materiálech o rozdílných součinitelích tepelné vodivosti λ .

Teplotní spád průběhu s vysokou hodnotou $\lambda = 204 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ je mírný. Teplota pravé chladnější strany stěny o šířce 1 mm inklinuje k teplotě vyšší na straně levé.

U průběhu s $\lambda = 0,042 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ je spád strmější, což je způsobeno nižší hodnotou λ . Teplota pravé, chladnější, strany stěny je tedy vzdálenější teplotě na straně stěny teplejší.

Již při tloušťce stěny 1 mm dochází k pozorovatelným rozdílům teplot pro různé součinitele tepelné vodivosti λ . Číselné vyjádření teplot nese tabulka 3.1.

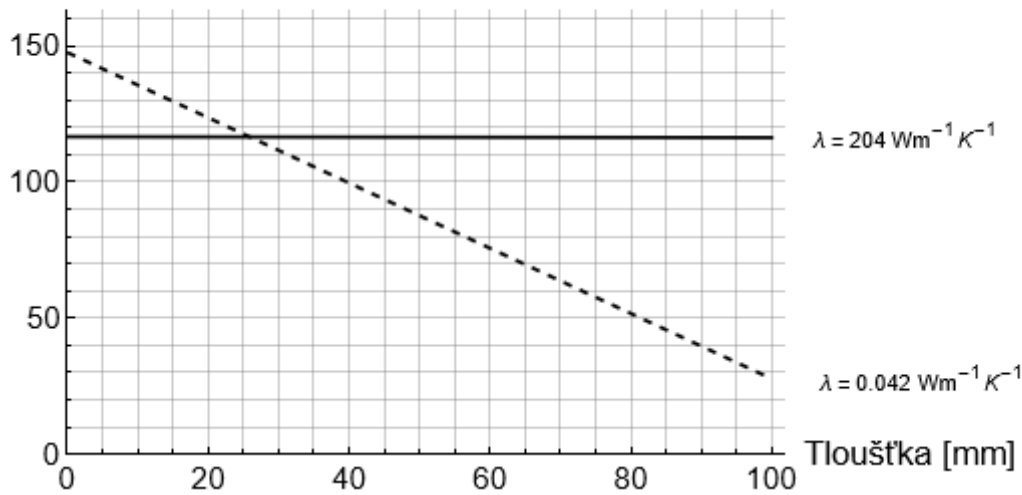
Tab. 3.1: Teploty stran stěn s různými λ při $d = 1$ mm

λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	T_2 [$^{\circ}\text{C}$]	T_1 [$^{\circ}\text{C}$]
204	116	116
0,042	120	106

Diametrálně odlišné rozdíly průběhů přichází při zvýšení tloušťky materiálu stokrát. Jsou patrné z grafu 3.2.

Průběh teploty v materiálech o tloušťce 10 cm

Teplota [$^{\circ}\text{C}$]



Obr. 3.2: Vývoj teploty v materiálech o tloušťce 10 cm

Z grafu 3.2 je patrné, že při použití materiálu o $\lambda = 204 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ nedochází k téměř žádnému tepelnému gradientu. U materiálu o $\lambda = 0,042 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ je strmost značná.

Tento fakt potvrzují teploty na protějších stranách stěny uvedené v tabulce 3.2.

Tab. 3.2: Teploty stran stěn s různými λ při $d = 10$ cm

λ [$\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$]	T_2 [$^{\circ}\text{C}$]	T_1 [$^{\circ}\text{C}$]
204	120	106
0,042	147	28

Důvod, proč má smysl se nad těmito daty pozastavit spočívá zejména v bezpečnosti. Při užití prvního materiálu s vyšší tepelnou vodivostí by byla teplota na povrchu chladnější strany stále vyšší než $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, což by mohlo bezpečnost a zdraví lidí ohrozit značně.

Sekundární důvod tvoří homogenita teploty uvnitř zahřívaného objemu, která je v prvním případě u stěn téměř o $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ nižší oproti požadovaným $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$. V případě druhém je teplota stěn nižší o $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tepelný tok složenou stěnou

V praxi se běžně vyskytují stěny složené z více materiálů s různými vlastnostmi. U pece tomu není jinak, neboť každý užitý materiál zastává odlišnou funkci.

V nejteplejší oblasti stěny, tedy v části stěny, která bezprostředně sousedí s ohřátým vzduchem se nachází materiál 1, který odolá takto zvýšeným teplotám. Ve střední části stěny se nachází izolující materiál 2, který zabraňuje úniku tepla. Na straně s pokojovou teplotou se nachází materiál 3 zajišťující mechanickou odolnost vůči vnějším vlivům.

Tabulka 3.3 nese parametry stěny a okolí. Velikost α souvisí s pohybem tekutin obtékajících vnější povrch stěny. Vyšší hodnota znamená vyšší pohyb.

Pro přehlednost v tabulce nejsou uvedeny jednotky.

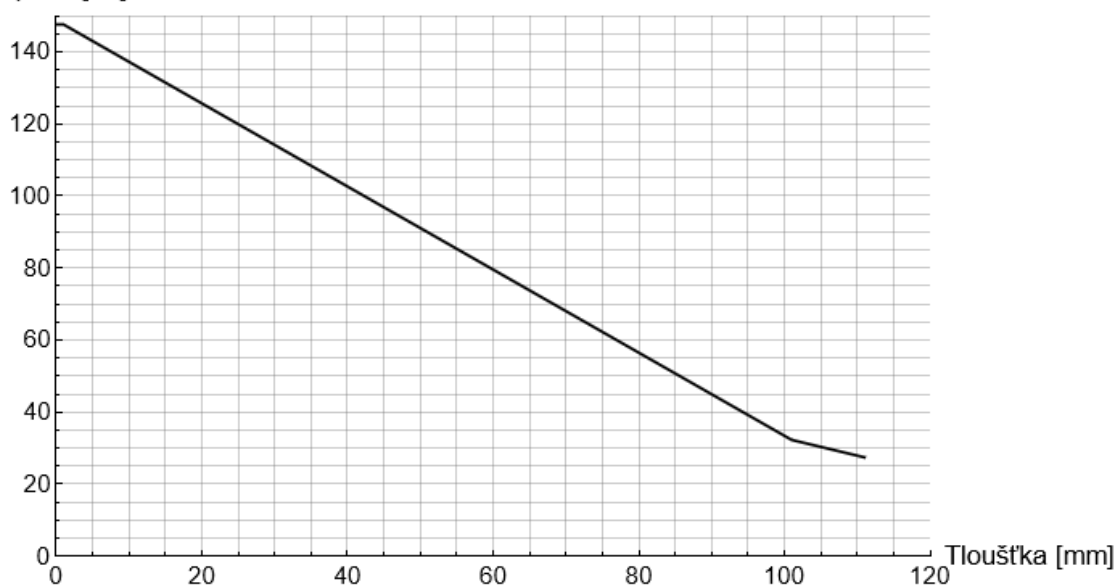
Tab. 3.3: Parametry stěn a prostředí

α_{In}	λ_1	λ_2	λ_3	α_{Out}
17	204	0,042	0,1	3

Matematicky je složená stěna popsána soustavou pěti rovnic o pěti neznámých, jejíž vyřešení poskytne hodnoty potřebné k vykreslení následujícího průběhu 3.3. [17]

Průběh teploty v materiálu se složenou stěnou o tloušťce 111 mm

Teplota [°C]



Obr. 3.3: Vývoj teploty ve složené stěně

Graf 3.3 indikuje sekvenční vývoj teploty skrze tyto tři zmíněné fáze stěny.

V intervalu tloušťky od 0 do 1 mm je teplotní spád minimální, protože se jedná o materiál s λ_1 o vysoké hodnotě.

V prostřední fázi je strmost nejvyšší, neboť se jedná o materiál s λ_2 o nízké hodnotě. Fáze třetí má střední gradient, neboť má i střední hodnotu λ_3 .

Ohřev pece

Neméně důležitou součástí podkladů pro výrobu pece je představa o průběhu ohřívání vzduchu v peci. Algoritmus vycházející z Fourier-Kirchhoffovy rovnice 3.7 slouží k simulaci oteplení jednotlivých částí pece.

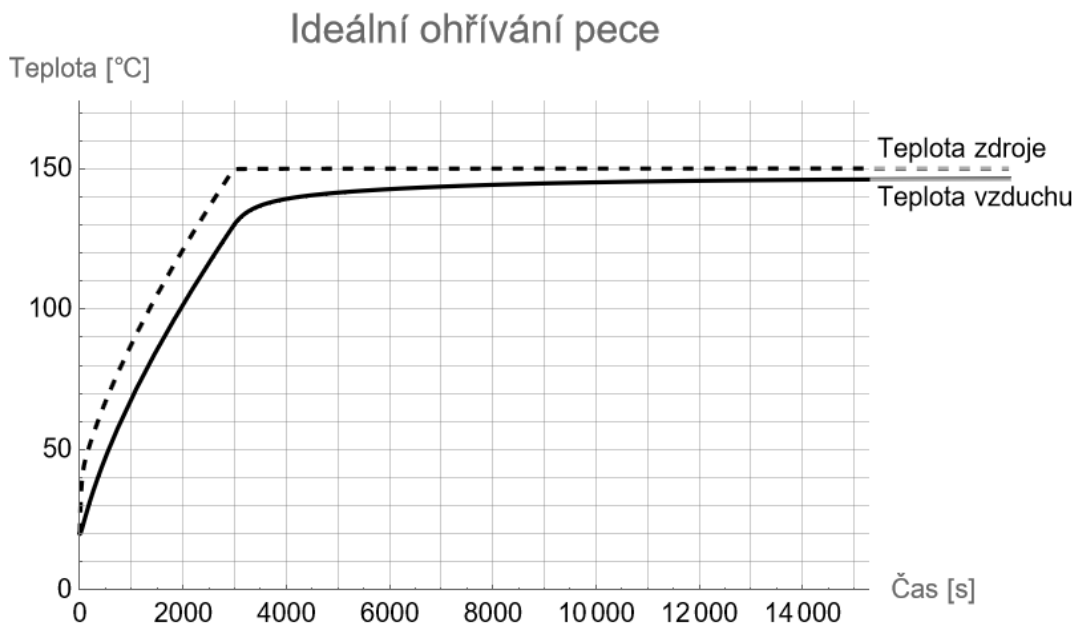
$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q_v \quad (3.7)$$

Rovnice neposkytuje informaci o tepelných vlnách, neboť je rovnicí druhého řádu podle prostoru, ale prvního řádu v čase. To pro tuto aplikaci však není podstatné a proto jí lze využít.

Další nutnou součástí jsou okrajové podmínky, které musí být pro každou simulaci nastaveny, neboť od těch se odvíjí výsledný průběh. Takovou okrajovou podmínkou může být počáteční teplota.

Slovo ideální implikuje fakt, že se jedná o simulaci, která nebere v potaz ztráty a jiné faktory vyskytující se v reálném světě, podobně jako simulace předchozí. Analogicky doba oteplení tepelných zdrojů je zvolena bez ohledu na skutečné prvky.

I přes tyto limitace pomáhá simulace přiblížit děj oteplování.



Obr. 3.4: Křivky oteplování objektů pece

Z grafu 3.4 je patrné, že doba ohřátí vzduchu je delší, než doba ohřátí topného tělesa. To může vést k rozhodnutí, že měřidel teplot v peci bude muset být více právě z důvodu požadavku měření rozdílných teplot rozdílných substancí.

Kapitola 4

Existující provedení pecí

Typů pecí v průmyslu i domácím prostředí existuje nepřehledné množství. Provedení pece se tak musí uzpůsobit konkrétní aplikaci zejména po mechanické, elektrické a řídicí stránce.

Požadavky na pec úzce korelují s požadavky jednotlivých komponent participujících při přípravě kompozitních dílů.

Pro dosažení optimálního návrhu je vhodné představit již realizovaná provedení, ze kterých lze čerpat inspiraci.

Hlavními kritérii pro výsledné řešení pece jsou:

Rozměry – limitují velikost vypékaných dílů. Větší rozměry umožňují přípravu větších dílů, avšak vyžadují vyšší vklad energie. Menší rozměry nezajistí výrobu velkých dílů, nicméně pro menší aplikace jsou úspornější.

Interval teplot – volen dle materiálů, které se v peci plánují vypékat. V případě vypékání kompozitních materiálů se jedná o teplotu potřebnou ke správnému vytvrzení pryskyřice, zpravidla do 150 °C. [11]

Kvalita regulace teploty – závislá na vypékaném objektu. Dodržení teploty v žádaném intervalu zajistí optimální vlastnosti vytvrzené pryskyřice. To jsou takové vlastnosti, které udává výrobce v technických listech.

Modifikace tlaku – realizována dvěma způsoby.

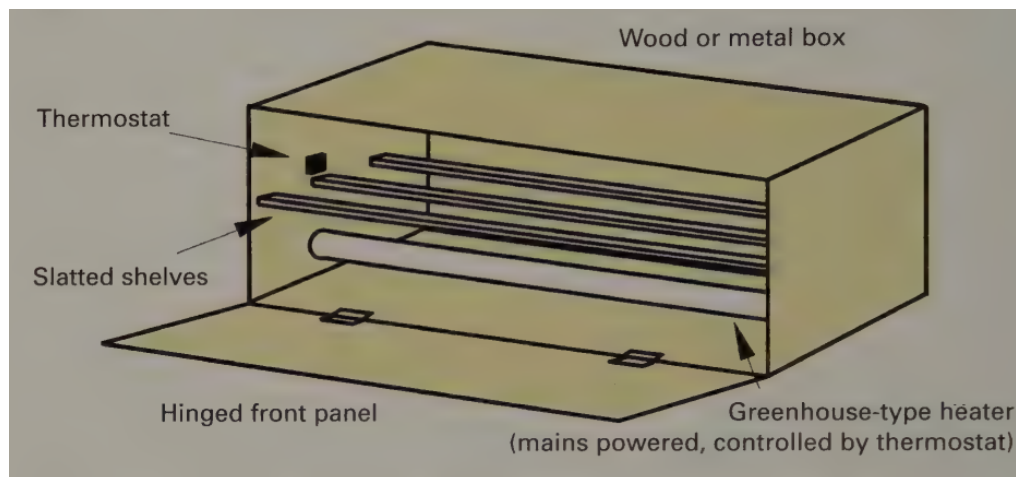
Prvním způsobem je podtlak, který je realizován zavedením trubice z externí vývěvy do vzduchotěsné fólie. Trubice odvádí vzduch z této fólie, ve které jsou obaleny vypékané komponenty. Tato metoda nevyžaduje zpevněné tělo pece. Podtlak působí z vnitřní strany fólie.

Druhým způsobem je přetlak, jenž vzniká v peci s pevnou konstrukcí, která umožňuje zvýšení tlaku uvnitř svého objemu. Vypékané komponenty stále musí být obaleny ve vzduchotěsných fóliích. Zde však přetlak působí z vnější strany fólie.

Cena x Kvalita Jako u všech ostatních technických aplikací je i zde cena integrální součástí výsledného návrhu. Pomáhá zodpovědět mnoho technických dotazů, jenž vzniknou v průběhu vývoje.

4.1 Domácí provedení

Vzhledem k relativně nízkým teplotám, při kterých již dochází k vytvrzení pryskyřice ($\pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$), se výrobně nejedná o zas tak náročný úkol. Pro splnění požadavků stačí vyrobit výhřevnou komoru sestávající z pár zdrojů tepla a izolace. Zdroji tepla mohou být světelné zdroje se žhaveným vláknem, které zajišťují onu výhřevnost. Pro regulaci lze využít běžného domácího termostatu. [18]



Obr. 4.1: Model výhřevné komory [18]

4.2 Průmyslové provedení

Průmyslové pece nabízí v porovnání s domácím provedením řadu výhod. Jsou to zejména bezpečnostní a kvalitativní normy, které zajišťují správné a deterministické chování pece. Zmínit lze normu ČSN EN 60398 ED.2 (361104), která definuje požadavky na zařízení pro elektroohřev a elektromagnetické zpracování. Uživatel se tak může plně soustředit na procesy přípravy kompozitu a nemusí řešit ladění systému. [19]

Pro řízení se v drtivé většině používá programovatelných logických automatů, též známých jako PLC. Tato zařízení zajišťují spolehlivý provoz, kterým se rozumí regulace teploty v určeném rozsahu od žádané hodnoty. Žádaná hodnota může být konstantní, ale i dynamická, tedy v čase proměnná.

Daná PLC potom umožňuje propojení s centrálním systémem pomocí sběrnic staršího Profibusu či moderního Profinetu. Dochází tak k agregaci řízení více disjunktivních zařízení v jednom uživatelském rozhraní. To je velmi přínosné, neboť vytvrzení kompozitů musí kromě zvýšené teploty doprovázet změna tlaku, kterou lze realizovat externím zařízením.

4.2.1 Pec s externí vývěvou

Je-li dostupná klasická atmosferická pec, musí být doplněna vývěvou, což je zařízení určené k odsání vzduchu z určitého objemu. Kompozitní díl, sestávající z uhlíkových a skelných vláken prosycených pryskyřicí s tvrdidlem nanesených na hladké formě je pokrytý filcem. Takto je uložen do vzduchotěsné fólie, ze které je odčerpán vzduch. Přebytková pryskyřice tak difunduje do filcu, což zapříčiní optimální prosycení tkanin. Vývěva tvořící podtlak je k vidění na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Externí vývěva složená z motoru a pumpy

4.2.2 Autokláv

Speciální typ pece navržený tak, aby umožňoval změnu tlaku ve svém celém objemu. V porovnání s předešlou realizací tak nemusí být doplněn externí vývěvou. K homogennímu prosycení tkanin nedochází při působení podtlaku, nýbrž přetlaku. Zvýšený tlak uvnitř autoklávu tlačí na identický kompozitní díl obalený ve vzduchotěsné fólii. Tlak tedy nepůsobí zevnitř směrem do středu, nýbrž zvenku směrem do středu. Další postup prosycení je tudíž analogický.

Vzhledem k podstatě daného řešení vzniká více požadavků na bezpečnost. Upřesněny jsou mimo jiné normou ČSN EN 764-1+A1 (690004) Tlaková zařízení. [20]

Realizace autoklávu je k vidění na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Autokláv umožňující změnu tlaku

4.2.3 Odvod tepla

Neméně důležitý proces vedle ohřívání je chlazení, které vede k poklesu teploty v peci. Takový pokles v případě dobře izolované pece může trvat dlouho, a proto je žádoucí navrhnout adekvátní způsob chlazení.

Odvod tepla dveřmi

Jedním ze způsobů odběru tepla je otevření dveří. Tento způsob zajistí efektivní, ale riskantní způsob chlazení, neboť může dojít k deformaci materiálu v důsledku rychlé změny teploty.

Odvod tepla komínky

Přirozenější způsob snižování teploty nabízí provedení s vytvořenými otvory ve stěnách, které umožňují odvod teplého vzduchu. Tento odvod tepla lze regulovat akčními prvky, jako jsou elektromagnetické ventily či servomotory.

Odvod tepla vodním systémem

Nejpreciznější metoda spočívající ve využití vodního potrubí. Voda cirkuluje zahříváním objemem pece a prostorem o pokojové teplotě. Teplo z pece je tak odváděno za cenu minimální nehomogenity v závislosti na optimalizaci návrhu chlazení.

U pecí s vyšší teplotou může vodní systém chránit části pece, které by jinak danou teplotu stěží vydržely. [21]

4.2.4 Normované měření teploty

Zvyšující se nároky na kvalitu vyráběných kompozitních dílů, zejména pro automobilový a obranný průmysl, přinášejí rostoucí nároky na tepelné opracování materiálů.

Výroba musí být provedena tak, aby opakovatelně byly splněny požadavky vymezené normami CQI-9 (pro automobilový průmysl) a AMS 2750 (obrný průmysl). [22]

Testovaná kritéria

TUS Temperature uniformity survey – měření homogenity teplot uvnitř užitého objemu a na jeho okraji definovaným počtem termočlánků.

SAT System accuracy test – srovnání teplot naměřených systémovým termočlánkem s naměřenými hodnotami zkalibrovaného měřidla. Odchylka nesmí překročit hranici ± 1.1 °C.

Archivace – nutný podklad k vyhodnocení a doložení naměřených průběhů pro zpětnou analýzu. [23]

Kapitola 5

Mechanická zástavba

Zde bude přiblížen postup výroby mechanické struktury pece od samého začátku, jenž je k vidění na obrázku 5.1. Jedná se pravděpodobně o časově nejnáročnější proces v průběhu celé tvorby práce.

Koncept mechanické zástavby byl do jisté míry inspirován původní pecí týmu eForce, která byla rozebrána pro svůj suboptimální provozní stav, který byl až zdraví nebezpečný.



Obr. 5.1: Počátek mechanické zástavby

5.1 Požadavky

Zásadní hledisko, které ovlivňuje celkové proporce pece, je bezpečnost. Dále je nutné zohlednit zatížitelnost, neboť se předpokládá vypékání forem na monocoque, jejichž hmotnost může dosahovat až 100 kg. Formám se musí přizpůsobit i rozměry.

Teplotní odolnost musí být minimálně 150 °C, neboť právě tato teplota je maximální a adekvátní pro vypékání kompozitů. Reálně bude teplota v části pece vyšší, a to kvůli topným spirálám, jejichž maximální naměřená teplota byla 512 °C, a které budou rozebrány podrobněji v kapitole 7.

Samozřejmostí jsou minimální náklady, proto je snaha o obstarání většiny materiálu ze stávajících zdrojů dílny eForce.

Požadavky zde uvedené vycházejí z diskusí se členy týmu, jejichž požadavkům byl koncept pece tvořen na míru.

5.2 Kovová konstrukce

Základní prvek mechanické zástavby pece sestávající z kovové kostry, oplechování a posuvného roštu. Konstrukce odpovídá velikostí vypékaným dílům. Největší díl, na který by měla být dimenzována vyžaduje, aby rozměry ohřívaného objemu odpovídaly rozměrům uvedeným v tabulce 5.1.

Tab. 5.1: Žádané vnitřní využitelné rozměry pece

Šířka	Výška	Hloubka
1 m	1 m	2,5 m

5.2.1 Kostra

Kostra je nosná část pece respektující požadované rozměry. Je schopna unést váhu oplechování, roštu, izolace a obložení. Umožňuje uživatelsky přívětivé nakládání materiálu ve zvýšené poloze, což zmírňuje nároky na zvedání těžkých břemen do rizikových poloh. Z tohoto důvodu byl ohřívaný objem posunut do výšky 10 cm od země.

Pro konstrukci bylo využito ocelových profilů typu L bez úpravy nalezených na dílně a koupených ocelových profilů typu L pozinkovaných.

Montáž proběhla užitím šroubů a matic M8. Původní kostra pece byla svařena, což zajistilo robustnost a odolnost, ale značně ztížilo její rozebrání. Důvodem, proč nedošlo ke svaření nové kostry pece, bylo zdravotní riziko, které vzniká při svařování pozinkované oceli odpařováním oxidu zinečnatého. [24]

Kromě obvodových hran byly vyrobeny příčky určené pro montáž topných spirál a roštu. Celá kostra pece je zobrazena na obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Kovová kostra pece

5.2.2 Oplechování

Oplechování slouží k fyzickému oddělení ohřívaného objemu a tím přispívá k vytvoření vlastního mikroklimatu. Odděluje čistý vnitřek pece od izolace. Přispívá k homogennímu výhřevu, neboť se rovnoměrně nahřívá po celé své ploše pro svou dobrou tepelnou vodivost, viz kapitola 3.

Plech byly věnovány partnersky firmou Alfun v rozměrech jiných než původně objednaných. Materiál tak bylo nutné upravit do požadovaných rozměrů. Bylo-li to možné, využilo se stříhacího stolu na plech. V případě, kdy rozměry plechu převyšovaly schopnosti stolu, bylo využito nůžek na plech.

Po dosažení požadovaných rozměrů byly vyměřeny a vyvrtány díry v plechách dle spojovacího materiálu aplikovaného na kostru za účelem možnosti servisovatelnosti.

Nasazení plechů na kostru vedlo ke zvýšení stability celé konstrukce, neboť došlo k zamezení pohybu do té doby méně stabilní kostry.

Hliníkové obložení bylo potřeba připevnit ke kostrě, což bylo provedeno aplikací M4 šroubů s maticemi a širokými podložkami společně s vázacím drátem.

Plech byly umístěny tak, aby v žádném bodě nedocházelo k jejich dotyku se zemí. Především se tak vzniku tepelných mostů, které by odváděly teplo.

Na obrázcích 5.3 je mimo jiné zobrazeno uložení větráků ve stěně.



(a) Vnitřní oplechování pece



(b) Vnější oplechování pece

Obr. 5.3: Oplechování pece

5.2.3 Rošt

Jeden z hlavních přínosů nové pece měl být efektivní způsob vkládání vypékaného materiálu. Dřívější pec disponovala horním otvíráním, které bylo v mnoha ohledech nepraktické a nebezpečné. V ohrožení byla bezpečnost členů týmu, neboť panty držící horní stěnu byly vytržené a samovolnému zavření víka bránilo prkno, které zrovna leželo poblíž.

Původní myšlenkou byla výroba čelního dvoudveřového otevírání. Vypékané komponenty by tak bylo možné poměrně příjemně vkládat do celého prostoru pece. Limitem však byly výrobní schopnosti a lokace pece, neboť došlo k obklopení pece pracovním ponkem.

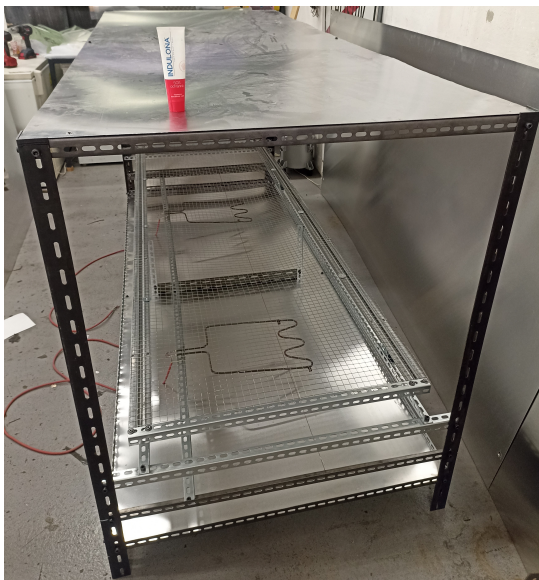
Řešení poskytl posuvný rošt s možností vkládání materiálu ze strany.

Rošt byl původně koncipován jako obdélníkový rám, jehož hrany tvořily ocelové úhelníky typu L, a jehož výplň byla síť z ocelového drátu s oky 1x1 cm. Na spodních stranách úhelníků byla přidělena kovová kolečka s dostatečnou nosností.

Tato konstrukce měla být uložena na kolejnicích s odpovídajícími rozměry. Kolejnice byly nainstalovány do pece. Po instalaci došlo k průhybu kolejnic z důvodu veliké vzdálenosti (2,5 m) a působení gravitační síly. Tato realizace tedy nepřipadala v úvahu.

Kolejnice tak byla zaměněna za ocelové profily, které vykazovaly odolnost vyšší. I přes toto opatření byla dodělána vzpěra, jenž poskytla podporu uprostřed pece. Srovnání obou provedení je znázorněno na obrázcích 5.4.

Proběhlo vyztužení roštu pro udržení požadovaného břemene. Zadní strana roštu byla opatřena koncovým dorazem, který zabraňuje riziku vytrhnutí zad pece.



(a) Rošt s prohnutou kolejnicí



(b) Rošt s pevnými úhelníky

Obr. 5.4: Srovnání provedení roštu

5.3 Izolace

V ideálním případě představuje izolace hranici izolovaného systému, kterým je vnitřní objem pece. Reálně dochází ke ztrátám a tudíž tvoří hranici uzavřeného systému.

Obklopuje vnější stranu oplechování a zamezuje prostupu tepla z ohřívané oblasti.

5.3.1 Vlastnosti izolace

V zásadě lze uvažovat vlastnosti mechanické a tepelné.

Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti závisí na užitém materiálu. Ve většině případů se jedná o vatu z minerálních vláken, tedy vláken skelných či kamenných. Tato vlákna vznikla rozvlákněním vstupních minerálů roztavených při vysoké teplotě a následném přidání pojiv či impregnačních prostředků. Benefit původu vláken představuje vysoká teplota tavení a potlačování hoření.

Alternativní provedení představuje vakuová izolace, kde izolant tvoří prostor s vnitřním tlakem pod 5 mBar. [25]

Při výběru správné izolace hrají hlavní roli následující kritéria:

Rozměry a modifikovatelnost – Minerální izolace jsou vyráběny s tloušťkou od 40 mm do 100 mm, přičemž rozměry lze upravovat řezáním materiálu.

Vakuové izolace jsou vyráběny s tloušťkou 10 mm při zachování izolačních schopností. Rozměry není možné upravovat, neboť by došlo k proražení tlakové bariéry a ztrátě izolačních schopností.

Maximální provozní teplota – Izolace slouží převážně k zateplení objektů s pokojovou teplotou. Jejich maximální provozní teplota se pohybuje okolo 200 °C u minerálních izolací a 90 °C, krátkodobě až 130 °C u vakuových izolací. [26] [25]

Izolační vlastnosti

Integrální vlastností je schopnost bránit průchodu tepla objemem izolace. Toho je dosaženo mechanickou strukturou izolace, neboť vlákna v minerální vlně jsou obklopena nehybným vzduchem.

Vzduch sice přirozeně přenáší teplo prouděním, ale pokud se podaří zabránit jeho pohybu, přenos tepla vedením je pouhých 37 mWm⁻¹K⁻¹.

Vakuum zabraňuje průchodu proudu vedením i prouděním, tudíž zůstává sálání, které lze potlačit jiným způsobem (např. použitím reflexního materiálu).

Minerální izolace tak mohou mít $\lambda_{min} = 0,038 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. [26]

Vakuové izolace zde mají převahu a to díky $\lambda_{vac} = 0,007 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. [25]

5.3.2 Výběr a aplikace izolace

V sekci 5.1 byly uvedeny teploty, které musí výběr izolace respektovat. Z tohoto důvodu nebylo možné aplikovat izolaci určenou pro fasády, neboť by její tepelná odolnost nebyla dostačující.

Řešení poskytl izolace ORSTECH 45 z čedičové vlny, která je určena pro vysokoteplotní izolace vzduchotechniky. Dle normy ČSN EN 14706 s maximální provozní teplotou 400 °C splňuje požadavky s rezervou. [27]

Součinitel tepelné vodivosti s velikostí $\lambda = 0,042 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, což je dostačující. Nižší ztráty by zajistila vakuová izolace s nižším součinitelem tepelné vodivosti. Jsou to nemožnost úpravy rozměrů a nízká teplotní odolnost, které zapříčinily nevyužití tohoto typu izolace.

Dalším rozhodujícím faktorem byla cena, která po průzkumu trhu byla nejméně výhodnější právě u izolace Orstech 45, jejíž aplikaci znázorňují obrázky 5.5 a 5.6.

Ačkoliv je izolace hydrofobní, stále potřebuje určitou vnější ochranu pro delší životnost. Ať už kvůli ochraně proti vlhkosti, tak zejména kvůli ochraně proti mechanickému poškození z důvodu fyzické podstaty vlny.



Obr. 5.5: Pokládání izolace



Obr. 5.6: Izolovaná pec

5.4 MDF obložení

Původním konceptem obložení pece byla tvorba analogického oplechování jako se nachází uvnitř pece i z vnější strany pece. Od začátku výstavby nicméně bylo zřejmé, že by se jednalo o esteticky náročný úkol. Bylo tak využito dřevěného materiálu MDF – medium density fibers, pilin lepených a lisovaných.

Z pohledu teplotního se jednalo o proveditelné řešení, neboť se obložení nachází na chladné straně izolace. Riziko, kterým MDF disponují, je ohyb v důsledku nerovnoměrného ohřátí stran. Je tedy žádoucí pevné spojení konstrukce obložení.

Jedná se o rozšířené řešení, které zajišťuje vyšší útlum tepelného toku v porovnání s případem, kdy by vnější plášť tvořil hliník. [7] Kapitola 3 je toho důkazem.

Tvoří mechanickou ochranu izolace společně s ochranou zdraví lidí vyskytujících se v okolí pece. Nekrytá minerální vlna totiž může nepříznivě ovlivnit lidský organismus. Ani ne tak toxicitou jako spíš ohrožením dýchacích cest. [26]

V neposlední řadě značně přispívá k celkovému vzhledu pece.

Výrobní proces obložení započal specifikací rozměrů. V sekci 5.2 byly uvedeny rozměry vnitřního prostoru pece. Zde je třeba zahrnout přítomnost izolace a zvýšení výšky pece kvůli spirálám a roštu, čímž rozměry přechází na hodnoty uvedené v tabulce 5.2.

Tab. 5.2: Rozměry pece s izolací

Šířka	Výška	Hloubka
1.2 m	1,35 m	2,7 m

Existují různé tloušťky desek. Pro účely zamezení dotyku izolace a s vědomím, že dřevěné obložení neponese žádnou váhu, byla zvolena tloušťka 1 mm. Tato tloušťka zajistila nízkou hmotnost desek, tudíž mohly být přenášeny jedním člověkem.

Po průzkumu trhu byly nakoupeny desky u dodavatele za nejvýhodnější nalezenou cenu. Tyto desky bylo nutné nařezat na požadované rozměry.

Nařezané desky byly narovnané na celou plochu pece kromě strany spodní a přední. Spodní strana přímo sousedí se zemí a přední strana je odnímatelná.

Jedná se tak o konstrukci zcela tepelně oddělenou od kovu uvnitř, což zajišťuje tepelnou izolaci a minimalizaci tepelných mostů, které by odváděly teplo z pece.

Spojení jednotlivých desek zajišťují ocelové vruty.

Takto obloženou pec by bylo možné provozovat. Stále však bylo nutné doladit systém zavírání. Odkrytá izolace byla zakrytována MDF prkny, která byla předtím vystavena zvýšené teplotě pro otestování tepelné odolnosti.

Dveře tvoří MDF deska spojená s izolací a hliníkovým plechem. Tento prvek se zasunuje do přední stěny pece. Zasunutím dojde k izolaci vnitřního objemu pece od okolního vzduchu. Pro maximální izolaci byly dveře doplněny kovovými zámky, které zajistí patřičné zavření dveří.

Právě správné uzavření pece je integrální podmínkou pro snížení ztrátového výkonu.

Tabulka 5.3 představuje konečné rozměry obložené pece připravené na zprovoznění elektrických a elektronických komponent, které byly namontovány do pece v průběhu konstrukce mechanické zástavby.

Tab. 5.3: Konečné rozměry pece

Šířka	Výška	Hloubka
1,22 m	1,36 m	2,72 m

Obrázky 5.7 představují finální vzhled mechanické konstrukce pece. Na levé straně pece jsou vyvedeny kabely k topným spirálám a větrákům.



(a) Obložení pece bez řešeného vstupu



(b) Obložení pece se zakrytým vstupem

Obr. 5.7: Pec s MDF obkladem

Kapitola 6

Regulace teploty

Z kapitoly 2 vyplývá, že výroba kompozitních dílů je proces, který sestává z řady technologických procesů. Jedním z procesů je vypékání, jenž urychluje značně čas výroby. Optimálního výsledku vytvrzení je dosaženo postupným zahříváním dle oteplovací křivky uvedené v manuálu vypékaného materiálu. [11]

6.1 Požadavky

Základním požadavkem je dodržení přesnosti regulace teploty, která je uvedena v manuálu vypékaného materiálu. Vyžadované přesnosti jsou různé. Pryskyřice určené do leteckého a vesmírného průmyslu vyžadují přesnost ± 3 °C. To je pro účely formule předimenzované, tudíž není nutné dodržovat tak striktní pravidla. [11]

Přesnost nastavené teploty v peci je funkcí přesnosti samotných senzorů, přesností převodníku a zvolené regulace. Volba způsobu regulace je tedy zásadní složkou přesnosti skutečné teploty.

Každý typ vypékané pryskyřice má definovanou požadovanou křivku zahřívání. Tato křivka, v čase konstantní nebo dynamická, představuje žádanou teplotu v peci v každém časovém okamžiku. Řídicí systém tedy musí zajistit maximální inklinaci reálné teploty v peci k teplotě požadované.

6.2 Terminologie

Integrálním termínem je řízení, tedy cílené působení na vymezenou část reality tak, aby pochody a děje v ní probíhaly dle daných požadavků. Neméně důležitými termíny jsou ovládání a regulace, které společně pod řízení spadají. [28]

Ovládání je řízení v otevřené struktuře, v níž bezprostředně, technickými prostředky realizovaná zpětná vazba chybí.

Regulace je proces se zavedenou zpětnou vazbou. Její realizace technickými prostředky, které zajišťují v podstatě nezpožděný přenos informací o skutečných hodnotách veličin, na něž jsou kladeny určité požadavky v čase, umožňuje její automatickou funkci.

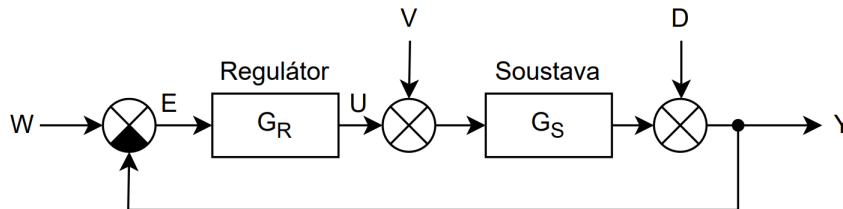
Většina metod zde uvedených reguluje sledovanou veličinu v závislosti na odchylce od požadované hodnoty. Tuto odchylku po zjištění lze různě vyhodnotit a podle výsledku provést adekvátní akční zásah. Akční zásah je limitován a určen použitými silovými komponenty. [28]

6.2.1 Regulační obvod

Soubor technických prostředků, kterými se na daném zařízení zajišťuje automatické udržení vybraných veličin procesu na požadované hodnotě.

Je tvořen syntézou technického zařízení – regulovanou soustavou a vším, co bylo nutné dodat pro automatické udržování – regulátorem. [28]

Pro lepší představu se využívá abstraktního blokového schématu, které představuje relace mezi jednotlivými participanty úlohy regulace, patrné na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Schéma regulační smyčky [28]

Veličiny vystupující ve schématu nesou značení velikými písmeny. To proto, že vyjadřují popis obrazů proměnných. Veličiny samotné se značí písmeny malými a jsou následující:

Regulovaná veličina y , jejíž hodnota by měla být v každém okamžiku shodná s požadovanou veličinou.

Akční veličina u slouží k modifikaci regulované veličiny a je generována regulátorem. Je to taková veličina, jejíž snadná změna ovlivní změnu regulované veličiny.

Poruchové veličiny d, v vstupují do obvodu a jejich přítomnost je nežádoucí. Projevy jsou tak potlačovány úpravou akční veličiny. Označované též jako poruchy, které mohou deformovat jak sledovanou veličinu, tak veličinu akční.

Regulační odchylka e představuje rozdíl žádané veličiny a regulované veličiny. Její výpočet představuje rovnice 6.1.

$$e = w - y \quad (6.1)$$

Požadovaná veličina w je veličina, kterou modifikuje převážně uživatel a je hlavním vstupem do regulované soustavy.

Pro dosažení rovnosti požadované veličiny s regulovanou veličinou existují regulační funkce regulátoru. Kvalita regulace je následně hodnocena typickými ukazateli kvality regulace, kterými jsou:

Překmit, známý jako velikost maximálního přeregulování.

Doba regulace, tedy čas, za který se dostane regulovaná veličina na hodnotu požadované veličiny.

Integrální kritéria hodnocení průběhu regulační odchylky, jež představují kumulativní součet odchylek v čase.

6.2.2 Typy regulace

Vhodná regulační funkce může být složena z konvenčních regulátorů s pevně danou strukturou či odvozením rovnice přenosu obecného regulátoru s optimalizovanou strukturou.

Konvenční regulátory sestávají z kombinace proporcionální, integrační a derivační funkce. V současnosti se užívá PID regulátoru, kde jsou v případě potřeby určité složky potlačeny.

Obecný regulátor s optimalizovanou strukturou zde rozveden nebude, neboť pro řízení teploty v peci je předimenzovaný. Ostatně bude uvedeno, že i konvenční regulátory jsou pro tuto aplikaci nadbytečné. [28]

Proporcionální složka

Analogicky označovaná jako zesilovač, neboť vytváří akční zásahy Δu , úměrné velikosti momentální regulační odchylky e .

Matematický zápis pro spojitý čas:

$$\Delta u(t) = r_0 \Delta e(t). \quad (6.2)$$

Matematický zápis pro diskrétní čas:

$$\Delta u_k = q_0 \Delta e_k \quad (6.3)$$

$$q_0 = r_0,$$

kde r_0 představuje bezrozměrnou hodnotu zesílení.

Integrační složka

Výstup je definován minulostí, neboť vytváří akční zásah Δu úměrný integrálu (či jeho diskrétní náhradě) z regulační odchylky e .

Matematický zápis pro spojitý čas:

$$\Delta u(t) = \frac{r_0}{T_I} \int_0^t \Delta e(\nu) d\nu. \quad (6.4)$$

Matematický zápis pro diskrétní čas:

Ve vzorci jsou uvedeny varianty pro metodu levých a pravých obdélníků.

$$\Delta u_k = \begin{cases} q_1 e_k \\ q_1 e_{k-1} \end{cases} \quad (6.5)$$

$$q_1 = \frac{r_0 T}{T_I}.$$

T_I představuje bezrozměrnou integrační konstantu a T je vztážná hodnota pro bezrozměrný čas využívaný pro další počítání.

Derivační složka

Vytváří akční zásah úměrný hodnotě derivace (nebo její diskrétní aproximaci diferencí) z regulační odchylky e .

Matematický zápis pro spojitý čas:

$$\Delta u_k = r_D \Delta \dot{e}(t) \quad (6.6)$$

$$r_D = \frac{r_0}{T_D}.$$

Matematický zápis pro diskrétní čas:

$$\Delta u_k = q_2(\Delta e_k - \Delta e_{k-1}) = q_2(-e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}) \quad (6.7)$$

$$q_2 = \frac{r_0 k_u T_D}{T}.$$

T_D je derivační časová konstanta, kterou lze zjistit měřením a k_v představuje koeficient statického zesílení. [28]

PID regulátor

Všechny tyto složky lze libovolně kombinovat užitím PID regulátoru, který se správným nastavením koeficientů zajistí optimální dynamiku regulace s minimálním překmitem.

Výsledkem je sloučená matematická funkce pro spojitý čas s touto podobou:

$$\Delta u(t) = r_0 \Delta e(t) + \frac{r_0}{T_I} \int_0^t \Delta e(\nu) d\nu + r_D \Delta \dot{e}(t). \quad (6.8)$$

Příspěvky jednotlivých participantů jsou zřejmé.

Regulátory tohoto typu slouží k regulaci dynamických systémů, které potřebují okamžitou odezvu. Takovými systémy může být řízení pohonů a podobné aplikace, kde by jakékoliv zaváhání mohlo vést k újmě na lidském zdraví.

PID regulaci společně s jejím optimálním nastavením by tedy bylo možné nadále rozebírat, to však není účelem této práce. Dynamika regulace teploty pece je v tomto ohledu pomalá, neboť se odvíjí od dlouhých časových konstant způsobených velkou tepelnou kapacitou materiálů. Může být tedy využito do této chvíle nezmíněného způsobu regulace, kterým je bang-bang regulace.

6.3 Regulace teploty v peci

V subsekcí 6.2.2 byl uveden důvod, který stojí za použitím bang-bang regulace. Je to velká setrvačnost pece umožňující použití tohoto způsobu udržování teploty, aniž by docházelo k riziku výrazné odchylky reálné od požadované teploty.

Princip této regulace je prostý. Je-li sledovaná teplota vyšší, než teplota žádaná, akční zásah regulátoru je nulový. V případě opačném, tedy je-li sledovaná teplota nižší, než žádaná, je akční zásah regulátoru maximální. [29]

Matematicky je popis vyjádřen vzorcem 6.9.

$$y \geq w \begin{cases} \text{true,} & u_k = 0 \\ \text{false,} & u_k = 1 \end{cases} \quad (6.9)$$

Dosud byla regulace diskutována na abstraktních veličinách. Pro případ pece nahradí abstraktní veličiny teplota.

Regulátor v případě pece modifikuje teplotu zdroje tepla, čímž dochází k regulaci teploty v celém zahříváném objemu. Realizaci změny teploty zdrojů tepla je věnována kapitola 7.

Integrálním poměrem této regulace je přesnost regulace vůči počtu sepnutí akčního členu. Čím vyšší přesnost je vyžadována, tím více zásahů akční veličiny je zapotřebí. Zásah je v tomto případě realizován sepnutím určité elektrické komponenty s omezenou životností. Každý zásah tak znamená snížení životnosti spínacího prvku.

Pro prodloužení životnosti spínacích prvků za cenu horší regulace přichází na řadu hystereze, kterou lze chápat jako pásmo necitlivosti. Udává rozmezí, ve kterém se může pohybovat regulovaná veličina od veličiny požadované. Teprve odchýlí-li se hodnota regulované veličiny od žádané hodnoty veličiny o určitou hodnotu, vykoná akční člen akci.

Je tedy zřejmé, že se zvyšující se hysterezí, a tudíž zvyšujícím se pásmem necitlivosti, klesá přesnost regulace, ale zvyšuje se životnost spínacích prvků, které nemusí v danou chvíli zasahovat tolikrát.

Vzhledem k povaze kompozitních materiálů diskutované v kapitole 2 bude pec nabízet dva režimy regulace teploty.

6.3.1 Regulace statické hodnoty

Pro vytvrzování aerodynamických prvků za zvýšené teploty, je vyžadováno udržování konstantní teploty do 100 °C. To implikuje nutné zahřátí pece na nastavenou teplotu, která je po dosažení udržována.

Lze předpokládat, že po zapnutí pece dojde k sepnutí akčních členů za účelem dosažení požadované teploty. Počet sepnutí tak bude minimální. Zvyšovat se začne ve chvíli, kdy regulovaná teplota dosáhne žádané. V tu chvíli může dojít k překmitu v závislosti na rozdílu teploty zdrojů tepla a požadované teploty.

Při návrhu algoritmu je tedy nutné uvažovat i tepelnou setrvačnost, která může potenciálně zajistit nesprávné vypečení. Obyčejnou úvahou lze dojít k uvědomění, že topné zdroje s menší plochou budou muset dosáhnout vyšší teploty pro zajištění stejné dynamiky regulace jako tepelné zdroje výkonu vyššího s teplotou nižší.

S přihlédnutím na fakt, že se pec může přehřát, stačí adekvátně udržovat teplotu na žádané hodnotě a dynamiku změny teploty podřídit použitým komponentám, jejichž výkon je limitován cenou.

6.3.2 Regulace dynamické hodnoty

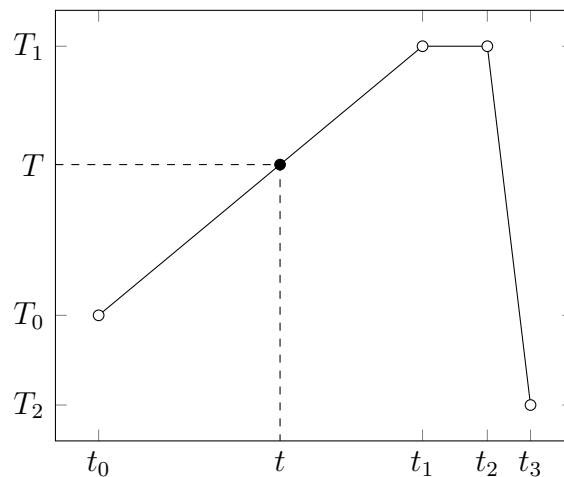
Ačkoliv by se na první pohled mohlo zdát, že zde již bude dynamika žádoucí, není tomu tak. Pro optimální vytvrzení kompozitních materiálů musí docházet k nárůstu teploty velmi pomalu. K tomu tedy pozvolná dynamika tepelných dějů dokonce přispívá. Při rychlých změnách teploty by mohlo dojít k vnitřnímu napětí v kompozitech a tím by degradovala jejich kvalita.

Faktorem, který zjednodušuje regulaci je znalost žádaného procesu předem, neboť každá pryskyřice má pevně daný vytvrzovací cyklus. Nedochází tak k nepředvídatelným vstupům uživatelů, které by vyžadovaly bezprostřední odezvu systému.

V kapitole 2 byly představeny křivky vypékání pryskyřice, které je nutné realizovat v peci. Implementace měření a udržování teploty je popsána v sekci 9.2.2.

Zde bude popsán algoritmus, který z vytvrzovací křivky extrahuje požadovanou teplotu v každý časový okamžik s označením sekvenční lineární interpolace. Úkolem řídicí elektroniky tak bude generování adekvátních akčních zásahů vedoucích k udržování této teploty i v objemu pece.

K vysvětlení principu lineární interpolace pomůže jednoduchý obrázek.



Obr. 6.2: Princip lineární interpolace [30]

Z obrázku 6.2 není těžké odvodit vzorec lineární interpolaci popisující:

$$T = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{t_1 - t_0} \cdot (t - t_0). \quad (6.10)$$

T_0 je počáteční hodnota teploty, zlomek vyjadřuje směrnici vývoje teploty v čase.

Adjektivum sekvenční znamená pouze to, že křivka vytvrzení sestává z více dílčích křivek, které jsou lineárně interpolovány disjunktně. V každém časovém intervalu se tedy změni počáteční hodnota teploty, podobně tak směrnice vývoje teploty vystupující ve vzorci. Časový interval představuje čas mezi dvěma sousedními časovými milníky.

Kapitola 7

Elektrotechnický hardware

Řídicí impulsy generované regulátorem musí být adekvátně upraveny, aby došlo ke znatelné modifikaci regulované veličiny. Právě výkonové zesílení slabých řídicích impulsů představuje hlavní činnost elektrotechnické instalace.

7.1 Požadavky

Společně s transformací řídicího signálu, kterou lze v této práci rozdělit na změnu a udržování homogenního rozložení teploty, elektrotechnická instalace musí zajišťovat bezpečné napájení veškeré elektroniky a elektrotechniky. Těchto úloh je docíleno použitím specifických komponent umístěných uvnitř pece či uvnitř rozváděče.

Před samotným návrhem elektrotechnické instalace je žádoucí poznat místo instalace, neboť tomu musí být celý návrh podřízen. Prostředí instalace může ovlivňovat nutný stupeň krytí elektrické instalace a může klást zvýšené nároky na odolnost. [31]

Z elektrického hlediska se jedná o nutnost seznámení se s elektrickou sítí, zejména kvůli různým druhům bezpečnostních jistění. Místem instalace pece jsou halové laboratoře Fakulty strojní pod univerzitou ČVUT. Vlastnosti tohoto prostoru mají tedy zásadní dopad na návrh elektrotechnické instalace.

Integrálním požadavkem je dohled nad řídicím systémem. Pokud by došlo k nekontrolovanému růstu teploty, je v systému zavedený termostat, který při překročení 160 °C přeruší napájení systému.

7.2 Napájecí síť

V této práci má smysl uvést dva typy napájecích sítí, kterými jsou síť TN-C a TN-S a to z důvodu jejich instalace v halových laboratořích Fakulty elektrotechnické a Fakulty strojní ČVUT.

Halové laboratoře fakulty strojní ČVUT disponují dnes již méně využívaným rozvodem TN-C, tedy rozvodem se čtyřmi vodiči. Tři vodiče jsou fázové a vodič čtvrtý je vodičem se sloučenou funkcí ochrannou a zemnicí.

Halové laboratoře fakulty elektrotechnické poskytují soustavu s pěti vodiči. Třemi fázovými, jedním nulovým a jedním ochranným. [32]

V sekci 7.3.2 bude vysvětlena aplikace rozváděče navrženého pro síť TN-S v síti TN-C.

7.3 Komponenty

Pro lepší orientaci v elektrotechnických komponentách jsou součásti popsány v sekcích, které odpovídají jejich lokaci.

7.3.1 Pec

Akční členy mající dopad přímo na velikost a homogenní rozložení teploty jsou umístěné přímo v objemu pece, ve kterém dochází k zahřívání.

Zvýšení teploty lze realizovat přeměnou elektrické energie na teplo různými způsoby. Pro účely pece bylo využito topných spirál z původní pece. Byly tak minimalizovány finanční náklady. Analogicky větráky byly recyklovány. Nedílnou součástí kompozice je kabeláž, která zajišťuje propojení všech komponent.

Realizace je k vidění na obrázku 5.3.

Topné spirály

Odporové vodiče, které vlivem protékajícího proudu zvyšují svoji teplotu a jejichž výkon lze určit jako:

$$P = U \cdot I. \quad (7.1)$$

Z důvodu recyklace spirál, nebylo možné odečíst z nedochovaného technického listu parametry. Měřením byl zjištěn výkon spirály $P_s = 1,150$ kW, neboť při napájení 230 V byla protékána proudem 5 A.

Tyto spirály jsou v peci tři s celkovým výkonem $P_{celk} = 3,450$ kW. To není mnoho, neboť i prostá rychlovarná konvice může mít výkon okolo 2 kW. Co činí tento výkon dostačujícím je nízký nárok na dynamiku systému. Nárůst teploty tak bude pomalejší, žádané teploty v povoleném intervalu se dosáhne vždy.

Při testech topných spirál bylo objeveno jejich nehomogenní prohřátí. To bylo nutné brát v potaz při volbě umístění senzoru teploty.

Větráky

Tři motory s plechovými vrtulemi schopné odolat zvýšené teplotě uložené ve stěně pece mírně pod roštem pro rozhánění vzduchu v peci. Tím se přispívá k rovnoměrnějšímu rozložení teploty. Nachází se na chladnější straně hliníkového plechu a nejsou zezadu obklopeny izolací, aby nedošlo k jejich přehřátí.

Kabeláž

Propojení výše uvedených zařízení bylo realizováno kabelem ÖLFLEX HEAT 180 SiHF. Jedná se o silikonový kabel s teplotní odolností do 180 °C určený pro použití v pecích a jiných oblastech průmyslu, kde vystupuje zvýšená teplota.

7.3.2 Rozváděč

Rozváděč je integrální součást elektrické instalace, která zajišťuje bezpečné uložení elektrických komponent, jenž se podílí na napájení řídicího systému a ochraně před úrazem elektrickým proudem. Podobně, jako tomu bylo u tepelných spirál a větráků, i rozváděč byl do jisté míry modifikován a recyklován.

Odstraněna byla původní řídicí jednotka a tlačítka, která umožňovala manuální ovládání spirál. Další změnou bylo přizpůsobení rozváděče z původní TN-S sítě na TN-C síť. To bylo provedeno rozvětvením vodiče PEN na vodiče N a PE v rozváděči.

Zdroje a transformátory

Rozváděč obsahuje jeden napěťový zdroj, který transformuje napětí o velikosti 230 Vac na 5 Vdc potřebných k napájení řídicí elektroniky. Výkon tohoto zdroje je 10 W, což je s rezervou dostačující.

Transformátor slouží k tvorbě napětí 24 Vac z 230 Vac, kterým jsou řízeny stykače modifikující elektrický proud topnými spirálami.

Proudový chránič

Nutný prvek kompozice tvořený rozdílovým transformátorem je proudový chránič. Dojde-li k propojení obvodu pod napětím se zemnicím vodičem, dojde k vybavení obvodu a předejde se tak riziku doteku živé části. Živou částí se rozumí vodivá část pod napětím. V rozváděči je použitý typ proudového chrániče PF6 40/4/003.

Proudový jistič

Zařízení sledující velikost proudu v obvodě je proudový jistič. V závislosti na charakteristice jističe vybavuje s určitou časovou odezvou při zaznamenání proudu vyššího, než maximálního dovoleného.

Pro účely pece jsou použity dva proudové jističe. Jeden třífázový B16/3 pro jištění topných spirál, větráků a zásuvek a jeden jednofázový C6/1 pro jištění transformátoru a zdroje pro řídicí elektroniku.

Stykač

Elektromechanický spínací prvek, ve kterém dochází k fyzickému spojení kontaktů přitažením cívky elektromagnetu, která je ovládána střídavým napětím o velikosti 24 V. V rozváděči se nachází čtyři stykače typu CA4-9-10-24. Tři jsou určeny k regulaci proudu topnými spirálami, jeden k ovládání větráků. Důvod užití těchto aktuátorů spočíval v jejich přítomnosti v rozváděči, a tudíž nulové investici při jejich zachování.

Z pohledu regulace se jedná o suboptimální řešení, neboť není uzpůsobeno k periodickému spínání, nýbrž ke spínání sporadickému. Konkrétně je určeno ke spínání třífázových motorů. Je tedy patrné, že již původní pec nebyla navržena optimálně.

Za uvedení stojí dva parametry, které ovlivní způsob ovládání stykačů.

Životnost kontaktů je zásadním hlediskem z pohledu životnosti. Udává, kolikrát je možné sepnout zatížený kontakt. Pro zdejší stykač se jedná o 700 000 sepnutí. Životnost elektromagnetu je potom výrobcem uvedena na deset milionů.

Proudový náraz (Inrush current) udává hodnotu elektrického proudu, který je spotřebován elektromagnetem při zapnutí stykače. Pro zde využitý prvek se jedná o 5,4 A. [33]

Právě stykače stojí za zvolením bang-bang regulace. Pokročilejší formy regulace byly diskutovány z důvodu plánovaného nahrazení mechanických spínačů spínači elektronickými, jež disponují nesrovnatelně vyšší životností a mnohonásobně rychlejší odezvou. [34]

7.4 Dokumentace

Dokument obsahující stručnou grafiku zařízení společně se schématem zapojení, které může být doplněno o seznam použitých artiklů.

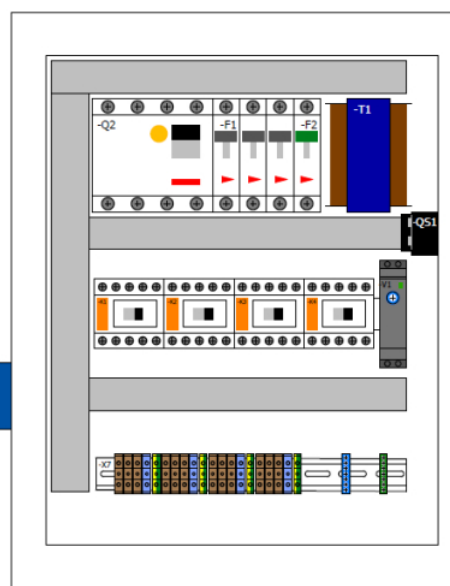
Důležitost tohoto spisu vyvstala ve chvíli analýzy původního rozváděče. Dobrou praxí je uchovávat dokumentaci, tedy popis rozváděče, poblíž tohoto zařízení, ideálně ve dvířkách.

Při otevření původního rozváděče dokumentace nalezena uvnitř nebyla. Nebyla nalezena ani v okolí pece, natož v digitální podobě. Analýza rozváděče pro budoucí užití tak trvala nesrovnatelně delší dobu, neboť vyžadovala proměření téměř každé vodivé cesty a zpětné sestavení topologie zapojení již zhotoveného produktu.

To je jeden z úkolů dokumentace – názorně představit zapojení rozváděče. Druhým, neméně důležitým úkolem, je opora při řešení poruchy, která může na elektrickém zařízení nastat. Přejde-li tedy k zařízení člověk znalý elektrické způsobilosti, ale neznalý daného rozváděče, netrvá dlouho a začne se v zařízení orientovat. Pokud dokumentace chybí, je doba průzkumu i riziko zdravotní újmy vyšší.

Aby nedošlo k analogickému zklamání budoucích členů týmu eForce, byla zhotovena řádná dokumentace popisující současný stav zapojení rozváděče. Tato dokumentace byla uložena vedle rozváděče a předpokládá se, že tam i zůstane. V případě potřeby bude tedy hned k dispozici. Případně je k nalezení v příloze této práce.

Dokumentace je k vidění v příloze B, přičemž grafické znázornění rozváděče zobrazuje obrázek 7.1.



Obr. 7.1: Grafické znázornění rozváděče

Kapitola 8

Elektronický hardware

Integrální prvek pece spravující výkonové komponenty pece za účelem splnění požadavků uživatele. Dosud popsané části pece by již byly schopny zvýšit v určitém prostoru teplotu, tedy střední hodnotu kinetické energie částic, nikoliv však řízeně a kontrolovaně. Přichází tak zařízení, které do regulovaného obvodu popsaného v subsekcí 6.2.1 zanesou onu žádoucí zpětnou vazbu.

8.1 Požadavky

Zpětná vazba umožňující kontrolu aktuálního stavu teploty v peci spočívá v měření teploty v peci. Jakkoliv triviálně tato úloha zní, žádá si adekvátní pozornost, neboť právě měření teploty výrazně ovlivňuje výslednou schopnost pece udržovat teplotu.

Při schopnosti určit teplotu je nutné provést patřičný zákrok. Zákrokem se rozumí změna teploty v peci realizovaná sepnutím proudu topnými spirálami stykači. V kapitole 7 bylo přiblíženo řízení akčních členů, které mají na starosti dodávání energie ve formě tepla do ohřívání prostoru. Kontrolní systém musí tedy generovat adekvátní ovládací signály pro spínání těchto komponent.

Regulovat na požadovanou teplotu lze ve chvíli znalosti požadované teploty. Ta musí být zadána uživatelem, což implikuje funkční požadavek na vlastnost systému umožňující takovou interakci.

Požadavek, který omezuje výběr řídicího systému na elektronické digitální provedení vyplývá z kapitoly 2. Jsou to různé druhy pryskyřic, které si žádají unikátní průběhy změny teploty v peci. Mechanický systém by realizoval takovou úlohu stěží, neboť se jeho funkce nedá jednoduše modifikovat. Digitální systém je k přijímání různorodých podmětů určen, případně je snadno přeprogramován.

8.2 Snímání teploty

Zpětná vazba vstupující do regulátoru a poskytující důvěryhodnou informaci o aktuálním stavu měřené veličiny – teploty. Měření je realizováno nepřímou, tedy přes měření odlišných fyzikálních veličin. Tomu odpovídá i fyzická realizace senzorů teploty, které mohou měřit teplotu v závislosti na změně určité elektrické veličiny.

8.2.1 Senzor teploty

Nízká teplota v peci umožňuje aplikaci kontaktních senzorů teploty, u kterých změna teploty způsobí změnu určité elektrické veličiny. [35] Touto veličinou může být elektrický odpor, elektrický proud, či generované elektrické napětí.

Odporový senzor V průmyslu rozšířený platinový senzor PT100, který mění v závislosti na teplotě, které je vystaven, velikost svého elektrického odporu. Název plyne z velikosti elektrického odporu $R = 100 \Omega$ při teplotě $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

Platiny je využito pro její téměř lineární nárůst elektrického odporu při rostoucí teplotě. Je-li senzor napájen zdrojem konstantního proudu, lze odečítat napětí a následně jej adekvátním výpočtem převést na teplotu. Elektrický proud tekoucí senzorem je záměrně co nejnižší pro minimální ohřev senzoru vlastním měřením.

Rozlišovány dle normy ČSN EN 60751, která dělí senzory dle rozsahu měření a maximální přípustné odchylce vztahované k teplotě do čtyř hlavních kategorií.

Pro dosažení minimálního zkreslení měření je využíváno různých způsobů zapojení. Ty vedou k potlačení parazitních rezistancí přívodních vodičů a jiných nežádoucích vlivů. [36]

Termistor Polovodičový druh rezistoru z oxidu kovu, který vykazuje výraznou změnu elektrického odporu při změně teploty v porovnání s kovy. V závislosti na polaritě změny rezistance jsou rozlišovány typy NTC a PTC.

Ani v jednom z uvedených případů nedochází k lineárnímu vývoji rezistance při změně teploty.

NTC z anglického *Negative temperature coefficient* mění velikost rezistance nepřímo úměrně změny teploty. Nárůst teploty tedy znamená pokles rezistance.

PTC *Positive temperature coefficient* zvyšují velikost rezistance se zvyšující se teplotou. Nárůst teploty vede na zvýšení elektrického odporu.

Termočlánek Podobně jako odporový senzor i termočlánek je v průmyslu hojně využívaný a to pro své jednoduché použití a princip. Sestává ze dvou vodičů z různých materiálů, které jsou na jednom konci spojeny bodovým svarem.

Je založen na Seebeckově jevu, který popisuje proces vzniku termoelektrického napětí při spojení dvou vodičů z rozdílných materiálů na dvou koncích, kdy jeden konec je zahříván. Velikost tohoto napětí, v řádu milivoltů, odráží míru zahřátí jednoho konce v porovnání s druhým. [37]

Z toho plyne nutnost měření teploty chladného konce. To může být realizováno interně ve vyhodnocovacím zařízení či externím odporovým teploměrem. [37]

Kovy použité na výrobu termočláneku definují vlastnosti senzoru společně s jeho názvem. Pro účely pece vychází optimálně rozšířený senzor typu K, který je tvořen syntézou kovů Alumel (nikl a hliník) a Chromel (nikl a chrom).

Dle použité normy mají vodiče a svorky různé barevné značení. Rozměry konektorů zůstávají identické jak pro normu ANSI/ASTM E230, tak pro normu IEC 60584.

Kritérium, které pomůže při volbě vhodného typu senzoru je teplotní rozsah. Typické rozsahy jednotlivých typů senzorů jsou uvedeny v tabulce 8.1.

Tab. 8.1: Srovnání teplotních rozsahů senzorů teploty [36] [37] [38]

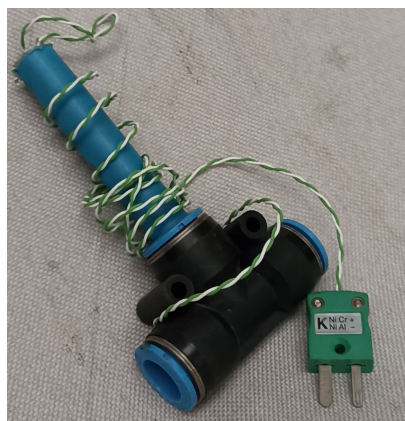
Odporový senzor	Termistor	Termočlánek typu K
-200 °C – +850 °C	-40 °C – +120 °C	0 °C – +1300 °C

Pro účely pece byly původně zvoleny odporové senzory pro své hojné využití v praxi. Tyto senzory musely být připojeny k řídicí desce přes převodníky, které byly zároveň konstantními zdroji nízkých elektrických proudů. Otestování neproběhlo úspěchem, neboť nebylo možné odečíst požadované teploty. Při snaze opravit zapojení byla nalezena dokumentace tak nedostatečná, že se dané senzory nepodařilo zprovoznit.

Vybrána byla alternativa v podobě termočlánku typu K a to hned z několika důvodů.

- Teplotní rozsah je adekvátní s přehledem.
- Přesnost je na účely pece dostačující (± 2 °C).
- Představovaly nulovou investici, neboť se nacházely nevyužité na dílně.

Typy termočlánků jsou k vidění na obrázcích 8.1 a 8.2.



Obr. 8.1: Původní využití termočlánků v chladicím okruhu



Obr. 8.2: Termočlánek spirály v kovovém obalu [39]

8.2.2 Rozmístění senzorů

Zásadním parametrem kvality regulace teploty pece je homogenní teplota uvnitř celého objemu. Rozmístění senzorů by tak mělo zajistit sběr dat z většiny prostoru.

Původní pec disponovala měřením teploty jedním termočlánkem typu K, který mnohdy přestával fungovat. Docházelo tak k nekontrolovanému vývoji teploty pece.

Pec nová je vybavena třemi senzory, jejichž počet je limitován SPI sběrníci, jak bude uvedeno v kapitole 9. Dva senzory poskytují informaci o teplotě vzduchu, která sestává z přenosu tepla konvekcí a radiací. S těmito senzory lze pohybovat v přední a zadní části pece, tudíž mohou být vždy umístěny dle požadavků měření. Třetí senzor je mechanicky přichycen ke spirále, čímž poskytuje informaci o její aktuální teplotě.

Původně bylo mechanické uchycení řešeno úchytem vlastní výroby z hliníku. Hmotnost úchytu a jeho tepelná kapacita však způsobovaly prodlevu ohřátí senzoru, čímž došlo k rozdílu teploty měřené a skutečné až 100 °C. Byla tedy zvolena varianta přichycení senzoru ke spirále vázacím drátem, která minimalizovala časovou prodlevu.

Jedná se o velký krok z pohledu realizace původní a v tuto chvíli je řešení dostačující. Stále je nicméně zřejmé, že pro posouzení kvality homogenního rozložení teploty bude žádoucí vyšší počet senzorů. Umístění senzorů v peci je k vidění na obrázku 8.3.



Obr. 8.3: Senzory v prostoru pece

8.3 Řídicí systém

Nepostradatelnou součástí každého systému je jeho správce vyhodnocující veškeré procesy v systému se odehrávající. V případě této práce se jedná o digitální elektronický systém, který musí sbírat data z připojených senzorů, vyhodnocovat je a generovat patřičné řídicí zásahy.

8.3.1 Výběr řídicího systému

Vzhledem k rozšíření automatizace v průmyslu existuje na trhu mnoho dostupných řešení řídicích systémů. Zde budou přiblíženy ty, které by se pro své vlastnosti mohly stát řídicím systémem pece a které byly uvažovány od samého začátku tvorby.

PLC

Programovatelný logický kontrolér pro průmyslové využití. Program napsaný v jazyce pro PLC zajišťuje cyklické vykonávání kódu. Cyklus sestává z fází, v rámci kterých dojde ke čtení dat ze vstupních periférií, evaluaci těchto dat a provedení žádoucích operací a modifikaci výstupních periférií.

Stran pece má toto řešení výhodu v jednoduchém připojení a vyhodnocení senzoru teploty, neboť jsou dostupné modely s vnitřními převodníky elektrických veličin na teplotu.

Analogicky ovládání výstupních periférií je usnadněno optočleny a spínacími prvky. Tyto součástky zajišťují galvanické oddělení řídicího systému od ovládaných zařízení, tudíž je možné spínat v širším rozsahu napětí.

Robustní provedení je zárukou spolehlivosti, která musí být značná vzhledem k aplikacím, u nichž je doba trvání desítky let.

Záporem je cena, která právě kvůli výše uvedeným důvodům dosahuje řádů tisíců.

Dalším faktorem je grafické rozhraní, které v určité formě může poskytovat přímo PLC samotné či lze dokoupit externí displej, který s sebou nese další investice.

Původní snahou bylo získat PLC partnersky s minimálními náklady. Toho dosaženo nebylo. Pro účely pece se tak jedná o nadbytečně výkonné a finančně nákladné řešení.

MCU

Elektronický prvek, který se dnes nachází téměř ve všech elektronických zařízeních. Sestává ze tří hlavních komponent, kterými jsou CPU, paměť a přidružené periférie. Rozšířenost implikuje rozsáhlou řadu možných aplikací.

Programování takového mikrokontroléru vyžaduje užití nízkourovňových jazyků, kterými mohou být C či C++. Tyto jazyky jsou běžně vyučovány ve všech studijních programech Fakulty elektrotechnické, tudíž by mohla být zjednodušena servisovatelnost pro budoucí členy v případě potřeby.

Princip algoritmu MCU se pro koncového uživatele v porovnání s PLC téměř nemění. CPU spravuje běh programu. Program je tvořen instrukcemi, které jsou sekvenčně čteny z datové paměti a následně vykonávány. Proces opět sestává ze sběru dat ze vstupních periférií. Ta jsou vyhodnocena a na základě stanovených požadavků dochází k patřičné reakci výstupních periférií. [40]

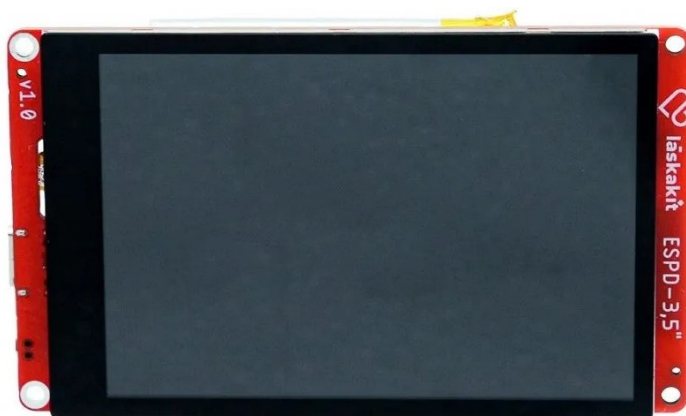
Typicky napájeny stejnosměrným napětím o velikosti 3,3 V či 5 V. Je tedy zřejmé, že aplikace takového systému přinese nutnost vyřešit adekvátní spínání stykačů popsaných v kapitole 7.

Užitím čipu ESP32 byla značně redukována cena, což je další výhoda tohoto řešení.

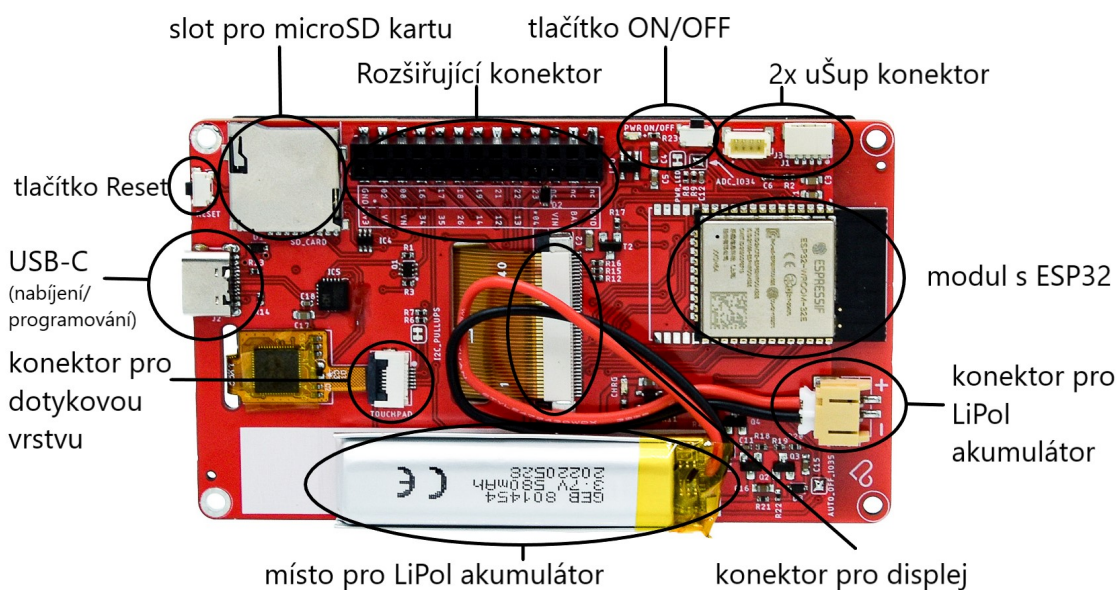
8.3.2 Signálová deska

Z předchozích úvah vzešlo MCU jako hlavní řídicí prvek pece. Bylo tedy zapotřebí zvolit vhodný typ mikrokontroléru, který by zajistil pokrytí maxima žádaných vlastností.

Po průzkumu trhu byl vybrán přípravek LaskaKit ESPD-35 ESP32 3.5 TFT ILI9488 Touch s napájecím napětím v intervalu 3,7 – 8 V. [41] Obě strany modulu jsou viditelné na obrázcích 8.4 a 8.5.



Obr. 8.4: Přední strana modulu s displejem [41]



Obr. 8.5: Zadní strana modulu s čipem a perifériemi [41]

Vybrané řešení přináší hned několik výhod integrovaných v jednom celku.

Displej s tekutými krystaly a rozlišením 320x480 pixelů o rozměru 3,5 palce poskytující možnost snadné komunikace uživatele se systémem. Ke komunikaci mezi řídicím čipem a displejem dochází prostřednictvím převodníku ILI9488, který zajišťuje zobrazení dat a vnímání případných doteků. Tento fakt se promítá do snížení počtu fyzických tlačítek s neznámými funkcionalitami, neboť při správné implementaci kódu lze celou pec ovládat právě pomocí displeje. [42]

ESP32 s konkrétním označením ESP32-WROOM-32 16MB je výkonný mikrokontrolér. Umožňuje připojení externích periférií společně s možností bezdrátového přenosu dat prostřednictvím Wi-Fi či Bluetooth protokolu. Jeho integrace v modulu spočívající v propojení s displejem a slotem na SD kartu zabírá část I/O pinů, stále jich však zbývá dostatek pro účely pece. Programování tohoto čipu zajišťuje sestava konektoru typu C s převodníkem CH9102, která je umístěna na modulu.

Zásadním parametrem je přítomnost dvou sběrnic SPI, kde jedna zajišťuje komunikaci s převodníkem displeje a druhá je využívána při sporadické komunikaci s SD kartou a ke čtení teplot termočlánků přes převodníky.

I/O piny slouží k připojení vstupních či výstupních periférií. Právě díky těmto perifériím je možné snímat teplotu pece a následně generovat patřičné řídicí signály, které po vhodné úpravě spínají stykače. Proudová limitace výstupního pinu je 40 mA. [43]

Slot na SD kartu nabízí možnost připojení externí paměťové karty, do které lze zapisovat měřená data. Po procesu lze tato karta vyjmout a sebraná data vyhodnotit.

8.3.3 Výkonová deska a periferie

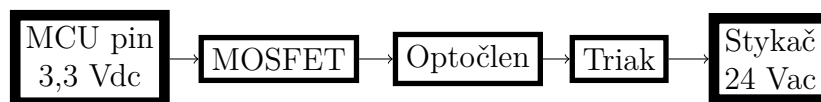
Finanční výhoda spočívající v použití mikrokontroleru kompenzuje nutnost vyřešit spínání stykačů, které ovládají topný výkon spirál. V případě řízení programovatelným logickým kontrolérem by tento úkol byl řešen vnitřními obvody. Zde je nutné vytvořit vlastní.

Elementární topologie je zobrazena na obrázku 8.6.



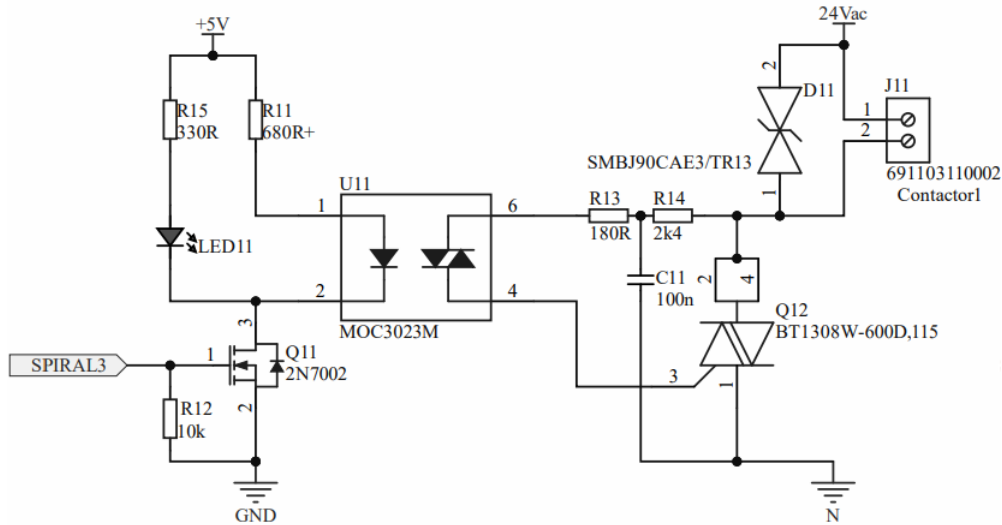
Obr. 8.6: Elementární topologie spínání

Analýzou technických listů dostupných elektronických součástek pro tuto aplikaci bylo využito topologie 8.7. [44]



Obr. 8.7: Detailní topologie spínání

Schéma s fyzickými součástkami je viditelné na obrázku 8.8.



Obr. 8.8: Schéma spínacího obvodu [44]

Výsledné schéma ovlivnilo vlastnosti použitých komponent. Je tedy vhodné vlastnosti si přiblížit.

MOSFET

T2N7002BK je polovodičový unipolární tranzistor typu N s nízkou rezistancí v sepnutém stavu o velikosti 1.15Ω a tudíž nízkém ztrátovém výkonu. Přítomen je z důvodu proudové limitace výstupních pinů mikrokontroléru. Doplněn zemnicím rezistorem eliminujícím plovoucí vstup.

Úkolem je spínání opto-triaku a LED, která poskytuje vizuální zpětnou vazbu o stavu stykače. [45]

Opto-triak

Důležitá komponenta z hlediska ochrany řídicího systému je opto-triak, neboť v něm dochází ke galvanickému oddělení signálů optickou bariérou. Druhým záměrem je ovládání střídavého napětí stejnosměrným. Tomu odpovídá vnitřní uspořádání IR LED a svitem spínaného fotocitlivého triaku. Jedná se o model přímo určený k užití ve spojení s mikrokontrolérem. K sepnutí LED tak stačí nízký proud o velikosti 5 mV. [44]

Triak

Triak je polovodičový prvek navržený za účelem spínání střídavého proudu v obou půlperiodách. Tedy v půlperiodě kladné i záporné. Ve schématu byl využit triak BT1038-600D, který disponuje nízkým nárokem na spínací proud (typicky 1 mA).

Důležitý faktor, který musel být při výběru uvážen, představuje neopakovatelný maximální proud v sepnutém stavu, který je v tomto případě $I_{TSM} = 9 \text{ A}$ při periodě napětí 20 ms. Proudový ráz sepnutí stykače o velikosti 5,4 A tak spadá do pracovního rozsahu. [46]

Ostatní pasivní součástky

Tacitní, přesto důležité pasivní součástky. Hodnoty rezistorů ovlivňují celkové chování obvodu. Zajišťují optimální průtok elektrického proudu diodami a v případě opto-triaku definují, pro jakou aplikaci je obvod určen. Obrázek 8.8 znázorňuje zapojení triaku s citlivou řídicí elektrodou ($I_{GT} \leq 15 \text{ mA}$) pro spínání indukční zátěže, neboť elektromagnet stykače sestává z cívky s nenulovou indukčností.

Dalším prvkem je přepětová ochrana, která zmírňuje případné přepětové rázy přicházející z prostoru pece a zvyšuje ochranu řídicího systému. [47]

Převodník teploty

Snaha nalézt efektivní způsob čtení teploty termočlánků přinesla řešení v podobě převodníku MAX6675 s rozsahem $0 - 1024 \text{ }^\circ\text{C}$. Dvanáctibitový převodník s kompenzací studeného konce s rozlišením $0,25 \text{ }^\circ\text{C}$ disponuje vnitřním zesilovačem vstupního napětí, které převede pomocí ADC na digitální signál. Tento signál je vyslán do mikrokontroléru prostřednictvím vnitřního SPI rozhraní, neboť právě k použití s mikrokontrolérem je převodník určen.

Kompenzace studeného konce je provedena měřením napětí na PN přechodu měřicí diody a následném vyhodnocení v ADC.

Generované napětí termočlánku typu K v závislosti na teplotě lze reprezentovat funkcí:

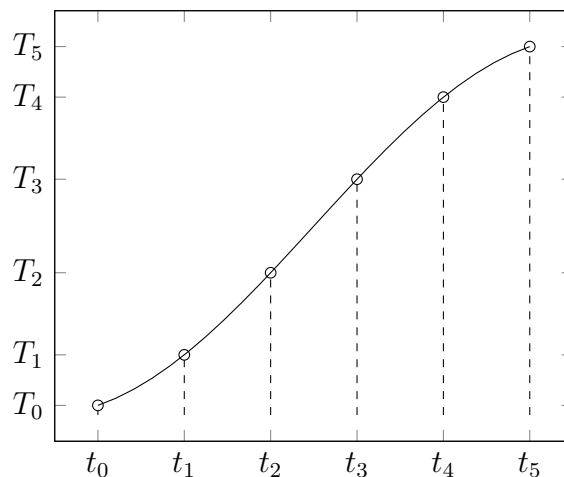
$$V_{OUT} = \frac{41\mu\text{V}}{^\circ\text{C}} \cdot (T_R - T_{AMB}). \quad (8.1)$$

Konstanta udává velikost změny napětí termočlánku při změně teploty o $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Při napájení 5 V je udávaná nejvyšší chyba měření 9 LSB , přičemž je uveden přepočten $10,25 \mu\text{V} / \text{LSB}$. Po evaluaci chyba měření dosahuje maximálně velikosti:

$$T_{err} = \frac{9 \cdot 10,25}{41} = 2,25 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (8.2)$$

Pro dosažení maximální přesnosti a minimální chyby měření je žádoucí zajistit co nejméně rušený přenos napětí z termočlánku do převodníku. Je-li nutné použít prodlužovací vodiče, měly by být kroucené a vést v oblasti s minimálním teplotním gradientem. [48]

Princip diskretizace a kvantizace spojitého signálu zobrazuje obrázek 8.9.



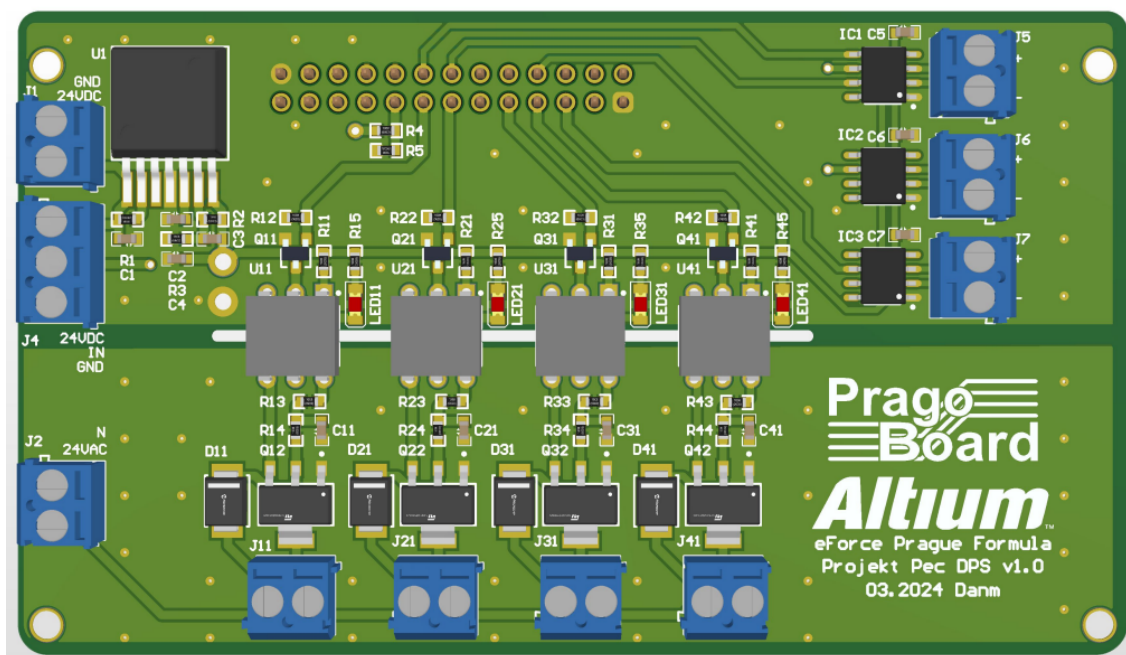
Obr. 8.9: Diskretizace a kvantifikace signálu ADC

8.3.4 DPS

Deska plošných spojů byla navržena dle uvedeného schématu. Žádoucí byla zvýšená pozornost při kreslení cest SPI sběrnice, které by měly být pro všechny signály stejně dlouhé.

Zvýšenou pozornost si vyžádala též tvorba vzduchové mezery pod optočleny, která zajišťuje vyšší ochranu řídicí elektroniky proti vnějším hrozbám.

K návrhu bylo využito programu Altium, jenž dokáže generovat rendery desky před samotnou výrobou. Přední strana desky je k vidění na obrázku 8.10. Druhá část se nachází v příloze A.



Obr. 8.10: Render přední strany DPS

Kapitola 9

Řídicí software

Po fyzickém zhotovení pece s rozváděčem a elektronikou, je žádoucí přiblížit program psaný v jazyce C Wiring, který stojí za správou úkonů pece.

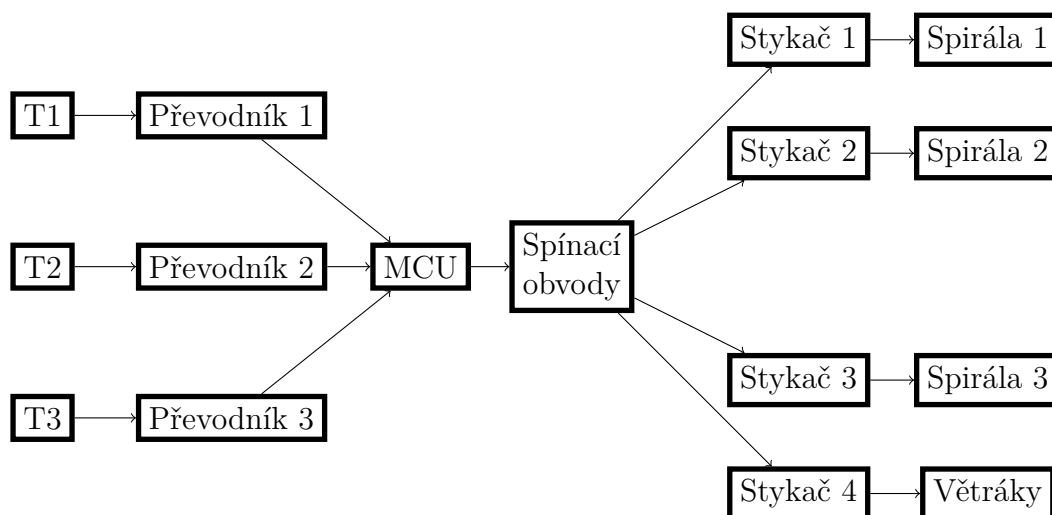
Řídicí software sestává ze dvou hlavních částí.

- Backend
- Frontend

9.1 Požadavky

Požadavky na řídicí software implementovaný v mikrokontroléru značně koreluje s požadavky uvedenými v kapitole 6. Podstatné jsou tedy schopnosti měření teplot termočlánky (T1, T2, T3), vyhodnocování a záznamu sebraných dat, vytvoření adekvátní reakce a zobrazení vybraných informací prostřednictvím displeje.

Topologie celé pece je zobrazena na obrázku 9.1.



Obr. 9.1: Topologie systému

9.2 Backend

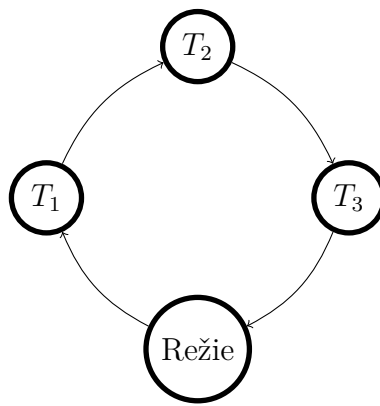
Část kódu, která po vlastním vyhodnocení naměřené teploty generuje akční zásahy. Spravuje veškeré procesy v mikrokontroléru se odehrávající.

9.2.1 Měření teploty

Příchozí data po SPI sběrnici z převodníku jsou vhodně upravena s použitím knihovny MAX6675.h vytvořené společností Adafruit. [49]

Vzhledem k limitaci SPI sběrnice byly využity tři termočlánky. Ty umožňují cyklické měření teplot T_1 (teplota spirály), T_2 (teplota v přední části pece), T_3 (teplota v zadní části pece) s periodou jedné sekundy.

Perioda sestává ze sekvence uvedené na obrázku 9.2.



Obr. 9.2: Sekvence měření teplot v jedné periodě

V prvních třech krocích s celkovou dobou trvání 750 ms dochází ke čtení teplot, které jsou ve čtvrté fázi vyhodnoceny, uloženy a dále zpracovány.

9.2.2 Regulace teploty

Implementace řízení teploty reflektuje bang-bang regulaci uvedenou v kapitole 6 a probíhá vždy ve fázi režie. Aktuální teplota odpovídá aritmetickému průměru teplot v peci.

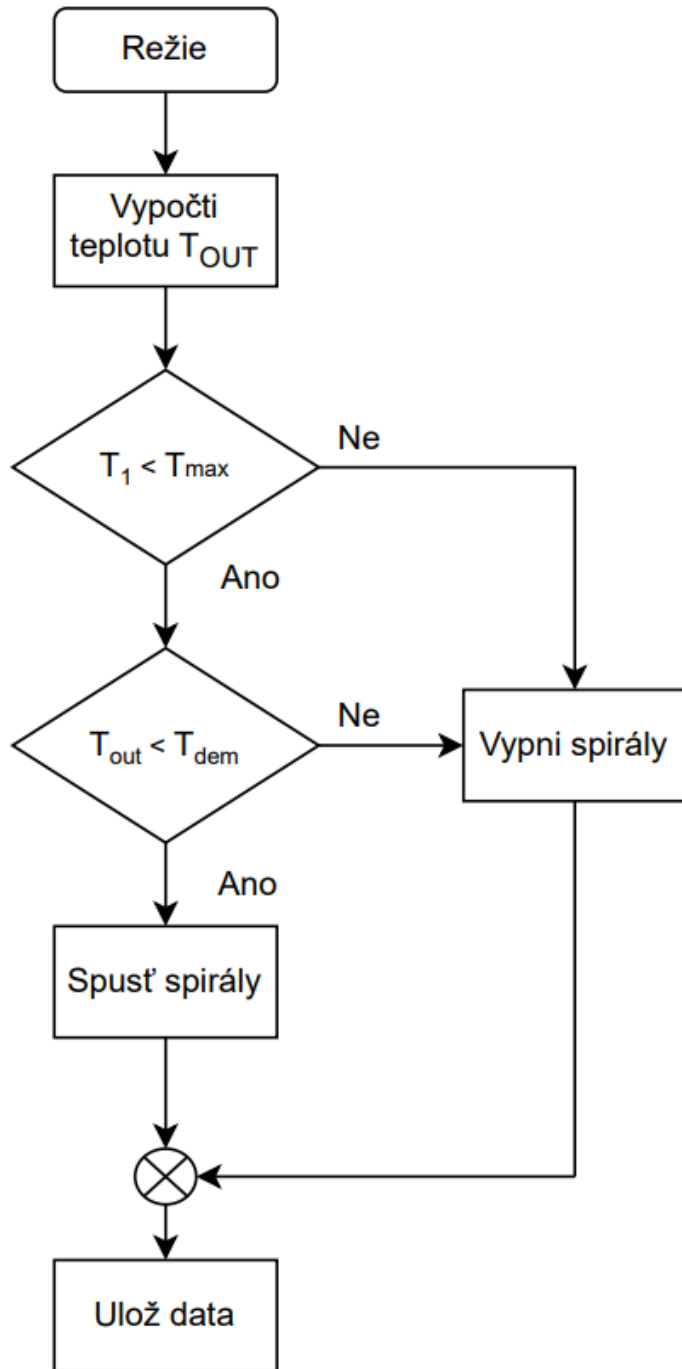
$$T_{out} = \frac{T_2 + T_3}{2} \quad (9.1)$$

Vypočtená teplota T_{out} je srovnávána se žádanou teplotou T_{dem} . Na základě výsledku vzorce 9.1 dochází k vykonání adekvátního akčního zásahu.

Jedná-li se o regulaci na proměnnou teplotu v průběhu času, je fáze režie doplněna sekvenční lineární interpolací, která zajistí výpočet požadované hodnoty v každém časovém okamžiku užitím vzorce 6.2. V případě udržování konstantní teploty tento výpočet odpadá.

Určitá volnost je do regulace vnášena hysterezí. K dispozici jsou hystereze o velikostech 0 °C, 2 °C či 5 °C.

Proces udržování teploty je zobrazen na obrázku 9.3.

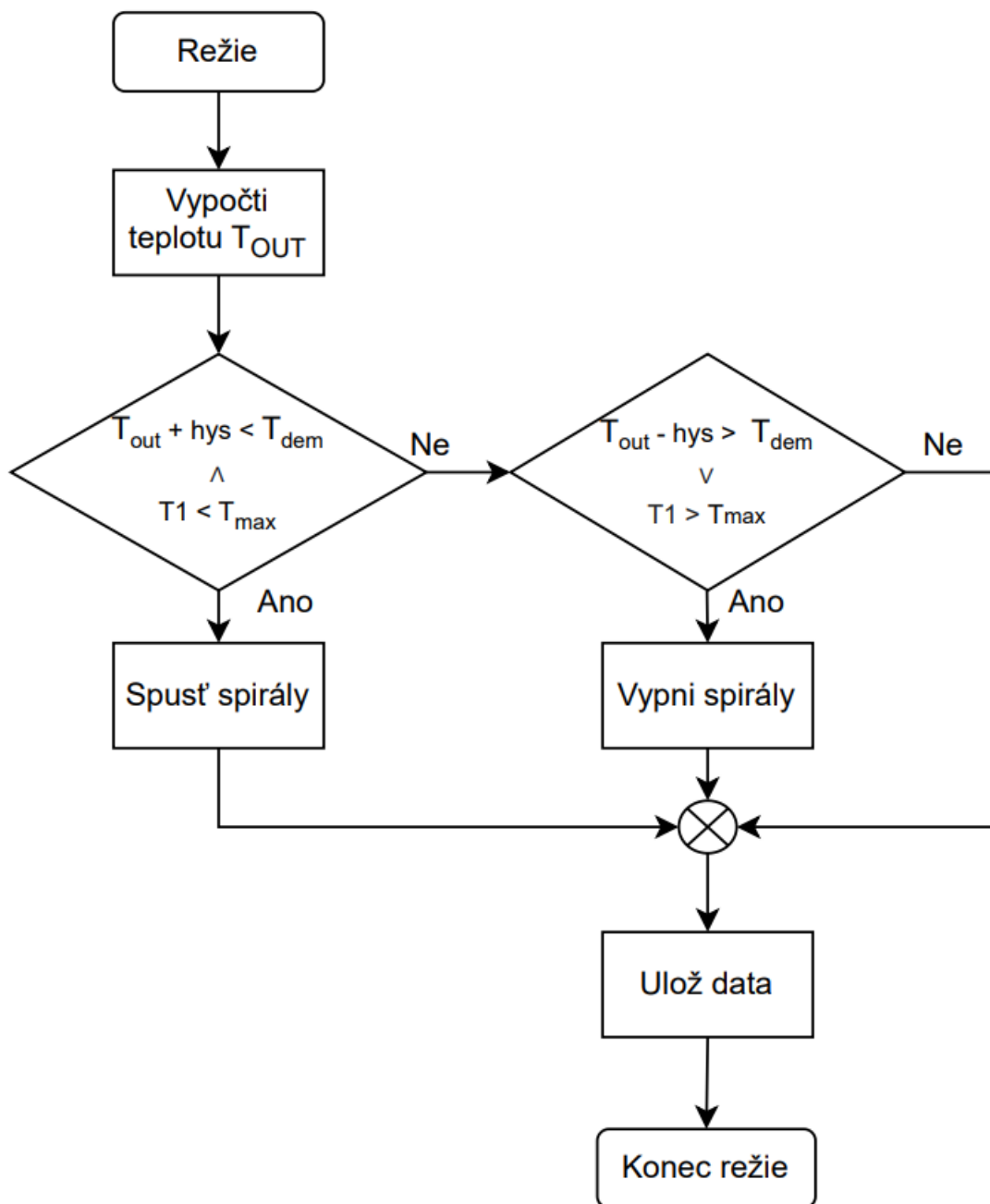


Obr. 9.3: Rozhodovací proces režie

Samotné odezvě na vnitřní teplotu pece předchází kontrola, zda topné spirály nedosahují vyšší teploty než T_{max} . V případě překročení dovolené teploty by hrozilo bezpečnostní riziko.

Důvěryhodnost měřených teplot je spočívá v simultánním sběru dat jak měřidly pece, tak zkalibrovanými teploměry. Případnou odchylku těchto měřidel lze programově potlačit.

Běží-li cyklus s hysterezí, přechází rozhodovací algoritmus do podoby uvedené na obrázku 9.4.



Obr. 9.4: Rozhodovací proces režie s hysterezí

Na obrázku 9.4 je patrný přírůstek hystereze do rozhodovacích podmínek. Teplota tak musí oscilovat s vyšší amplitudou, aby došlo k odezvě výkonových členů. Společně s velikostí teploty v objemu pece se kontrolují teploty spirál. Tento rozhodovací proces je součástí fáze režie zobrazené na obrázku 9.2.

9.2.3 Ukládání dat

Pro vyhodnocení kvality regulace bylo implementováno ukládání měřených hodnot do textového souboru. Možnosti ukládání dat jsou dvě:

SD karta, která poskytuje energeticky nenáročné úložiště dat nacházející se přímo na kontrolní desce. Veškerá zaznamenaná data v průběhu vypékání je tak možné po vypečení získat vložení SD karty do počítače.

Sériová komunikace přenášená UART sběrnici poskytuje analogická data s možností okamžité evaluace. To v praxi umožňuje vynášení dat v reálném čase do grafu a tím vizualizovat proces vypékání.

Pro uložení takto přijímaných dat počítačem bylo využito programu psaného v jazyce Python. [50]

Strukturu ukládaných dat tvoří pět měřených hodnot oddělených čárkou, které jsou viditelné v tabulce 9.1.

Tab. 9.1: Struktura zpráv pece

Hodnota 1	Hodnota 2	Hodnota 3	Hodnota 4	Hodnota 5
Uplynulý čas	T_1	T_2	T_3	Stav stykačů

Obdržená zpráva tak může mít tvar 0, 64.25, 45.50, 46.00, 1.

V každém časovém okamžiku jsou tak známy teploty v peci a stav stykačů. Právě sledování spínání stykačů hraje integrální roli v analýze dopadu regulace teploty na dobu jejich životnosti.

9.3 Uživatelské ovládání

Funkční pec by nebyla využitelná, pokud by nemohla být řízena uživatelem. Bylo proto vytvořeno uživatelské rozhraní, které umožňuje příjemné a intuitivní ovládání.

Původní ovládání pece bylo řešeno řadou tlačítek. Ta však nebyla řádně okomentovaná a tak docházelo ke konfúzi při jejich použití.

Nové řešení spočívající v přesunu veškerého ovládání na displej zajišťuje řádně okomentovaná tlačítka pro každou funkci.

9.3.1 GUI

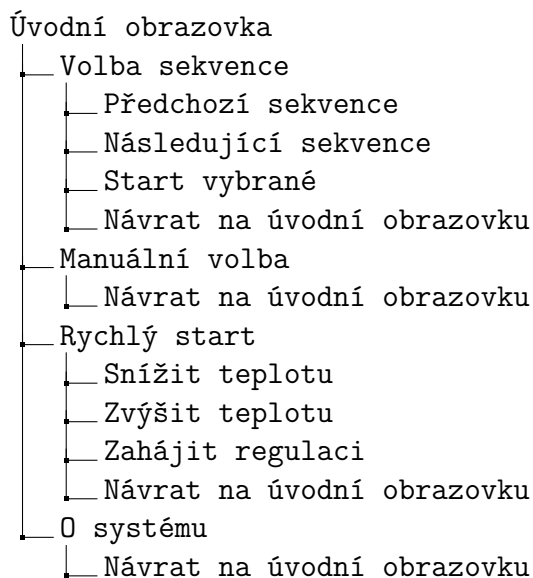
Grafické uživatelské prostředí je postaveno na struktuře vytvořené společností LaskaKit pro modul ESPD-35 uvedený v kapitole 8. [51]

Data jsou zobrazována na displeji prostřednictvím knihovny *TFT_eSPI*. [52] Dotykové ovládání umožňuje knihovna *FT6236*. [53] Knihovny slouží k přímé komunikaci s výstupními periferiemi. Samotné programování tak spočívá v užívání funkcí, které mají vnitřně implementované komunikační protokoly, jež jsou periferiemi vyžadovány.

Nabídka všech možností pece by se stěží zobrazila na jednom snímku displeje. Z tohoto důvodu byla vytvořena struktura nabízející více dostupných obrazovek s více možnostmi.

Struktura uživatelského rozhraní

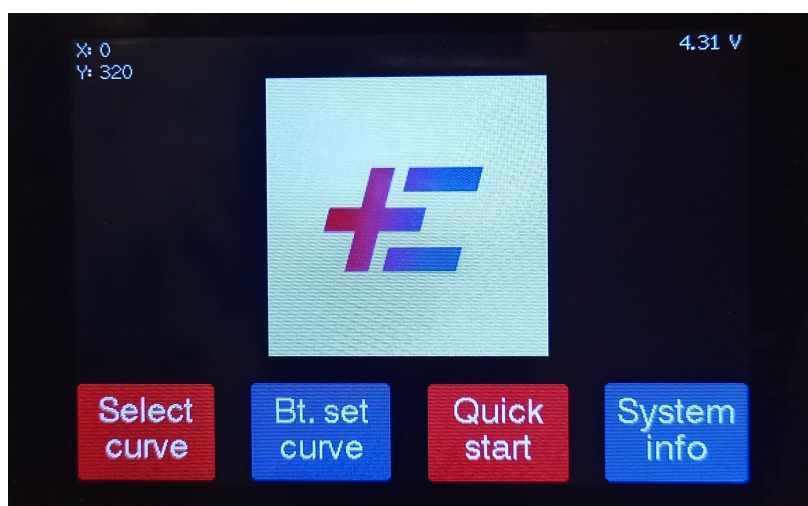
K pochopení možností pece poslouží diagram 9.5, který obsahuje jak dostupné obrazovky (hloubka 1), tak proveditelné úkony (hloubka 2). Uvedeny jsou popisky v českém jazyce. Originál je anglický, neboť odráží oficiální jazyk týmu eForce.



Obr. 9.5: Struktura uživatelského rozhraní

Obrazovky

Ačkoliv je grafická reprezentace v příloze C, za zmínku stojí úvodní obrazovka a obrazovka volby vypékací sekvence.



Obr. 9.6: Úvodní obrazovka

Na úvodní obrazovce se nachází ovládací tlačítka pro volbu režimu. V levém horním rohu se nachází indikátor pozice dotyku (viditelná odezva displeje). V pravém horním rohu je zobrazeno napájecí napětí modulu. [41]

Po stisknutí jednoho z tlačítek dochází ke změně obrazovky. Příkladem může být událost nastávající po dotyku prvního tlačítka zleva. Každému stisku náleží určitá pozice x a y . Tlačítka představují obdélníky o vymezených rozměrech. Dojde-li tedy k dotyku v ploše obdélníku, dochází ke stisknutí příslušného tlačítka. [41]



Obr. 9.7: Volba sekvence

Na obrázku 9.7 je patrná obrazovka vypékání pryskyřice. Horní část displeje zobrazuje název pryskyřice. Vlevo je uveden počet vypékacích kroků společně s charakteristikou daného kroku. Charakteristika sestává z počáteční teploty, koncové teploty a doby trvání.

Graficky je sekvence zobrazena v pravé části obrazovky. Uživatel tak má přehled o plánovaném průběhu vypékání. Součástí grafu je automaticky generovaná mřížka umožňující odečet teploty a času.

Tlačítka reprezentovaná obdélníky slouží k pohybu mezi obrazovkami a k provádění dalších úkonů, jako je výběr žádané pryskyřice. Je-li vybrána požadovaná pryskyřice, regulace je spuštěna stisknutím tlačítka "Start selected".

9.3.2 Manuál

Podstatnou součástí z hlediska bezpečnosti je manuál, který slouží jako zdroj integrálních informací pro provoz pece. Přečtením manuálu bude uživatel seznámen s limitacemi pece (maximální zatížitelnost, maximální teplota) a dozví se princip ovládání. Kopie je uvedena v příloze C. Společně s dokumentací jsou uloženy na sdíleném elektronickém úložišti. Každý člen týmu tak má možnost zjistit si informace o peci i v případě fyzické nepřítomnosti dokumentů.

Kód byl po celou dobu tvorby verzován pomocí programu Gitlab. [54]

Kapitola 10

Ověření kvality regulace

Nedílnou součástí výroby funkční pece, na kterou se lze spolehnout, je vyhodnocení průběhů v peci uskutečněných. Retrospektivní pohled může odkrýt potenciální rizikové průběhy vypékání, proto je žádoucí jej brát v potaz a patřičně vyhodnotit.

Měření byla rozdělena do několika kategorií, přičemž zde jsou uvedeny výsledky, neboť vynášení všech naměřených hodnot by kvůli jejich počtu nebylo možné. Uložený počet dat lze spočítat jednoduchým vzorcem, ve kterém je počet naměřených dat N přímo úměrný uplynulému času t_h v hodinách.

$$N = 5 \cdot 3600 \cdot t_h \quad (10.1)$$

Za dobu nejdelšího cyklu s dobou trvání $t_h = 24$ h se tak získá 432 000 hodnot, které je následně možné vyhodnotit v tabulkovém programu.

10.1 Metodologie měření

Aby mělo testování patřičnou vypovídající hodnotu, bylo nutné zhotovit strukturu měření. Tato struktura sestávala z dílčích měření a testovala tak různé vlastnosti pece.

Je třeba dodat, že se jednalo o analýzu měření teploty transponované na regulaci teploty. Pro zajištění maximální možné věrohodnosti by tak bylo žádoucí zvlášť analyzovat přesnost teploměrů a zvlášť přesnost regulace.

Počáteční měření spočívalo v prostém záznamu teplot běžně umístěných senzorů teploty v průběhu vypékacího procesu. Běžným umístěním je myšleno přirozené zavěšení senzorů v přední a zadní části pece.

Toto měření sloužilo k objevení chyb v kódu, které nekontrolovaně ovlivnily proces vypékání.

Měření s referenčním měřidlem umožnilo zkalibrovat vlastní senzory pece s dostupnými přesnými měřidly.

Měření velikosti překmitu teploty vedlo k uvědomění si důležitosti předeřhnutí pece v případě požadavku pro regulaci teploty s co nejmenším rozkmitem.

Vzhledem k malému topnému výkonu pece musí být teplota topných spirál vyšší, než požadovaná teplota v objemu pece. Pokud je tedy počáteční rozdíl teplot vysoký, může dojít v průběhu ohřívání k rozeřhnutí spirál na vysokou teplotu, což se projeví překmitem žádané teploty. Předeřhe-li se pec předem, překmit by měl být minimalizován.

Měření náročnosti regulace přineslo informaci o počtu sepnutí stykačů v průběhu vypékání. V kapitole 7 byla představena omezená životnost spínacích prvků. Uvážení a promítnutí tohoto hlediska do procesu regulace tak může značně prodloužit spínacím prvkům životnost.

Měření s hysterezí sloužilo k porovnání dvou hledisek regulace. Prvním je kvalita regulace a tedy velikost odchylky. Druhým jsou nároky na spínací prvky.

Měření bylo rozděleno na šest dílčích částí se stejnou dobou trvání a odlišnými vlastnostmi.

Tab. 10.1: Sekvence regulace s hysterezí

Číslo měření	0	1	2	3	4	5
Větráky spuštěny	Ano			Ne		
Požadovaná teplota [°C]	75					
Velikost hystereze [°C]	0	2	5	0	2	5
Čas měření [min]	20					

Měření homogenity teploty v peci pomohlo ověřit smysluplnost instalace větráků. Předpokládalo se, že rozložení teploty při spuštěných větrácích bude rovnoměrnější.

10.2 Matematický aparát

S odhadem kvality regulace pomohou statistické údaje vypočtené z N -krát naměřené teploty T .

Základ analýzy tvoří aritmetický průměr teploty \bar{T} , s pomocí kterého lze určit aditivní údaje.

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (10.2)$$

Aritmetický průměr absolutních odchylek by bylo možné využít, nicméně se ukazuje, že je praktičtější sčítat druhé mocniny těchto odchylek. [55]

Výběrová směrodatná odchylka s popisuje variabilitu naměřených hodnot a je definovaná jako odmocnina součtu druhých mocnin odchylek. [55]

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2} \quad (10.3)$$

Absolutní regulační plocha představuje sumu velikostí odchylek přes dobu měření t . Vyšší plocha regulace implikuje vyšší odchylky v průběhu měření. [56]

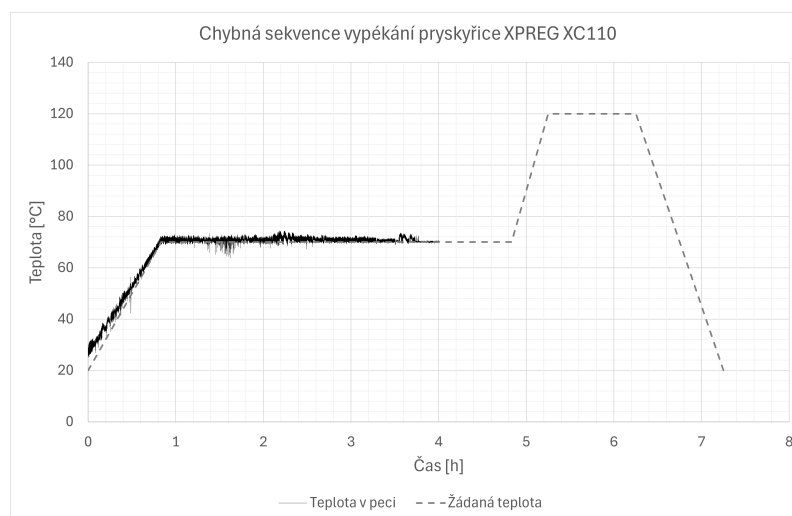
$$S_{reg} = t \cdot \sum_{i=0}^t |T_i - T_{trg}| \quad (10.4)$$

10.3 Naměřená data a zhodnocení

V návaznosti na představenou metodologii byla provedena řada měření, která přiblížila vlastnosti zhotovené pece.

Počáteční měření při udržování konstantní teploty proběhlo dle očekávání, tedy nedošlo k žádnému problému způsobeného kódem.

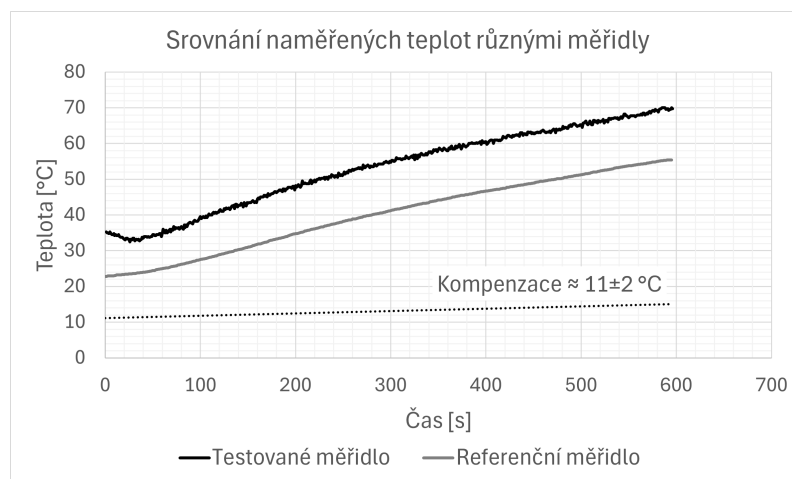
Odlíšná situace nastala při dynamické regulaci teploty, kde proces skončil vždy po vykonání první fáze sekvence. Analýza odkryla problém kódu v podobě porovnávání času v sekundách s časem v minutách. Eliminace této chyby zajistila vykonání všech fází sekvence.



Obr. 10.1: Důsledek chybného algoritmu

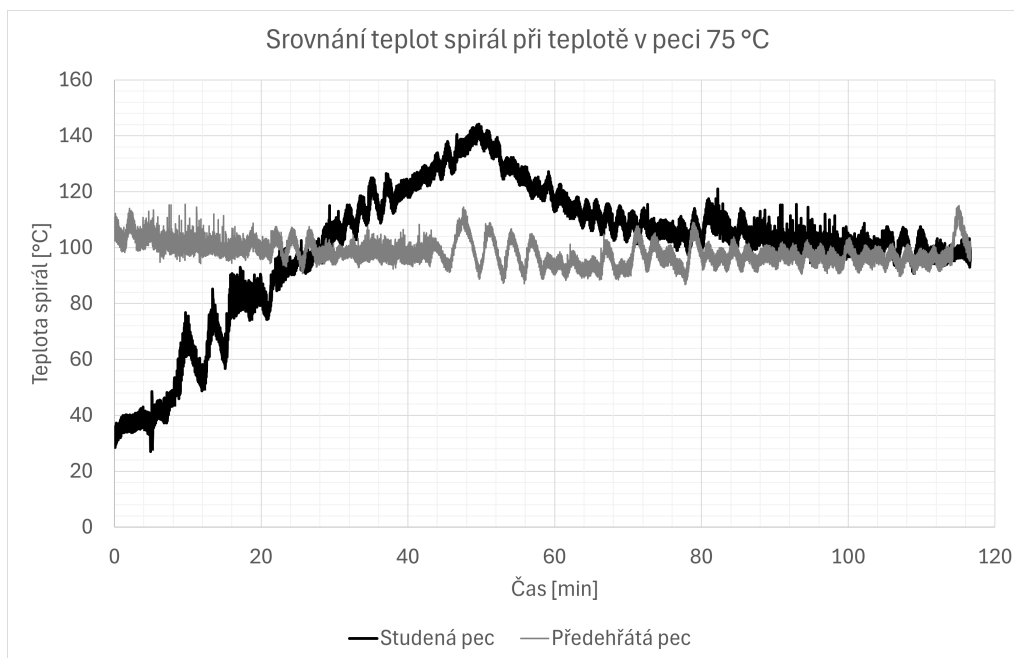
Měření s referenčním měřidlem spočívalo v použití zkalibrovaného teploměru SKF TKTL 20 s garantovanou maximální odchylkou $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ v celém měřicím rozsahu. [57]

Sonda toho měřidla se umístila na stejný bod v peci, jako sonda testovaná, přičemž analýza průběhu měření umožnila kalibraci vlastních senzorů pece.



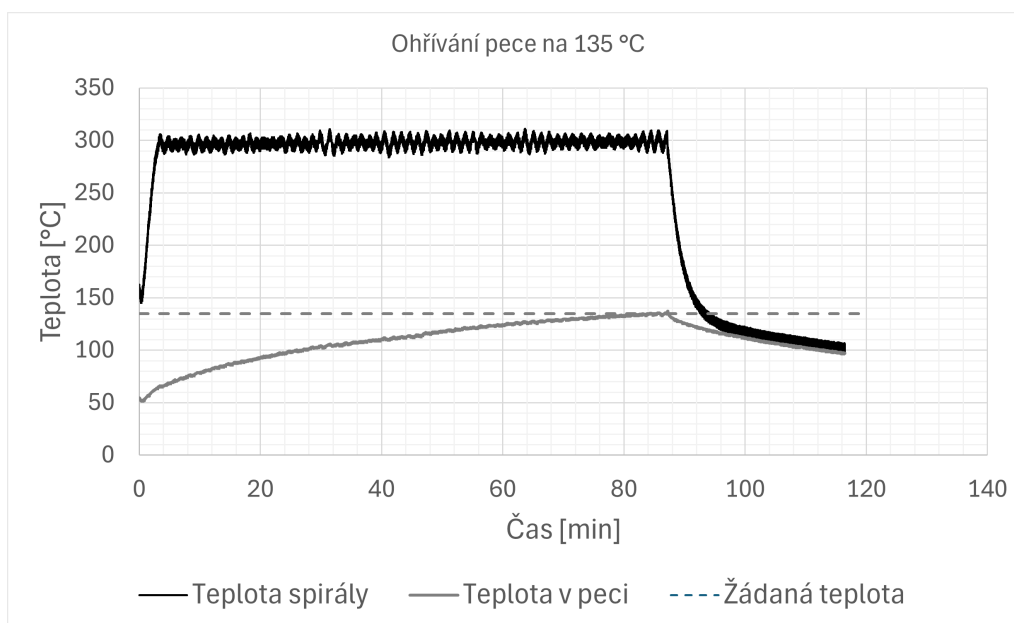
Obr. 10.2: Srovnání měření teplot referenčního měřidla s měřidlem pece

Měření velikosti překmitu teploty potvrdilo předpoklady. U studené pece byly spirály sepnuty po delší dobu a tak došlo k teplotnímu překmitu následovaného poklesem. Při předeřáté peci docházelo k sekvenčnímu spínání spirál, a tak i jejich teplota byla udržena v jistých mezích.



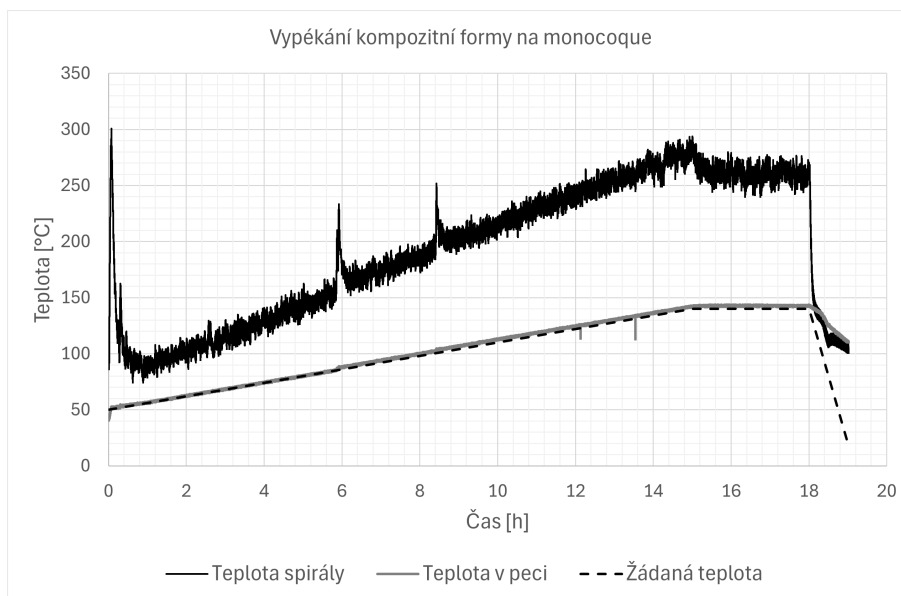
Obr. 10.3: Teploty spirál při ohřevu pece

Na grafu 10.4 je zřetelný vývoj teploty, za kterým stojí syntéza předeřátí a malého topného výkonu. Ačkoliv byl žádaný teplotní nárůst 85 °C a spirály dlouhou dobu dosahovaly maximální dovolené teploty 300 °C, velký objem pece zajistil, že teplota vzduchu přesáhla žádaných 135 °C pouze o 2,5 °C.



Obr. 10.4: Teploty při ohřevu pece

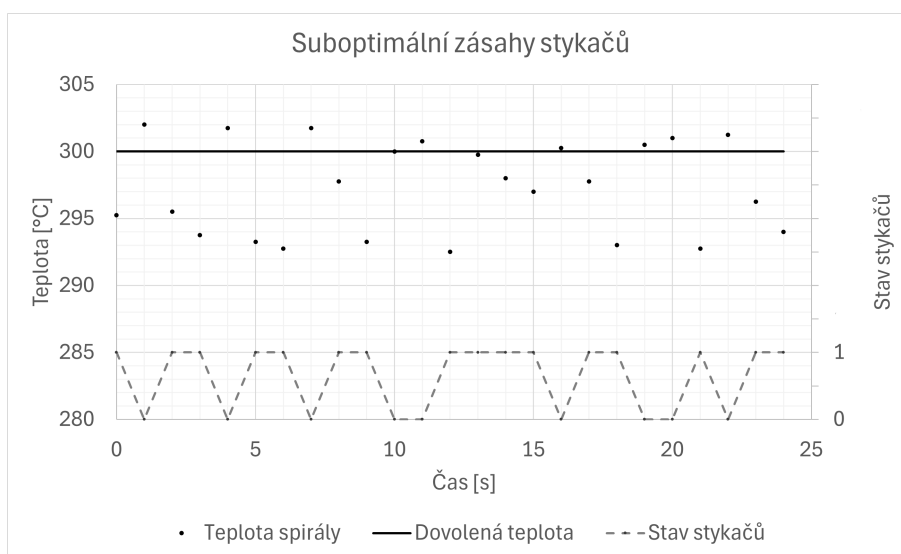
Vývoj nárůstu teploty pro sekvence je odlišný, neboť je žádoucí postupný vzestup teploty s nízkým gradientem. Názorným příkladem je průběh teplot při vypékání formy na monocoque prosycené pryskyřicí EL160. Zde vynesena data byla zaznamenána v průběhu devatenáctihodinové sekvence. Za povšimnutí stojí prudký pokles teploty spirál na začátku průběhu, který indikuje nepřehřátou pec. Další dva vrcholy teploty spirály v intervalu šesté až desáté hodiny jsou způsobeny kalibrací senzorů.



Obr. 10.5: Průběh teploty při sekvenčním cyklu

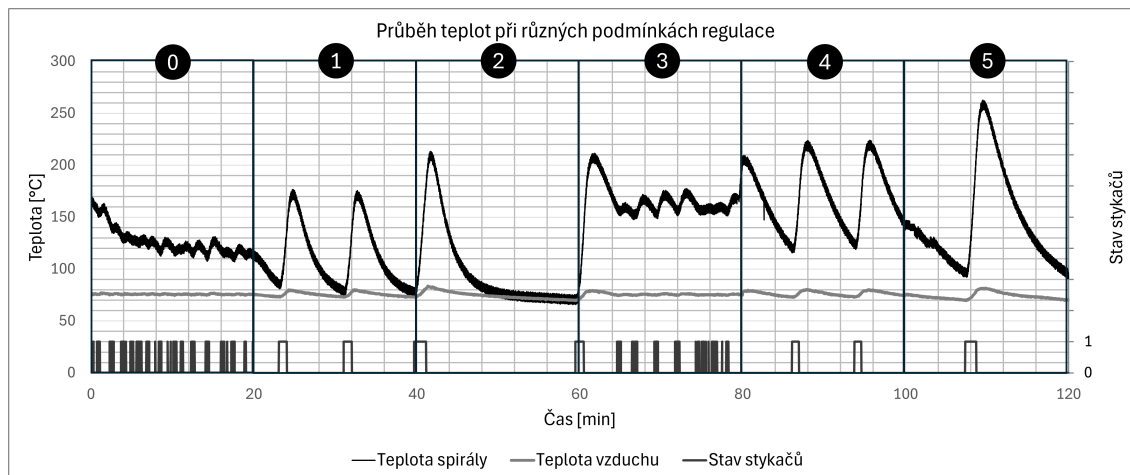
Měření náročnosti regulace odkrylo smutný fakt oscilace měření teploty na spirálách z důvodu dlouhé cesty vodičů termočládku.

Nachází-li se tak měřená teplota na hranici teploty žádané, dochází k suboptimálnímu častému spínání stykačů. Tento jev lze eliminovat zavedením průměrování či zavedením hystereze. Graf 10.6 má potlačenou nulu.



Obr. 10.6: Oscilace teploty spirál

Měření s hysterezí dle dříve uvedené metodologie pomohlo odhadnout kvalitu regulace odvozenou z průběhů teplot a zásahů stykačů.



Obr. 10.7: Rozdílné průběhy teplot při rozdílných regulacích

Původní sekvence byla naměřena najednou, což zapříčinilo ovlivnění každé fáze sekvence fází předchozí. I přesto je z grafu patrné, že při vypnutých větracích dochází k vyššímu ohřevu spirál při dosahování stejných teplot v zahřívaném prostoru.

Každou fázi tak bylo nutné proměřit zvlášť. Na základě relevantních dat byly vypočteny údaje v tabulce 10.2.

Tab. 10.2: Vypočtené statistické údaje pro různé typy regulace

Číslo měření	0	1	2	3	4	5
s teploty vzduchu [°C]	0,7	1,7	3,1	0,5	2,2	3,2
s teploty spirál [°C]	14,2	29,2	36,4	9,6	31,7	50,5
Počet rozepnutí stykačů [-]	84	3	1	100	4	2
Plocha regulace [°C · hod ⁻¹]	284	807	2382	355	1920	2740

Lze tedy vyvodit jisté chování regulace pece, jenž je shrnuto v následujících bodech.

- Zvýšení hystereze sníží počet zásahů stykačů.
- Ačkoliv jsou větráky poddimenzované, jejich funkce se projeví.
- s teploty spirál je pokaždé vyšší, než s vzduchu

Shrnutí tedy poskytuje návod na optimální způsob vypečení.

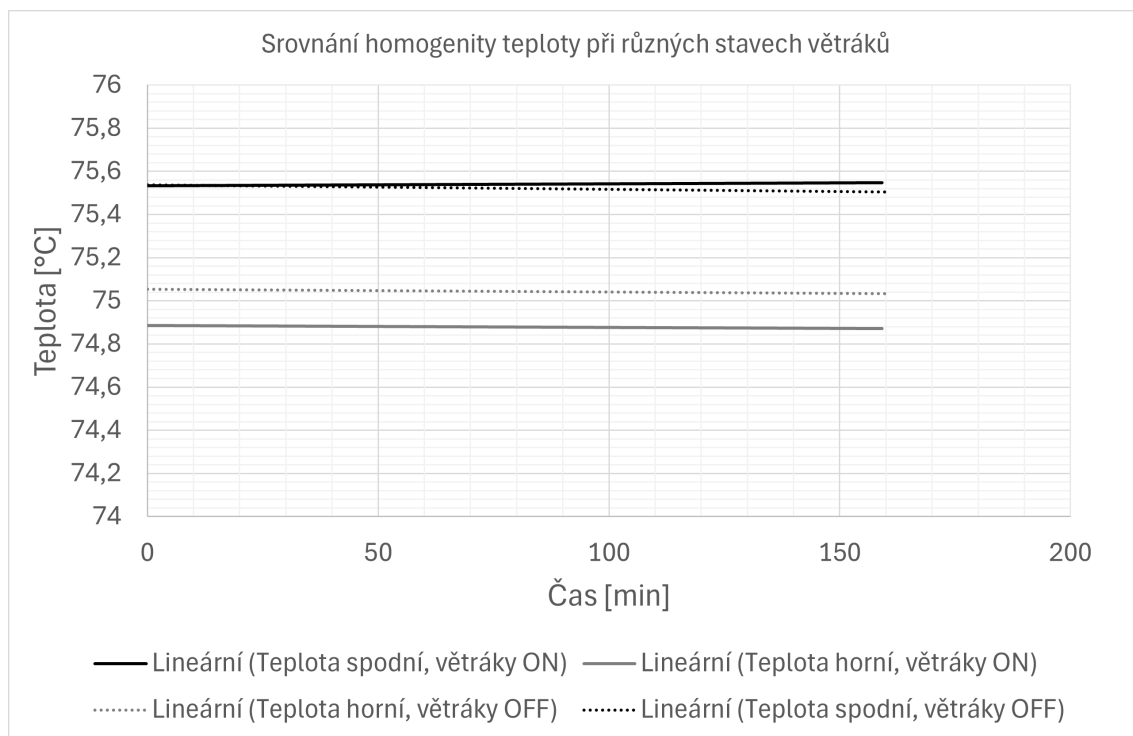
Jedná-li se o integrální kompozitní díl, je patřičné využít vypékacího cyklu s nulovou hysterezí, a tedy i minimální fluktuací teplot.

Při vypékání méně zásadního dílu je možné prodloužit životnost pece nižšími nároky na kvalitu udržování teploty.

Zvýšení času měření by zvýšil relevanci naměřených dat.

Měření homogenity teploty v peci Vzhledem k počtu měřicích senzorů je měření velice orientační. Měřeny byly teplota ve výšce roštu a teplota ve výšce horní stěny. Z grafu 10.8 je patrné, že teplota v blízkosti roštu převyšuje teplotu u stropu.

Pravděpodobná příčina spočívá v blízkosti senzoru u topných spirál. I toto hledisko je tedy vhodné uvažovat při vypékání kompozitů.



Obr. 10.8: Srovnání homogenity ohřátí pece při různých režimech větráků

I zde je možné vynést velikosti směrodatných odchylek, a získat tak představu o funkci větráků. Stále je nutné mít na paměti, že se jedná o směrodatné odchylky z naměřených hodnot transponované na proměnné teploty při regulaci.

Tab. 10.3: Směrodatné odchylky při měření homogenity teploty

Větráky spuštěny	Ano	Ne
s teploty vzduchu horní části pece [°C]	0,28	0,30
s teploty vzduchu části pece u roštu [°C]	0,27	0,34
s teploty spirál [°C]	3,95	9,85

Měření kvality izolace bylo provedeno spíše pro představu termokamerou při vnitřní teplotě pece 150 °C. Došlo tak k vizuálnímu odhalení rizikové oblasti v části dveří, kde dochází ke znatelnému úniku tepla. Mitigaci tohoto jevu zajistilo přidání izolace do patřičných míst.



Obr. 10.9: Přirozený pohled na pec



Obr. 10.10: Pohled na pec termokamerou

Závěr

V rámci práce byl navrhnout a implementován algoritmus vypékání kompozitních materiálů. Tento algoritmus je schopen udržovat jak konstantní, tak v čase proměnnou teplotu.

Samotnému návrhu algoritmu předcházela stručný úvod do soutěže Formula Student, neboť právě k pomoci při výrobě formulí je pec určena.

Druhá kapitola pojednává o kompozitních materiálech tvořící integrální součást monopostu. Příprava těchto materiálů sestávajících z disperze a matrice vyžaduje vybraný přístup, jenž musí být pečlivě respektován.

Následující část práce věnovaná termodynamice prostřednictvím grafů a simulací přiblížila způsoby šíření tepla. Vedle zobrazených prostupů tepla stěn při různých součinitelích tepelné vodivosti λ byl vynesena předpokládaný ohřev pece vycházející z Fourier-Kirchhoffovy rovnice.

Přiblížení fyzikální podstaty zajistilo přípravu na existující provedení pecí v průmyslu, které sloužily jako inspirace při návrhu pece vlastní. Byly představeny pece s vnějším odsáváním vzduchu či autoklávy disponující vlastní schopností modifikace tlaku. Špičkovou kvalitu vypékání potom zajišťují pece s interním chlazením, kde je možné regulovat odvod tepla.

Průzkum realizovaných řešení umožnil návrh pece vlastní za účelem mitigace negativních aspektů pece předcházející. S vědomostmi o materiálech používaných pro stavbu pecí byla navržena kostra pece s oplechováním a roštem. Znalost termodynamiky pomohla s výběrem vhodné izolace pro udržení ohřátého vzduchu v žádaném prostoru. MDF obložení zajistilo vnější ochranu pece.

Před samotným návrhem elektroniky a dalších elektrických součástí byl přiblížen regulační obvod a typy možných regulací. Vzhledem k nízké dynamice změn teplot pece byla prohlášena bang-bang regulace optimálním řešením. Daná regulace je součástí aditivních procesů, neboť regulace na v čase proměnnou hodnotu vyžadovala použití sekvenční lineární interpolace.

Vybraná forma regulace koreluje s recyklovaným elektrotechnickým vybavením. Dodání požadovaného výkonu do objemu pece zajišťují topné spirály. O rovnoměrnost rozložení teploty se starají větráky. Dané výkonové komponenty jsou ovládány mechanickými spínači umístěnými společně s ochrannými prvky v rozváděči. Tento rozváděč byl analyzován a modifikován pro současné účely. Samozřejmostí je zhotovení dokumentace pro budoucí analýzu.

Správu výkonové části zajišťuje mikrokontrolér osazený na desce s displejem a SD kartou. Ten by svým nízkým napětím a limitovanou dodávkou proudu stěží řídil spínače řízené střídavým napětím. Z tohoto důvodu byla navržena deska plošných spojů obsahující součástky zajišťující bezproblémovou transformaci řídicího signálu. Tato deska dále obsahuje převodníky teploty termočlánků rozmístěných v prostoru pece.

Ani elektronika by nebyla schopna udržování teploty, kdyby nebyla řízena instrukcemi nahraného programu. Program v jazyce C, vytvořený za účelem optimálního vypečení kompozitních dílů disponuje řídicím algoritmem, který udržuje teplotu v peci způsoby uvedenými v kapitole o regulaci teploty. Při všech cyklech je možné ukládat data na SD kartu či přímo do počítače. Dále řídicí software poskytuje grafické uživatelské rozhraní, jenž zajišťuje intuitivní komunikaci s uživatelem. I přes jednoduchost ovládání byl zhotoven manuál se všemi potřebnými informacemi.

Po výrobě a zprovoznění pece byla provedena řada měření, jenž pomohla odkrýt vlastnosti pece. Zhodnoceny byly funkčnost programu, kvalita regulace teploty konstantní i dynamické, rozdílné chování při rozdílné cirkulaci vzduchu. K analýze byl využit matematický aparát, který pomohl vyhodnotit tisíce sebraných dat.

Lze tedy prohlásit, že všechny body zadání byly splněny a pec slouží svému účelu tak, jak má.

Bibliografie

1. FSG, Formula Student Germany. *Formula Student Rules 2024*. 2024. Dostupné také z: https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.1.pdf. [cit.24-05-1].
2. EFORCE, Prague Formula. *eForce Prague Formula Formula Student*. 2024. Dostupné také z: https://eforce1.feld.cvut.cz/web/?page_id=718. [cit.24-04-29].
3. EFORCE, Prague Formula. *eForce Prague Formula Garage*. 2024. Dostupné také z: https://eforce1.feld.cvut.cz/web/?page_id=255370. [cit.24-04-29].
4. FSAEPARTS. *Formula Student World Rankings*. 2024. Dostupné také z: <https://fsaeparts.com/pages/formula-student-world-rankings>. [cit.24-04-29].
5. WILLIAM D. CALLISTER Jr., David G. Rethwisch. *Fundamentals of Materials Science and Engineering*. 4. vyd. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2013. ISBN 978111832269-7.
6. ARLINGTON: AMERICAN COMPOSITES MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2023. *Composites Manufacturing Processes*. In: *CompositesLab [online]*. 2023. Dostupné také z: <https://romeorim.com/what-are-composites/>. [cit.24-04-29].
7. BARBERO, Ever J. *Introduction to Composite Materials Design*. 2. vyd. CRC Press, 2011. ISBN 9781420079159.
8. ING. MILAN VNOUČEK, Ph.D. *Kompozitní materiály*. 2023. Dostupné také z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/progtech/Kompozity%20_%20ZCU.pdf. [cit.24-04-29].
9. M. MINUS, Kumar S. The processing, properties, and structure of carbon fibers. *JOM*. 2005, č. 57, s. 52–58. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s11837-005-0217-8>. [cit.24-04-30].
10. MATHMATCH. *4130 Steel (Chromoly): Properties and Applications*. 2024. Dostupné také z: <https://matmatch.com/learn/material/4130-steel>. [cit.24-05-1].
11. EASY, Composites. *EL160 High Temp Epoxy Laminating Resin*. 2024. Dostupné také z: <https://www.easycomposites.co.uk/el160-high-temperature-epoxy-laminating-resin>. [cit.24-04-30].
12. ELEMENT-SHOP. *Tužidla (tvrdidla) do epoxidových pryskyřic*. 2024. Dostupné také z: <https://www.element-shop.cz/tuzidla-do-epoxidovych-pryskyric/>. [cit.24-05-1].

13. EASY, Composites. *XC110 416g 2x2 Twill 6k Prepreg Carbon Fibre (1250mm)*. 2024. Dostupné také z: <https://www.easycomposites.co.uk/xc110-416g-22-twill-6k-prepreg-carbon-fibre>. [cit.24-05-1].
14. LOOS, Alfred Charles. *Curing of graphite/epoxy composites*. University of Michigan, 1982.
15. EASY, Composites. *EL160 HIGH TEMPERATURE EPOXY LAMINATING RESIN*. 2024. Dostupné také z: <https://media.easycomposites.co.uk/datasheets/EC-TDS-EL160-High-Temperature-Laminating-Resin.pdf>. [cit.24-05-1].
16. ENERGETIKA.CVUT. *Šíření tepla*. 2018. Dostupné také z: http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/sireni_tepla.pdf. [cit.24-05-2].
17. POKORNÝ, Ing. Marek. *Vedení tepla*. 2006. Dostupné také z: http://people.fsv.cvut.cz/www/wald/Pozarni_odolnost/e-text/specialiste/1/1-2_Vedeni_tepla.pdf. [cit.24-05-1].
18. MCBEATH, Simon. *Competition Car Composites: A Practical Handbook*. 2. vyd. Veloce Publishing Ltd, 2016. ISBN 9781845849054.
19. UNMZ. *ČSN EN 60398-ed.2 (361104) Zařízení pro elektroohřev a elektromagnetické zpracování - Obecné zkušební metody*. 2. vyd. 2015.
20. CHEVESS ENGINEERING, s. r. o. *ČSN EN 764-1+A1 (690004) Tlaková zařízení - Část 1: Slovník*. 1. vyd. 2019.
21. KHODABANDEH, Erfan. Parametric study of heat transfer in an electric arc furnace and cooling system. *Applied thermal engineering*. 2017, č. 123, s. 1190–1200. ISSN 1359-4311. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.193>.
22. LAC. *Měření pecí dle normy CQI-9 a AMS 2750*. 2023. Dostupné také z: <https://www.lac.cz/cs/pece-a-susarny/mereni-a-normy/mereni-rozlozeni-teplot-cqi-9-ams-2750>. [cit.24-05-6].
23. BALOI, George. *CQI-9 Special Process: Heat Treat System Assessment*. 2020. Tech. zpr. American Metal Processing Company. Dostupné také z: <https://uploads-ssl.webflow.com/5ce60004d355ee060ae09de8.pdf>. [cit.24-05-6].
24. COOPER, Ross G. Zinc toxicology following particulate inhalation. *Indian J Occup Environ Med*. 2008, č. 12, s. 10–13. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/10.4103/0019-5278.40809>.
25. PROPASIV. *VakuPRO*. 2023. Dostupné také z: https://eshop.propasiv.cz/cu/Technicky_list-PROPASIV_VakuPRO. [cit.24-05-7].
26. ISOVER, Division. *Isover TF*. 2014. Dostupné také z: <https://www.isover.cz/dokumenty/technicke-listy/tl-2024-isover-tf-en.pdf>. [cit.24-05-7].
27. VUPS, Výzkumný ústav pozemních staveb. *ČSN EN 14706 (727221) Tepelněizolační výrobky pro zařízení budov a průmyslové instalace - Stanovení nejvyšší provozní teploty*. 1. vyd. 2013.

28. DOC. ING. BOHUMIL ŠULC CSC., doc. Ing. Miluše Vítečková CSc. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. 1. vyd. Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-01-03007-5.
29. THE MATHWORKS, Inc. *Model Bang-Bang Temperature Control System*. 2024. Dostupné také z: <https://www.mathworks.com/help/stateflow/ug/bang-bang-control-using-temporal-logic.html>. [cit. 24-05-10].
30. PINNOW, Stefan. *pgfplots interpolation*. 2019. Dostupné také z: <https://tex.stackexchange.com/questions/200816/pgfplots-interpolation>. [cit. 24-05-14].
31. UNMZ. *ČSN EN 60529 (330330) Stupně ochrany krytem (krytí - IP kód)*. 1. vyd. 1993.
32. ING. RADEK HAVLÍČEK, Ph.D. *Technická zařízení za požáru*. 2024. Dostupné také z: https://bezpecnost.feld.cvut.cz/tzp/TZP_1.pdf. [cit. 24-05-10].
33. OBSOLETE. *Series CA4 Contactors and CAT4 Starters*. 1. vyd. 2008. Dostupné také z: <https://datasheet.octopart.com/CA4-9-10-24-Sprecher-%2B-Schuh-datasheet-13072693.pdf>. [cit. 24-05-12].
34. PAUL HOROWITZ, Winfield Hill. *The Art of Electronics*. 3. vyd. Cambridge University Press, 2015. ISBN 978-0-521-80926-9. Dostupné také z: <https://eclass.uniwa.gr/modules/document/index.php?course=EEE265.pdf>. [cit. 24-05-12].
35. CHEN-YUAN LU, SHAN-WEN DU; KUO, SHIH-KANG. Development of an Online Blast Furnace Burden Profile Measuring System. *China Steel Technical Report*. 2010, č. 23, s. 25–30. Dostupné také z: <https://www.csc.com.tw/csc/ts/ena/pdf/no23/05--Development%of%an%Online%Blast%Furnace%Burden%Profile%Measuring%System.pdf>. [cit. 24-05-6].
36. PROFESS, spol. s r.o. *SNÍMAČE TEPLoty PT100*. 2024. Dostupné také z: https://www.profess.cz/cs/pci/odporove_snimace_teploty. [cit. 24-05-12].
37. JSP, Měření a regulace. *Programovatelné převodníky pro snímače teploty*. 1. vyd. 2013. Dostupné také z: <https://www.jsp.cz/files/jb01.pdf>. [cit. 24-05-12].
38. TME, s.r.o. *Termistory NTC*. 2024. Dostupné také z: https://www.tme.eu/cz/katalog/termistory-ntc_112323/. [cit. 24-05-12].
39. HOTAIR.CZ. *K-termočlánek se závitem M6 a SS jímkou - délka 3m*. 2024. Dostupné také z: <https://www.hotair.cz/detail/merici-pristroje/teplomery-a-sondy/k-termoclanek-se-zavitem-m6-a-ss-jimkou-delka-3m.html>. [cit. 24-05-13].
40. RENESAS, Corporation Electronics. *MCU Basic Structure/Operation*. 2024. Dostupné také z: <https://www.renesas.com/us/en/support/engineer-school/mcu-01-basic-structure-operation>. [cit. 24-05-14].
41. LASKAKIT, s.r.o. *LaskaKit ESPD-35 ESP32 3.5 TFT ILI9488 Touch*. 2024. Dostupné také z: <https://www.laskakit.cz/laskakit-esp32-35-esp32-3-5-tft-ili9488-touch>. [cit. 24-05-14].

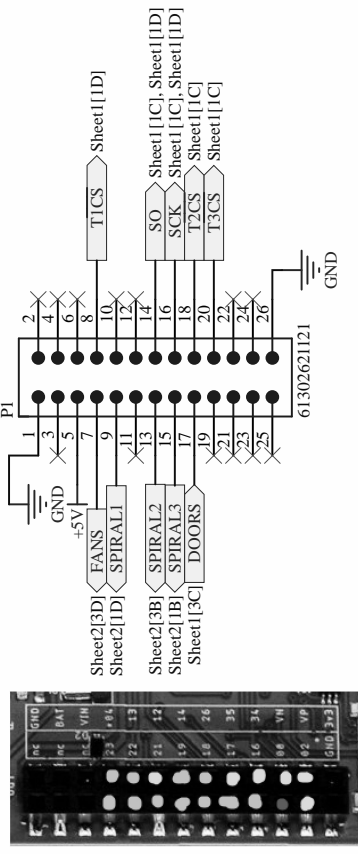
42. ILITEK. *a-Si TFT LCD Single Chip Driver 320(RGB) x 480 Resolution*. 100. vyd. 2012. Dostupné také z: <https://www.hpinfotech.ro/ILI9488.pdf>. [cit.24-05-14].
43. ESPRESSIF, Systems. *ESP32 WROOM 32E*. 1.6. vyd. 2023. Dostupné také z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf. [cit.24-05-15].
- 44.ONSEMI. *6-Pin DIP Random-Phase Triac Driver Output Optocoupler (250/400 V Peak)*. 1. vyd. 2018. Dostupné také z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/308/1/MOC3023M_D-2316077.pdf. [cit.24-05-15].
45. TOSHIBA, Corporation. *T2N7002BK*. 3.0. vyd. 2019. Dostupné také z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/408/T2N7002BK_datasheet_en_20191025-1916498.pdf. [cit.24-05-15].
46. WEEN SEMICONDUCTORS CO., Ltd. *BT1308W-600D*. 1. vyd. 2018. Dostupné také z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/848/bt1308w-600d-1520005.pdf>. [cit.24-05-15].
47. LITTELFUSE, Inc. *TVS Diodes*. 1. vyd. 2020. Dostupné také z: <https://www.littelfuse.com/media?resourcetype=datasheets&itemid=09a6ae9a-73cb-4ac4-acac-e6dab92ab953&filename=littelfuse-tvs-diode-smbj-datasheet>. [cit.24-05-15].
48. MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, Inc. *MAX6675 Cold-Junction-Compensated K-Thermocouple-to-Digital Converter*. 3. vyd. 2021. Dostupné také z: <https://cz.mouser.com/datasheet/MAX6675-3130113.pdf>. [cit.24-05-15].
49. ADAFRUIT INDUSTRIES, Limor Fried for. *MAX6675-library*. 5. vyd. 2019. Dostupné také z: <https://github.com/adafruit/MAX6675-library/tree/master>. [cit.24-05-15].
50. BOSEJI'S, Lab. *Simple Serial Port Logging Utility*. 2024. Dostupné také z: <https://boseji.com/projects/serialport/logger/>. [cit.24-05-14].
51. LASKAKIT, s.r.o. *ESPD-35*. 2.1. vyd. 2023. Dostupné také z: <https://github.com/LaskaKit/ESPD-35>. [cit.24-05-14].
52. BODMER. *TFT_eSPI*. 44. vyd. 2024. Dostupné také z: https://github.com/Bodmer/TFT_eSPI. [cit.24-05-15].
53. DUSTINWATTS. *FT6236*. 1.0.2. vyd. 2023. Dostupné také z: <https://github.com/DustinWatts/FT6236>. [cit.24-05-15].
54. MĚKOTA, Daniel. *Bachelor thesis*. 2024. Dostupné také z: <https://eforce1.feld.cvut.cz/gitlab/danm/bachelor-thesis>. [cit.24-05-19].
55. ČERVENKA, Milan. *Zpracování fyzikálních měření: Studijní text pro fyzikální praktikum*. 2020. Dostupné také z: <https://planck.fel.cvut.cz/praktikum/downloads/navody/zpracdat.pdf>. [cit.24-05-19].
56. VŠB-TUO, Fakulta strojní. *7. Kvalita regulačního pochodu diskretních regulačních obvodů*. 1. vyd. 2024. Dostupné také z: <http://books.fs.vsb.cz/cislicovaregulace/data/kapitola7.html>. [cit.24-05-15].
57. TEQUIPMENT.NET. *SKF TKTL 20 Infrared Digital Thermometer*. 1. vyd. 2024. Dostupné také z: <https://www.tequipment.net/SKFTKTL20.html#description>. [cit.24-05-15].

Přílohy

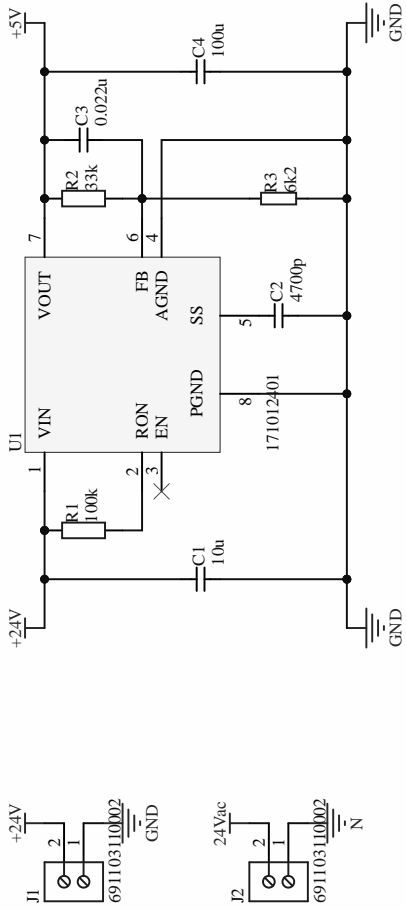
A Výkonová deska

A.1 Schéma

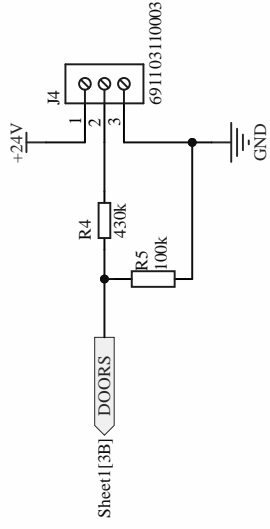
Connectors



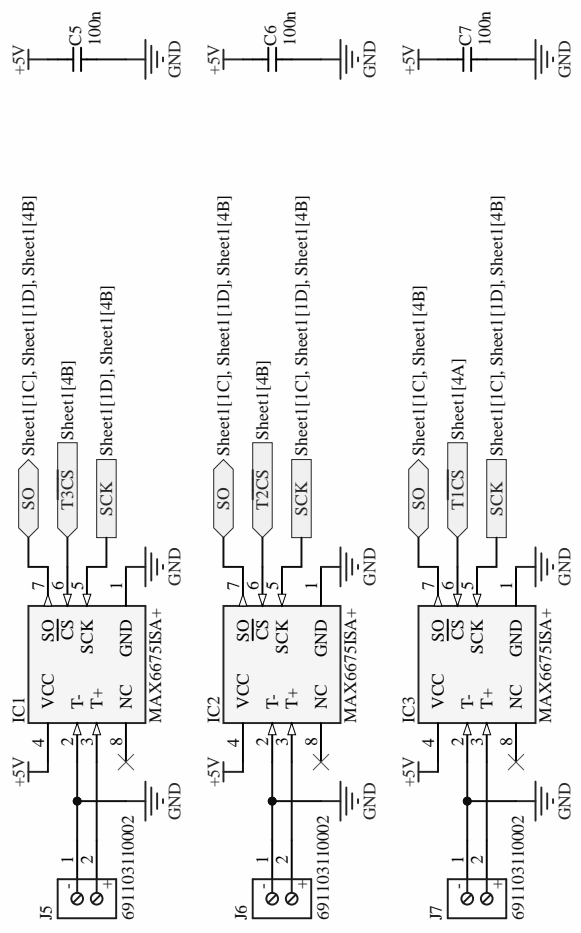
Power supply



Induction sensor



Temperature measurement



Drawn By:
Date:

Low side switches

4

3

2

1

A

A

B

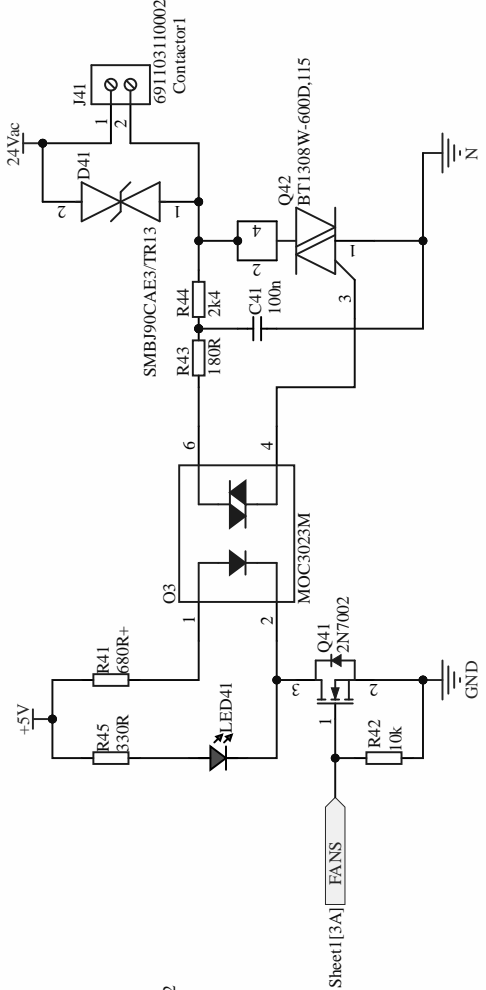
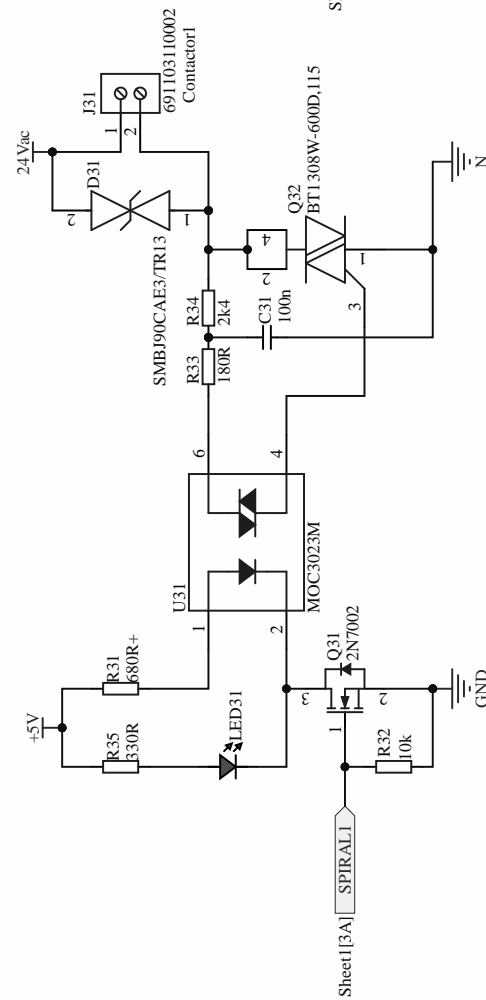
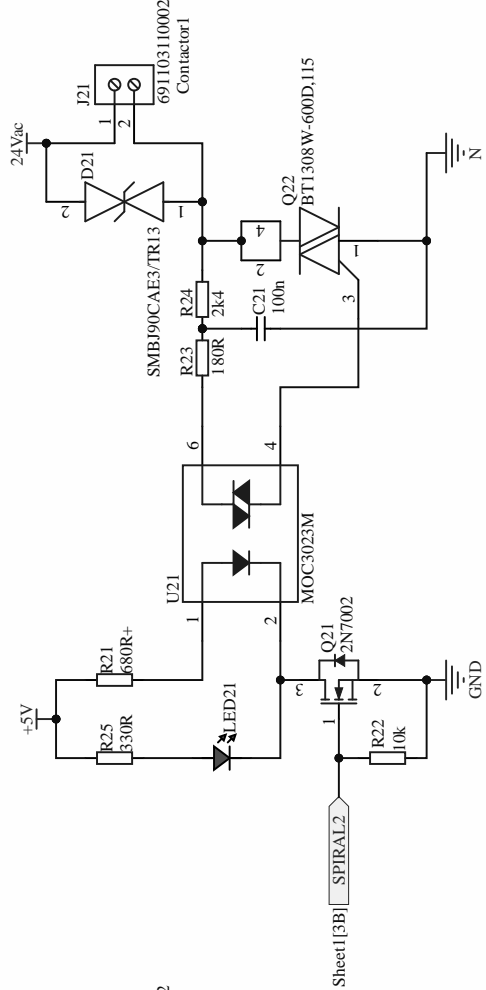
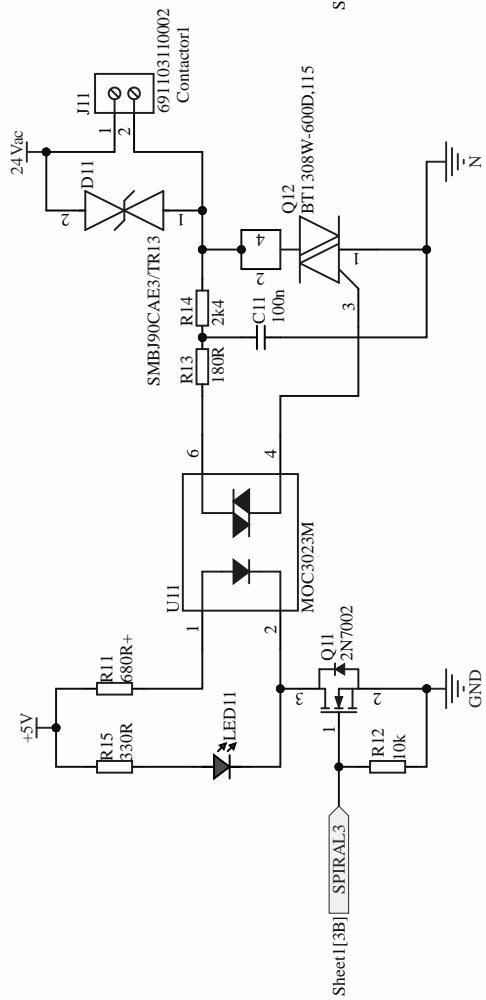
B

C

C

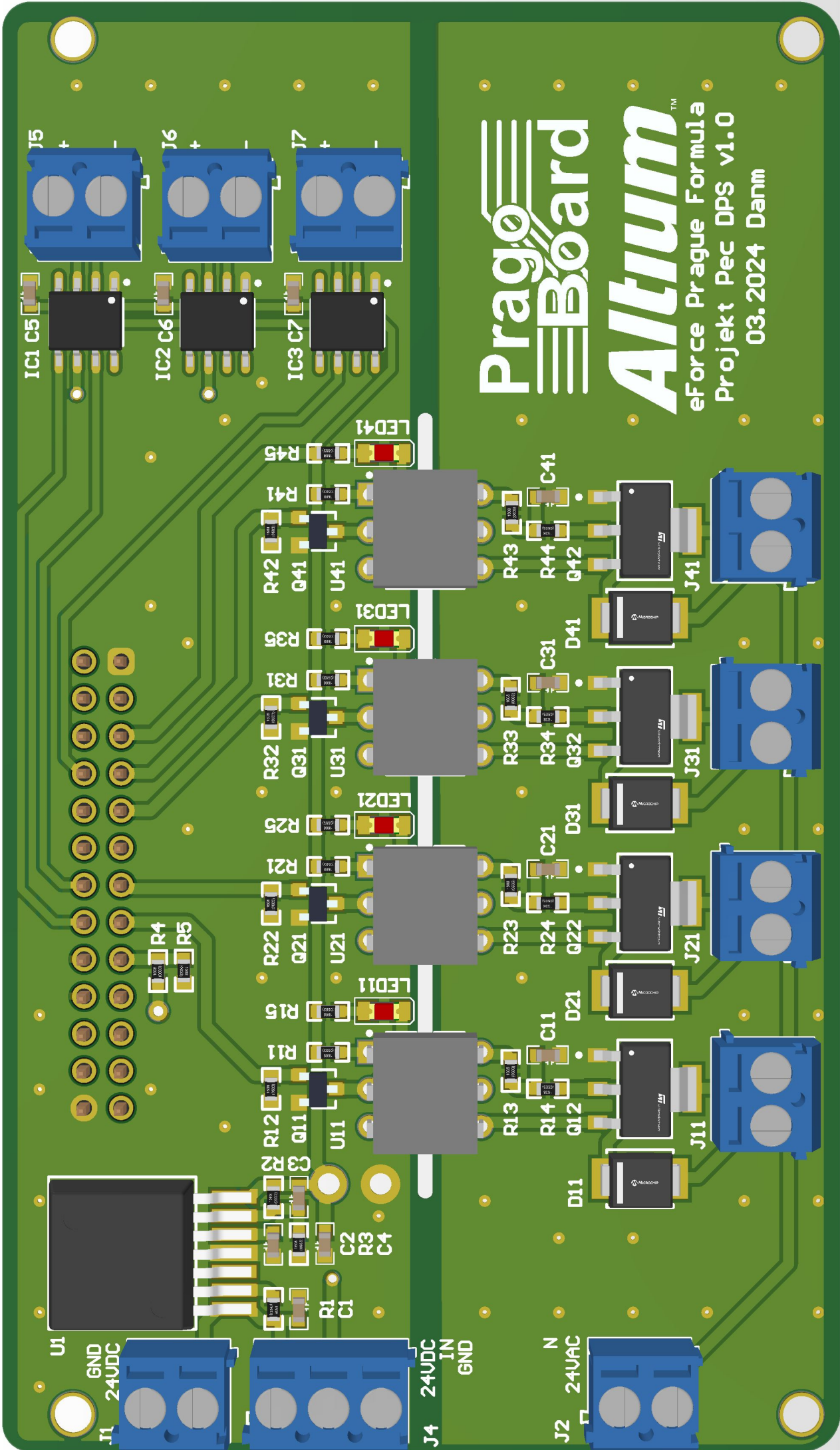
D

D



Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity
10u	CAPC_0603_10 u_50V	C1	CAPC_0603	CAPC_47p_060 3_50V	1
	CAPC_4700p_0 603_X7R_16V_	C2	CAPC_0603	CAPC_100n_06 03_X7R_16V_1	1
10%	CAPC_0.022u_	C3	CAPC_0603	0%	1
	0603_X7R_16V_	C4	CAPC_0603	CAPC_100n_06 03_X7R_16V_1	1
-10%	0.022uF	C5, C6, C7	CAPC_0603_10 0u_50V	CAPC_47p_060 3_50V	1
100u	CAPC_0603_10 0u_50V	C8	CAPC_0603	CAPC_1n0_060 3_50V	3
100n	CAPC_0603_10 0u_50V	C9, C10, C31, C41	CAPC_0603	CAPC_100n_06 03_X7R_16V_1	4
	100000pF	D11, D21, D31, D41	FF-DO-214AA- CA-MFG	OMP-06336- 000048-1	4
	TVS Diode	IC		OMP-00023-1	3
SMB06CAE7T R13	90VMM1461C SMBJ	J1, J2, J5, J6, J7, J11, J21, J31, J41		OMP-1502- 03254-2	9
MAX6675ISA+	Thermocoup to Digi 8-SOIC	IC1, IC2, IC3	SOIC8 (D)	OMP-1502- 03255-2	1
691103110002		J4	691103110003	LEDR_0805	4
691103110003		LED11, LED21, LED31, LED41	0805LEDR		
red	Triac Output Optocoupler, 1-Element, 5300V Isolation	C3, U11, U21, U31	MOC3023M	OMP-002- 00018-1	4
61302621121		P1	61302621121	OMP-1502- 01114-2	1
	Small Signal Field-Effect Transistor, 0.2A(I _D), 60V, 1-Element, N- Channel, Metal- oxide Semiconducto r FET				
2N7002		O11, O21, O31, O41	SOT23-3	OMP-013- 00000-1	4
ZD103MIN 5A44	TRIAC SENS GATE 600V 1A SOT23	Q12, Q22, Q32, Q42	FP-SOT-223- MFG	OMP-12193- 000012-1	4
Thick film	100000.00, 30000.00, 6200.00, 480000.00, 680.00 but more, 10000.00, 180.00, 2400.00, 330.00	R1, R2, R3, R4, R5, R11, R12, R13, R14, R15, R21, R22, R23, R24, R25, R31, R32, R33, R34, R35, R41, R42, R43, R44, R45		RES_100k_5%_ 0603, RES_33k_5%_0 603, RES_6k2_5%_0 603, RES_430k_5%_ 0603, RES_330R_5%_ 0603, RES_10k_5%_0 603, RES_180R_5%_ 0603, RES_2k4_5%_0 603	25
171012401		U1	WPVME- VDRM_T0263- 7EP_L13.77W1 0.16H4.57	OMP-1496- 00003-2	1

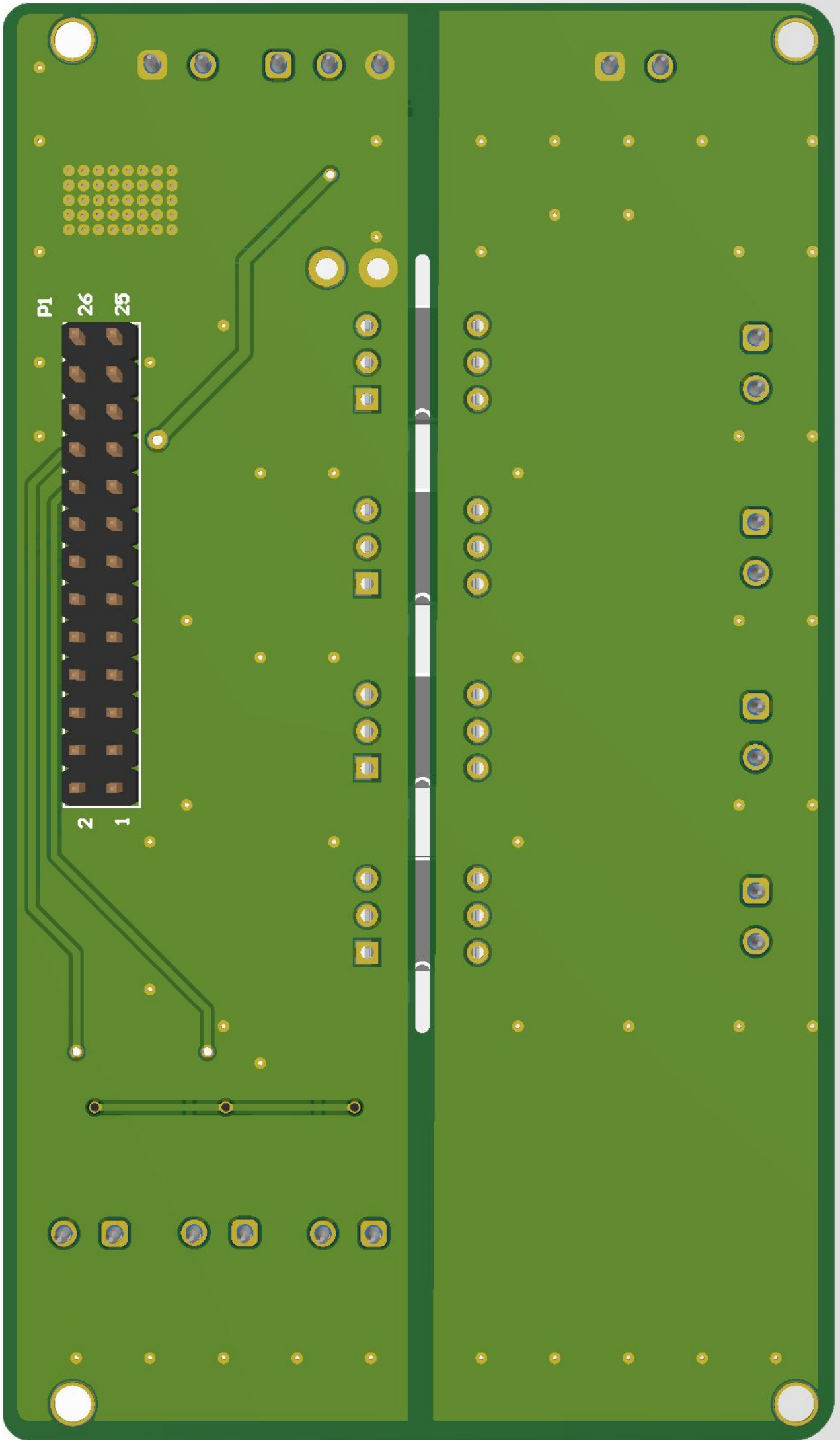
A.2 DPS



PragoBoard

Altium™

eForce Prague Formula
Projekt Pec DPS v1.0
03.2024 Danm



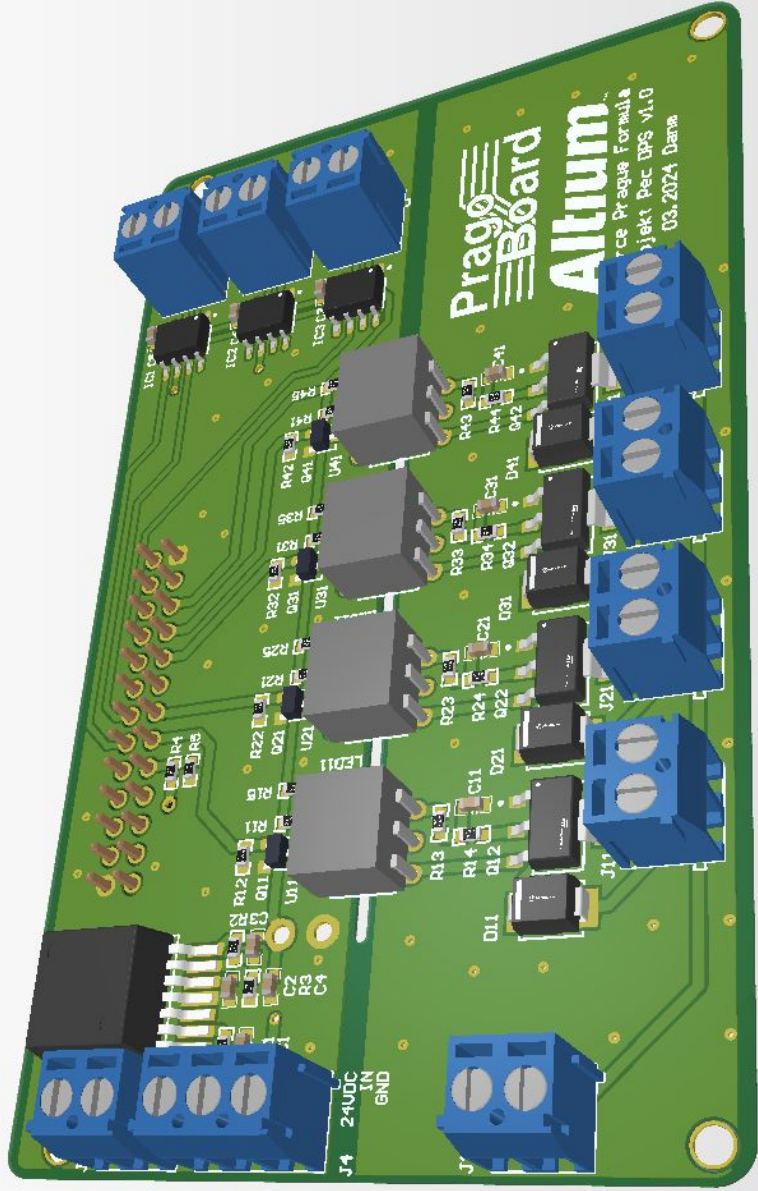
P1

26

25

2

1



Prague Board
Altium
Prague Prague Formale
Projekt Pec UPS v1.0
03.2024 Dana

J4 24VDC
IN
GND

J11

J12

LED1

U1

R1

C1

D1

J1

R2

C2

D2

J2

R3

C3

D3

J3

R4

C4

D4

J4

R5

C5

D5

J5

R6

C6

D6

J6

R7

C7

D7

J7

R8

C8

D8

J8

R9

C9

D9

J9

R10

C10

D10

J10

R11

C11

D11

J11

R12

C12

D12

J12

R13

C13

D13

J13

R14

C14

D14

J14

R15

C15

D15

J15

R16

C16

D16

J16

R17

C17

D17

J17

R18

C18

D18

J18

R19

C19

D19

J19

R20

C20

D20

J20

R21

C21

D21

J21

R22

C22

D22

J22

R23

C23

D23

J23

R24

C24

D24

J24

R25

C25

D25

J25

R26

C26

D26

J26

R27

C27

D27

J27

R28

C28

D28

J28

R29

C29

D29

J29

R30

C30

D30

J30

R31

C31

D31

J31

R32

C32

D32

J32

R33

C33

D33

J33

R34

C34

D34

J34

R35

C35

D35

J35

R36

C36

D36

J36

R37

C37

D37

J37

R38

C38

D38

J38

R39

C39

D39

J39

R40

C40

D40

J40

R41

C41

D41

J41

R42

C42

D42

J42

R43

C43

D43

J43

R44

C44

D44

J44

R45

C45

D45

J45

R46

C46

D46

J46

R47

C47

D47

J47

R48

C48

D48

J48

R49

C49

D49

J49

R50

C50

D50

J50

R51

C51

D51

J51

R52

C52

D52

J52

R53

C53

D53

J53

R54

C54

D54

J54

R55

C55

D55

J55

R56

C56

D56

J56

R57

C57

D57

J57

R58

C58

D58

J58

R59

C59

D59

J59

R60

C60

D60

J60

R61

C61

D61

J61

R62

C62

D62

J62

R63

C63

D63

J63

R64

C64

D64

J64

R65

C65

D65

J65

R66

C66

D66

J66

R67

C67

D67

J67

R68

C68

D68

J68

R69

C69

D69

J69

R70

C70

D70

J70

R71

C71

D71

J71

R72

C72

D72

J72

R73

C73

D73

J73

R74

C74

D74

J74

R75

C75

D75

J75

R76

C76

D76

J76

R77

C77

D77

J77

R78

C78

D78

J78

R79

C79

D79

J79

B Dokumentace



eForce Prague Formula

Tel. +420 721 314 158

Firma / zákazník

Popis projektu

Číslo projektu

Komise

Low temperature composite furnace

00

eForce Prague Formula

Výrobce (firma)

Sloupec

Název projektu

Výrobek

Typ

Místo instalace

Osoba odpovědná za projekt

Zvláštnost dílu

eForce Prague Formula

Workshop

Composite furnace

Mekota

Vytvořeno dne

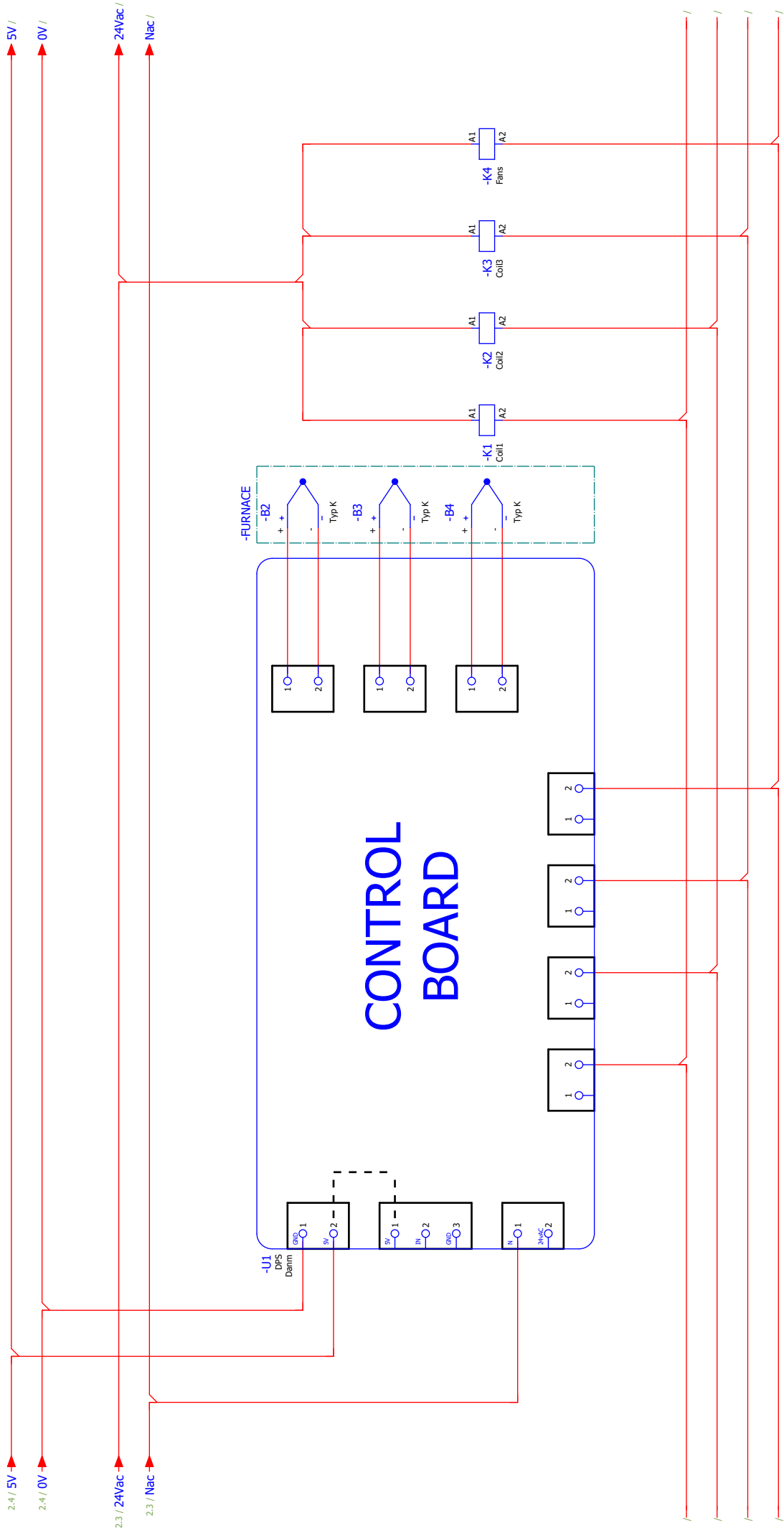
Zpracováno dne

11/04/2024

22/04/2024

od (zkratka) mekota

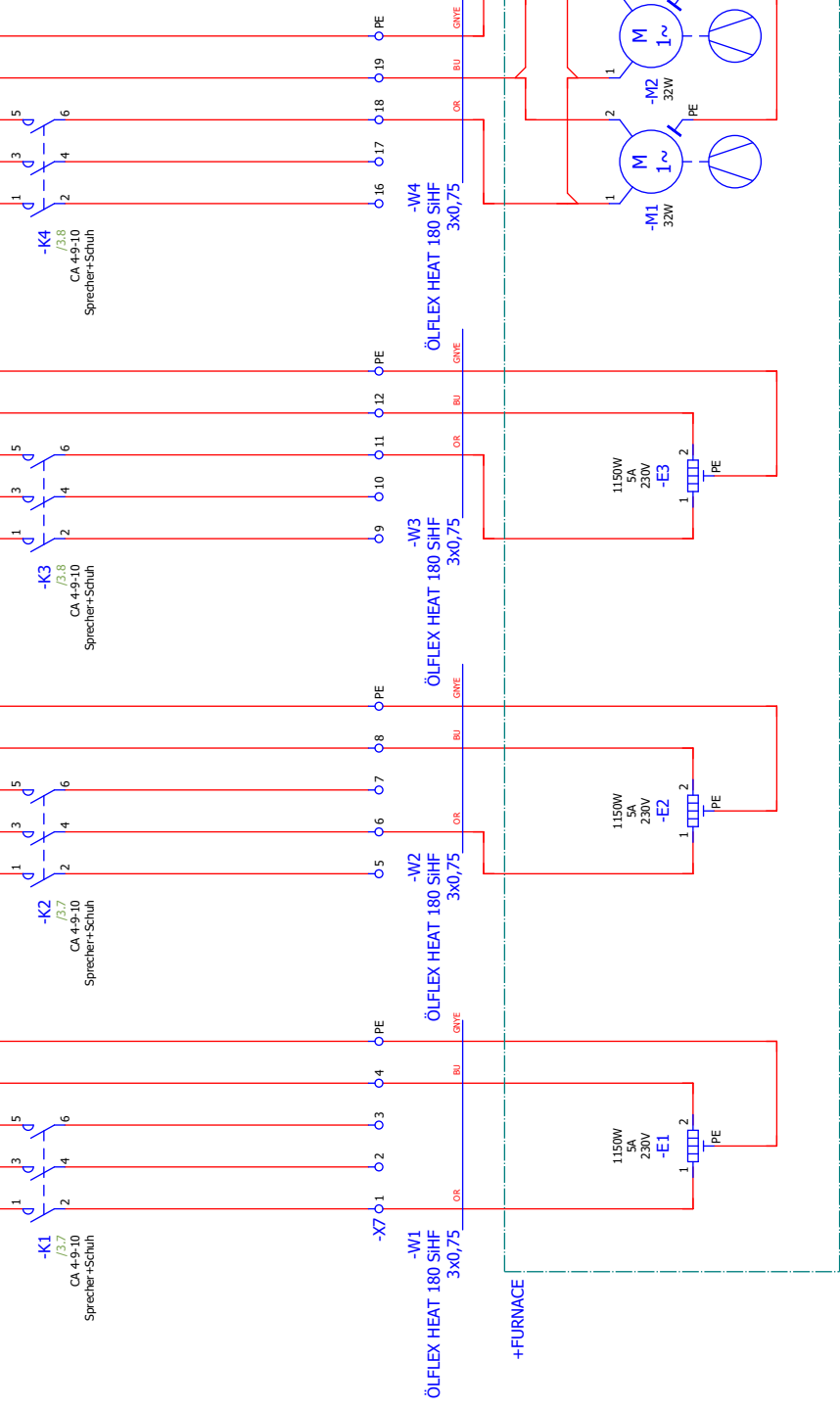
Počet stran 5



- 1 2 3 5
- 2 4 6 /4.2
- 1 2 3 5
- 2 4 6 /4.3
- 1 2 3 5
- 2 4 6 /4.5
- 1 2 3 5
- 2 4 6 /4.6

Datum		22/04/2024		eForce Prague Formula		Control device and contactor coils		= CA1	
Zprac.		mekota		eForce Prague Formula				+ EAA	
Zmont.				LOW temperature composite furnace				00	
Přív.				Náhradná z		Náhradno čim		List	
Datum								Strana	
								4 / 5	
								3	

2.2 / L1_F /
 2.2 / L2_F /
 2.2 / L3_F /
 2.2 / N_F /
 2.9 / PE /



-K1
 CA 4-9-10
 Sprecher+Schuh

-K2
 CA 4-9-10
 Sprecher+Schuh

-K3
 CA 4-9-10
 Sprecher+Schuh

-K4
 CA 4-9-10
 Sprecher+Schuh

-W1
 ÖLFLEX HEAT 180 SHF
 3x0,75

-W2
 ÖLFLEX HEAT 180 SHF
 3x0,75

-W3
 ÖLFLEX HEAT 180 SHF
 3x0,75

-W4
 ÖLFLEX HEAT 180 SHF
 3x0,75

1150W
 5A
 230V
 -E1

1150W
 5A
 230V
 -E2

1150W
 5A
 230V
 -E3

M
 1~
 32W
 -M1

M
 1~
 32W
 -M2

M
 1~
 32W
 -M3

Datum	22/04/2024	eForce Prague Formula	eForce Prague Formula	Contactors	= CA1 + EAA
Zprac.	mekota				
Zontr.		Low temperature composite furnace			
Přív.		Náhradní z	Náhradno čim		
Datum					
Název					
00					
List					5 / 5
Strana					4

C Manuál

Furnace for composite materials

Danm
eForce Prague Formula
25-04-2024
Version 1

Abstract

This document describes the capabilities of the furnace for composites materials. Main furnace specifications and user guide are introduced here. It is an addendum to bachelor thesis (“Furnace for composite materials”) by Danm.

Make sure to **carefully read this document, especially subsection 1.1**

Contents

1	Introduction	2
1.1	Limitations and safety	2
1.2	Principle and specifications	2
2	GUI	3
2.1	Procedures	3
2.2	Screens	4

1 Introduction

Every piece of carbon formula part has to be cured. There are two available options. Curing or post-curing. Both types require higher temperatures and hence, the furnace for composites materials was made.

In this manual you will find information, requirements and limitations of this furnace and also the possible means of control.

1.1 Limitations and safety

Like other electrical and mechanical devices, this one was also designed for operation in certain conditions:

- ! → Max furnace temperature: 150 °C
- ! → Max load weight: 100 kg
- ! → Supply of external devices from 230 Vac receptacles during the curing is forbidden!
- ! → If there is a peculiar behavior, immediately turn off the system using the red-yellow side switch.

1.2 Principle and specifications

- Furnace: Furnace is basically insulated box with heaters and fans inside that provides evenly risen temperature in its volume.
- Temperature: Temperature is monitored by three K thermocouples. One is mounted to the heating spiral, two are in the air and provides option to be mounted to the surface of material that is about to be cured.
- MCU: ESP32-WROOM-32 16MB reads and modifies the temperature according to the target constant value or time variable values.
- Touchscreen display Target temperature can be modified using the touchscreen display and potentially via Bluetooth.
- Heating spirals: Heating spirals are supplied from 230 Vac power grid via contactors.
- Switching environment: Contactors are controlled in the 24 Vac power grid thanks to triacs. Triacs are switched thanks to the optocouplers and MOSFETs from the control board.
- Documentation If there is something sub-optimally working, you can see attached documentation to check whether everything is correct or not.

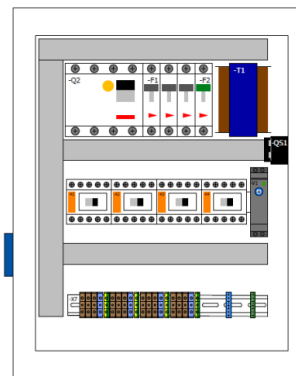


Figure 1: Switchboard with red-yellow switch

2 GUI

Everything that furnace is able to provide requires command from touch-screen display. Make sure, you have clean hands because otherwise, there is a risk of damaging the device.

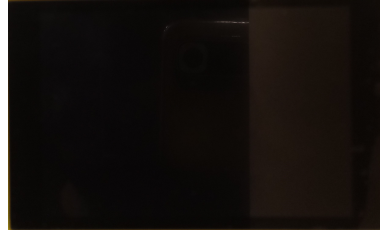


Figure 2: Off screen

2.1 Procedures

Turn on To start the system and GUI, turn the red-yellow switch to the vertical position clockwise. eForce logo will show up for five seconds and also heating coils and fans executes starting routine.

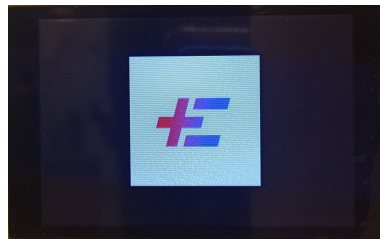


Figure 3: Starting screen

Main screen Main screen shows up and offer further actions. Desired action will be executed after pressing the proper button on the screen. There are four buttons on the screen from which you can choose.

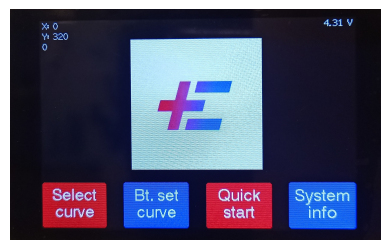


Figure 4: Main screen

2.2 Screens

Each implemented screen provides either some information or option to control the system.

Select curve Here you can choose curing curve for your resin using the buttons "Prev resin" or "Next resin". If the selected temperature curve correlates with the desired curve, press button "Start selected". Temperatures and system info will be displayed and regulation will begin.

During the process all buttons are disabled except the button "Stop selected". If you would like to do some other option, you will need to stop the current process first.

The last button called "Return home" returns back to Main screen.

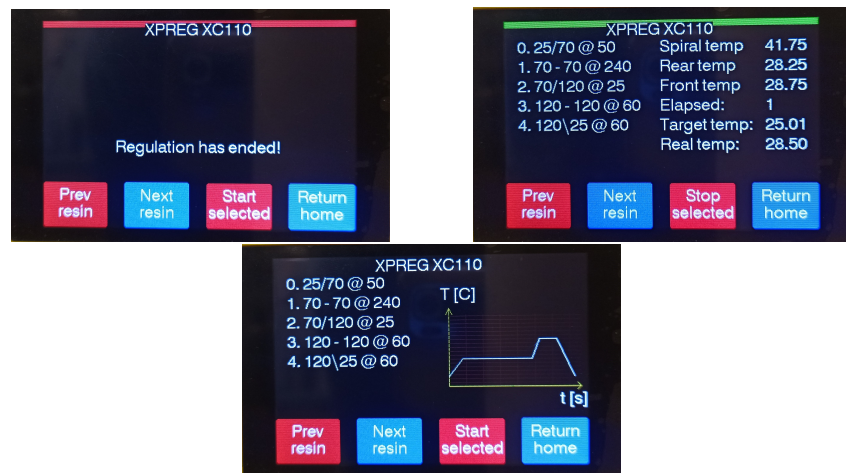


Figure 5: Select curve screens

Bt. set curve So far not implemented but this screen will provide option to send the demanded temperature curve via Bluetooth to the furnace and then start the correlating regulation.

To return to the Main screen press the the touchscreen wherever you want to.

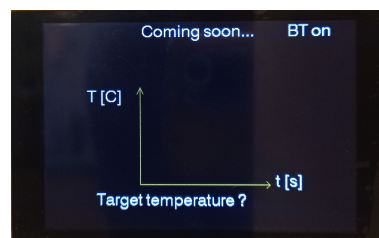


Figure 6: Bluetooth set screen

Quick start Here you can choose curing constant temperature using the buttons "Temp up" or "Temp down". Each of these buttons modifies the temperature. "Temp up" increase the temperature by 5 °C and "Temp down" decrease the temperature by 5 °C.

If the target temperature is set accordingly to your desire, press the "Start action" button which displays system temperatures and data and starts the regulation.

During the process all buttons are disabled except the button "Stop selected". If you would like to do some other option, you will need to stop the current process first.

The last button called "Return home" returns back to Main screen.



Figure 7: Quick start screens

System info Here you can find useful info and some points of interest.
Try to find out by yourself.