

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Manipulátor pro indukční ohřevy

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal KNEDLÍK**
Osobní číslo: **E18N0050P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Manipulátor pro indukční ohřevy**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

1. Zhodnoťte současný stav v oblasti manipulátorů používaných pro aplikace indukčních ohřevů.
2. Navrhněte manipulátor pro manipulaci se vsázkou při procesech indukčních ohřevů v silném elektromagnetickém poli.
3. Vyroberte prototyp manipulátoru.
4. Vytvořte vhodný řídicí program manipulátoru pro realizaci požadovaných indukčních ohřevů jako je např. kalení a žihání.
5. Ověřte funkčnost manipulátoru v praxi.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Rudnev, Valery, Totten George E. AMS Handbook, Volume 4C: Induction Heating and Heat Treatment Hardcover. ASM International, 2014. ISBN 978-1627080125.
2. Rudnev, Valery. Handbook of induction heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing) 2nd. CRC Press, 2017. ISBN 978-1466553958.
3. Lupi, Sergio; Forzan, Michele; Aliferov, Aleksandr. Introduction and Direct Resistance Heating. New York: Springer. ISBN 978-3-319-03478-2.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. David Rot, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



L.S.



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na vytvoření manipulátoru sloužícího k zasouvání zařízení nebo měřících systémů do komory studeného kelímku. Polohovací systém je tvořen nosným rámem, ovládacím panelem a hlavním rozvaděčem. Přesné polohování základny a řízení systému zajišťuje PLC CompactRIO 9081 od firmy National Instruments. Systém je pohodlně ovladatelný z dotykového displeje Weintek. Řídící algoritmus byl vytvořen v objektově orientovaném prostředí LabVIEW.

Tato práce měla několik vývojových částí. Nejprve bylo nutné vytvořit strojní část, tzn. nosný rám pro upevnění na komoru studeného kelímku, převod rotačního pohybu motoru pomocí kuličkového šroubu a matice zabudované v základně na pohyb vertikální posuvný. Poté následovala příprava elektrických schémat a zapojení jednotlivých elektrických obvodů. Nezbytnou částí bylo vytvoření řídicího algoritmu v prostředí LabVIEW a uživatelské rozhraní pro ovládání manipulátoru z dotykového displeje. V závěrečné fázi bylo nezbytné systém odzkoušet a doladit jednotlivé funkce.

Klíčová slova

manipulátor, LabVIEW, krokový motor, algoritmus, studený kelímek, ISM

Abstract

This diploma thesis is focused on creating a manipulator which is used to insert equipment or measuring systems into the chamber of a cold crucible. The positioning system consists of a supporting frame, a control panel and the main switchboard. Precise base positioning and system control are provided by the National Instruments CompactRIO 9081 PLC. The system is conveniently operated from the Weintek touch screen. The control algorithm is created in an object-oriented environment called LabVIEW.

This work had several developmental parts. First, it was necessary to create a machine part, i.e. to create the supporting frame for the mounting on the cold crucible chamber, converting the rotary motion of the motor by a ball screw and a nut integrated into the base to a vertical sliding motion. This was followed by the preparation of electrical diagrams and wiring of individual electrical circuits. An essential part was the creation of the control algorithm in LabVIEW and a user interface for controlling the manipulator from the touch screen. In the final phase, the system was tested and the individual functions were debugged.

Key words

manipulator, LabVIEW, stepper motor, algorithm, cold crucible, ISM

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 18.6.2020

Bc. Michal Knedlík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Davidovi Rotovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Zároveň chci poděkovat Ing. Jakobovi Jiřincovi za cenné rady během vývoje systému, dále Ing. Janu Hrbkovi za poskytnutí dat a parametrů z průběhu experimentálních taveb metodou ISM.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 TEORETICKÉ PŘEDPOKLADY SIMULACE VLIVU	11
ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE NA MANIPULÁTOR	11
1.1 TEORIE TEPLOTNÍHO POLE	13
2 AKTUÁLNÍ STAV MANIPULÁTORŮ V PRŮMYSLU	14
2.1 PRŮMYSLOVÉ MANIPULÁTORY A JEJICH ŘÍDICÍ SYSTÉMY	14
2.2 MANIPULAČNÍ SYSTÉMY A PODPŮRNÁ ZAŘÍZENÍ	16
3 TECHNOLOGIE STUDENÉHO KELÍMKU [7], [8]	18
4 ŘÍZENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ	20
4.1 ZPŮSOB ZAPOJENÍ STATOROVÉHO VINUTÍ	20
4.2 PRINCIP ŘÍZENÍ KROKOVÝCH MOTORŮ.....	21
4.3 ŘÍDICÍ OBVODY KROKOVÝCH MOTORŮ [10]	22
5 ÚVOD DO PROSTŘEDÍ LABVIEW	22
5.1 SEZNÁMENÍ S LABVIEW	23
5.2 DATOVÉ TYPY	26
5.3 PRINCIPY PŘENOSU DAT V LABVIEW [12].....	28
5.4 ZÁKLADNÍ STRUKTURY [14].....	29
6 NÁVRH MANIPULÁTORU	31
6.1 STROJNÍ ČÁST MANIPULÁTORU	31
6.2 SIMULACE PŮSOBENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO A TEPLOTNÍHO POLE	32
6.3 ELEKTRICKÁ ČÁST MANIPULÁTORU	37
6.3.1 <i>Hlavní rozvaděč</i>	37
6.3.2 <i>Ovládací panel</i>	39
7 POPIS VYTVOŘENÉHO ALGORITMU	43
7.1 HLAVNÍ VI.....	44
7.2 KOMUNIKAČNÍ PROTOKOL OPC–UA	47
8 TEST MANIPULÁTORU V PRAXI	48
ZÁVĚR	51
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	52
PŘÍLOHY	1

Úvod

Pomocí manipulátorů se snažíme člověka osvobodit od rutinních prací, ale i zastoupit, v případě kdy jeho schopnosti nepostačují např. zvedání těžkých břemen, manipulace ve výškách, výkopové práce, manipulace v nebezpečných prostorech atd.

Jedním z manipulátorů je např. i bagr. Postupem času se vývoj posunul dál a manipulátory jsou mnohem komplexnější, nepotřebují nepřetržitou obsluhu člověka. Zvládají náročnější práce je než pouhá manipulace s břemeny. Dokáží např. svařovat, lakovat, tvarovat karosérie automobilů atd.

V předkládané diplomové práci se zabývám návrhem manipulátoru pro usnadnění, zautomatizování indukčních procesů, kde je kladen důraz na plynulost pohybů, přesnost a bezporuchovost. Vytvořený systém je zaměřen na využití v laboratořích studeného kelímku pro aplikace Induction Skull Melting (ISM). Usnadňuje manipulace a měření v nebezpečných podmínkách komory studeného kelímku.

Srdcem řídicího systému je CompactRIO 9081 od firmy National Instruments, které pomocí digitálních karet přesně polohuje krokový motor a čte povely operátora z dotykového displeje nebo tlačítek. Krokový motor je vybaven enkodérem pro zjištění skutečné polohy základny, a proto je možné přesně inkrementovat požadovanou dráhu nebo stanovit pracovní limity.

Manipulátor a příslušenství byl vytvořen ve spolupráci s Centrem výzkumu Řež, kde manipulátor používají. Zaměstnanci CV Řež připravili mechanickou část. Elektrickou část včetně řídicího systému jsem připravil já.

Seznam symbolů a zkratek

H	intenzita magnetického pole	(A·m ⁻¹)
E	intenzita elektrického pole	(V·m ⁻¹)
J	hustota elektrického proudu	(A·m ⁻²)
D	elektrická indukce	(C·m ⁻²)
B	magnetická indukce	(T)
A	magnetický potenciál	(Wb·m ⁻¹)
φ	elektrický potenciál	(V)
ϵ	absolutní permitivita	(F·m ⁻¹)
γ	měrná elektrická vodivost	(S·m ⁻¹)
μ	absolutní permeabilita	(H·m ⁻¹)
ω	úhlová frekvence	(rad·s ⁻¹)
Δ	operátor Laplace	
c	měrná tepelná kapacita	(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
λ	měrná tepelná vodivost	(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
T	termodynamická teplota	(K)
ρ	hustota	(kg·m ⁻³)
Q₀	objemová hustota tepelné energie	(W·m ⁻³)
w_j	měrné Jouleovy ztráty	(W·m ⁻³)
ISM	Induction Skull Melting	
PLC	Programmable Logic Controller	
c-RIO	CompactRIO	
HMI	Human Machine Interface	
IP	Internet Protocol	
MAC	Media Access Control	
TCP	TRansmission Control Protocol	
OPC-UA	OLE for Proces Control-Unified Architecture	
PN IO-D	Profinet IO Device	
PN IO-C	PN IO-D	
PN S	Profinet Supervisor	
PETG	Polyethylentereftalát s modifikovaným glykolem	
VI	Virtuální Instrument	
USB	Universal Serial Bus (USB sběrnice)	
SubVI	podprogram (pod VI)	
MPG	Manual Pulse Generator	
IVR	In-Vessel Retention	
UO₂	oxid uraničitý	
ZrO₂	oxid zirkoničitý	
DOS	Disk Operating Systém	
LabVIEW	Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench	
DAQ	Data Acquistion Systém	
TFT	Thin Film Transistor	
Zr	zirkonium	
ExVC	Ex-Vessel Cooling	
FPGA	Field Programmeble Gate Array	
RPM	Revolutions per minute	
TTL	Tranzistor-tranzistor-logic	
OPC-UA	OLE for Proces Control Unified Architecture	
CFD	Computational Fluid Dynamics	

1 Teoretické předpoklady simulace vlivu elektromagnetického pole na manipulátor

Návrh složitých zařízení se v dnešní době neobejde bez předběžné simulace a úvahy nad případnými problémy a vlivy na tato zařízení. Pro řešení těchto problémů je nezbytné využití výpočetní techniky z důvodu složitosti diferenciálních rovnic, i přesto je nutné řešenou oblast omezit okrajovými podmínkami. Pro řešení elektromagnetického pole lze využít různé softwary komerční či volně dostupné. Integrací počítačového modelování, simulací, důmyslných algoritmů a poznatků elektrotechniky dnes vznikají zařízení na špičkové úrovni.

Většina softwarů k řešení elektromagnetických polí využívá elektrodynamické potenciály. Výhodou je jejich garantovaná spojitost na rozhraní oblastí modelu na rozdíl od vektorů pole, ty ji mají garantovanou pouze v regulárních bodech modelu.

Pomocí 2. Maxwellovy rovnice pro elektrostatické pole lze definovat skalární elektrický potenciál.

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0 \quad (1.1)$$

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi \quad (1.2)$$

Pro výpočet magnetického pole se využívá vektorový potenciál \mathbf{A} definovaný:

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A} \quad (1.3)$$

Dosazením (1.3) do Faradayova indukčního zákona pro nestacionární pole získáme:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\operatorname{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (1.4)$$

Dále upravíme:

$$\operatorname{rot} \cdot \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (1.5)$$

S využitím (1.2) lze upravit:

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\operatorname{grad} \varphi \quad (1.6)$$

Po úpravě získáváme závislost elektrické intenzity na potenciálech:

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (1.7)$$

S využitím materiálových konstant, rovnice (1.3) a vztahů $\mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E}$, $\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E}$ po dosazení do zákona celkového proudu získáme výslednou rovnici pro kvazistacionární, elektromagnetické pole:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{A} + \gamma \cdot \left(\operatorname{grad} \varphi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (1.8)$$

V tomto případě je výraz (1.8) roven vnučené proudové hustotě odpovídající proudu v induktoru. Dále pro $\mu = \text{konst.}$ můžeme provést zjednodušení rovnice (1.8) na tvar:

$$\operatorname{rot} (\operatorname{rot} \mathbf{A}) = \mu \cdot \mathbf{J} - \mu \gamma \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) \quad (1.9)$$

U spojitých modelů je zajištěna spojitost \mathbf{A} na rozhraní materiálů. Je však nutné definovat okrajové podmínky. Rozlišujeme dvě skupiny a to Dirichletovy podmínky a podmínky Neumannovy.

Dirichletova podmínka přiřazuje na okraji oblasti vektorovému potenciálu předem definovanou hodnotu nebo funkci. V případě vytvořené simulace jsem definoval na vnějším plášti pracovní komory studeného kelímku vektorový potenciál $\mathbf{A} = 0$. Dvouplášťová komora z nerezové oceli elektromagnetické pole dostatečně odstíní.

$$\mathbf{A}(\sigma, t) = \mathbf{A}_\sigma(\sigma, t) \quad (1.10)$$

\mathbf{A}_σ je zadaná hodnota magnetického vektorového potenciálu pro hranici σ .

Neumannova podmínka definuje hodnotu derivace vektorového potenciálu podle normály.

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial n}(\sigma, t) = a(\sigma, t) \quad (1.11)$$

a v (1.12) reprezentuje výslednou derivaci vektorového potenciálu [1]

1.1 Teorie teplotního pole

V simulaci je potřeba zohlednit tepelné působení na zařízení spouštěné do pracovní komory studeného kelímku. Příčinou tohoto tepelného působení je elektromagnetické pole vybuze­né induktorem, dále pak ztráty vzniklé sdílením tepla. Tzn. prouděním a především zářením z roztavené vsázky. Vířivé proudy ohřívají v tomto případě kalorimetr a vznikají Jouleovy ztráty, které v kapitole **6.2 Simulace působení elektromagnetického a teplotního pole** vyhodnocují.

Rozložení termodynamické teploty T lze popsat obecnou rovnicí:

$$-\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + \rho \cdot c \frac{dT}{dt} + \lambda \cdot \tau \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = Q_0 \quad (1.1.12)$$

Pro potřeby indukčních ohřevů lze tuto rovnici zjednodušit do tvaru:

$$-\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + \rho \cdot c \frac{dT}{dt} = w_j \quad (1.1.13)$$

V tomto zjednodušení jsem zanedbal derivaci druhého řádu s přihlédnutím k pomalým změnám teploty. Pro názornost je objemová hustota tepelné energie Q_0 nahrazena měrnými Jouleovými ztrátami. V tomto případě by bylo možné nahradit substanciální časovou derivaci teploty derivací parciální, jelikož zde z hlediska manipulátoru žádné teplo v důsledku pohybu nevzniká.

Obdobně jako u elektromagnetického pole definují důležité okrajové podmínky. Dirichletova a Neumannova okrajová podmínka pro termodynamickou teplotu je obdobná jako pro vektorový potenciál \mathbf{A} .

Podmínky na rozhraní pro teplotní pole respektují spojitost teploty (např. na rozhraní dvou materiálů).

Newtonova okrajová podmínka se využívá pro zohlednění sdílení tepla prouděním z pevného materiálu do tekutiny (voda vzduchu atd.).

$$-\lambda \frac{dT}{dn} = \alpha(T - T_{kap}) \quad (1.1.14)$$

Okrajová podmínka čtvrtého druhu respektuje Stefan-Boltzmannův zákon, tedy přestup tepla zářením. Pro materiály o velmi vysoké teplotě jsou tyto ztráty výrazné vlivem čtvrté mocniny termodynamických teplot. [1]

$$-\lambda \frac{dT}{dn} = \varepsilon \cdot c(T^4 - T_{ext}^4) \quad (1.1.15)$$

Nejčastěji je uvažováno sdílení tepla prouděním i sáláním, pak je tepelný tok tekoucí do okraje oblasti roven odvodu tepla prouděním a sáláním a hovoříme o smíšené okrajové podmínce. V některých případech nelze modelovat sdílení tepla prouděním pomocí koeficientu přestupu tepla prouděním, ale je potřeba použít metodu Computational Fluid Dynamics (CFD), např. při víření taveniny atd.

2 Aktuální stav manipulátorů v průmyslu

V současné době je trendem automatizace výroby a snížení nákladů na lidské zdroje v oblasti rutinních prací. Manipulátory pro indukční procesy se využívají pro automatické zavážení do strojů nebo odebrání žhavých výrobků. Roboty jsou schopny efektivně zastoupit člověka při manipulaci s těžkými nebo žhavými výrobky. Využit lze komerčně dostupné manipulátory např. od ABB nebo KUKA a další.

2.1 Průmyslové manipulátory a jejich řídicí systémy

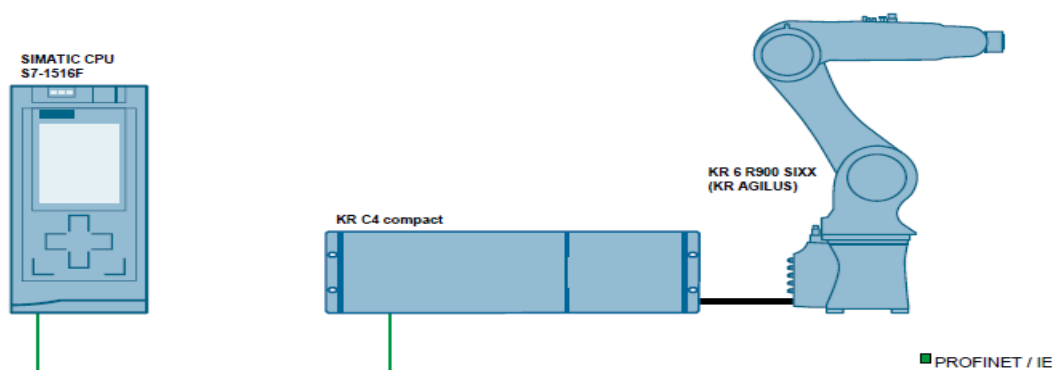
Aktuálně nejpoužívanější manipulátory v průmyslu jsou manipulátory s 6 stupni volnosti v prostoru. Příkladem je manipulátor KUKA KR 1000 titan. Jedná se o těžký průmyslový robot s nejvyšší nosností od firmy KUKA. Nosnost tohoto robotu dosahuje 1300 kg. Snadno manipuluje např. s těžkými motorovými bloky, ocelovými nosníky, betonovými prefabrikáty. Pracovní dosah robotu je 3600 mm. Celková hmotnost robotu dosahuje 4690 kg, a proto lze instalovat pouze na podlahu, některá lehčí provedení je možné instalovat na stěnu, strop nebo šikmou stěnu pro vhodné využití pracovního prostoru. [2]



Obrázek 1: Manipulátor KR 1000 titan [2]

Roboty KUKA lze řídit např. pomocí PLC SIMATIC od firmy Siemens. S využitím SIMATICU S7-1500 lze instalovat knihovnu KUKA.PLC mxAutomation block library a robota plnohodnotně naprogramovat. Knihovna obsahuje základní příklady ovládání robota nebo jednoduché manipulace Pick and Place. Hlavní Programmable Logic Controller (PLC) je propojen pomocí Profinetu s řídicí jednotkou robota KR C4. Případně může být do sítě Profinet připojeno HMI pro zobrazení aktuálního stavu, chybových hlášek a zadávání příkazů operátora. [9] Profinet je jedním z komunikačních protokolů využívaných pro přenos

dat po ethernetu. Dále se používá např. protokol Modbus TCP/IP nebo OPC-UA. Protokol Profinet nerozlišuje zařízení typu Master nebo Slave, ale veškerá zařízení jsou rovnocenná na shodné úrovni. V síti jsou zařízení rozlišena pomocí unikátní MAC adresy (Media Access Control). V síti Profinet se rozlišují tři základní typy zařízení: Profinet IO Device (PN IO-D), Profinet IO Controller (PN IO-C) a Profinet Supervisor (PN S). V tomto případě PN IO-D je robot KUKA. Profinet IO Controller (SIMATIC S7-1500) zajišťuje výměnu dat pomocí aplikační relace. Zařízení PN S uvádí síť do chodu a jednotlivým zařízením přiřazuje nastavená jména, která jsou srozumitelnější a snadněji lze identifikovat na rozdíl od MAC adres. V průmyslových sítích se většinou využívá liniová topologie. Mezi jednotlivými zařízením jsou tzv. přepínače, které se starají o přesměrování zpráv na správné porty. V případě, že na jednom portu jsou dvě zprávy současně, odešle nejprve jednu z nich dle nastavené důležitosti.[3]



Obrázek 2: Zapojení robotu do sítě Profinet [4]

Průmyslové roboty jsou většinou dodávány s kovovým pláštěm. Nabízí se otázka, zda v magnetickém poli indukčních strojů nedochází k ohřátí pláště robota vlivem vířivých proudů. Z technického a funkčního hlediska pravděpodobně nedochází k problémům, protože se běžně využívají v indukčních procesech neupravené roboty, jejichž kovový plášť je v tomto případě stíněním před elektromagnetickým polem. V případě vysokých expozicí elektromagnetickým polem by bylo možné kovový plášť robota chladit.



Obrázek 4: Manipulátor přemísťující hřídel [5]

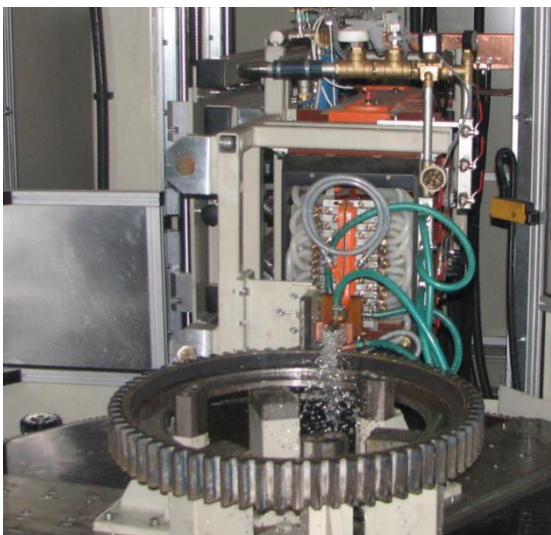


Obrázek 3: Model manipulátoru

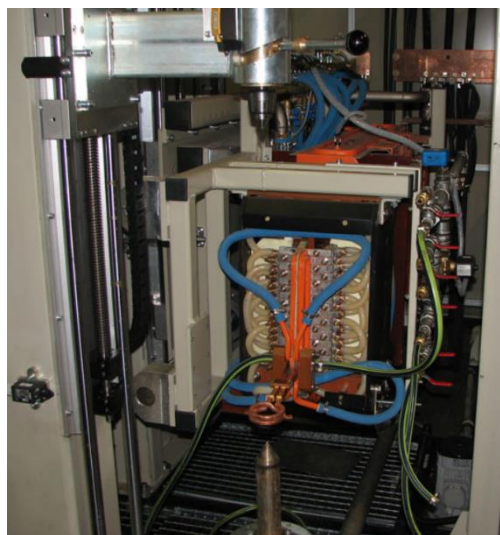
Jedním z řešení tohoto problému může být nahrazení kovového pláště robota nevodivým materiálem a snížení tak možnosti uzavírání magnetických toků, pokud je možné eliminovat přestup tepla vedením, i když vnitřní elektroinstalace a motory jsou v tomto případě vystaveny působení většího elektromagnetického pole. Na **obr. 3** je model manipulátoru vytištěného na 3D tiskárně z filamentu typu PETG, jehož teplotní odolnost je cca 80 °C. Manipulátor může být použit pro vkládání nebo vykládku z kalicího zařízení po zchlazení vsázky. Tento model se pohybuje pomocí 6 krokových motorů a jednoho servomotoru pro pohon uchopovacích čelistí. Robot disponuje 5 stupni volnosti. Pro přesné určení polohy manipulátoru jsou krokové motory vybaveny enkodéry, které lze využít při určení dráhy pohybu robota. Jejich monitorováním lze také omezit nechtěné kolize manipulátoru s okolím a v těchto případech manipulátor nouzově zastavit.

2.2 Manipulační systémy a podpůrná zařízení

Během indukčních procesů, např. kalení, jsou tyto systémy různě uzpůsobené s ohledem na parametry vsázky. Pro potřeby kalení je zapotřebí symetrické vsázky otáčet, pokud se mají zakalit po celém obvodu. Jedním z těchto systémů je upevnění přířezu, hřídele aj. mezi hroty, s kterými se otáčí potřebnou rychlostí **obr. 6**. Během procesu dochází k postupnému kalení a zároveň se posouvá vertikálně vsázka nebo induktor.



Obrázek 5: Kalení ozubeného kola [6]



Obrázek 6: Manipulační systém pro kalení válcových vsázek [6]

Příslušenství pro zakládání a třídění výrobků

Dalšími podpůrnými systémy jsou např. různé typy skluzavkových třídiček přířezů **obr. 8**, které nastaví obsluha před spuštěním procesu. Případně příslušnou skluzavkou propadne pouze požadovaný rozměr. Mezi další příslušenství patří vibrační zásobníky **obr. 7**. Hlavní částí je nádoba. Vlivem vibrací dochází k posunu kusových výrobků v nádobě až do

podavače. Vibrace jsou způsobeny elektromagnetem a jeho kotvou umístěnou na nádobě vibračního zásobníku.



Obrázek 8: Třídíčka přířezů [6]



Obrázek 7: Vibrační zásobník [6]

Ohříváč tyčí s kladkovým mechanismem

Tento ohříváč tyčí je instalován v prostorách ZČU v Plzni. Toto experimentální zařízení umožňuje nerovnoměrný ohřev tyčí do průměru 30 mm a délky 1500 mm, obsahuje dva indukctory napájené z oddělených zdrojů o celkovém výkonu 240 kW. Indukctory jsou libovolně rozmístitelné po celé délce. Tyče jsou posouvány pomocí kladek, jejichž otáčení zajišťují asynchronní motory. Tento indukční ohříváč tyčí je využíván k vývoji inkrementálního kování. [6]



Obrázek 9: Indukční ohříváč tyčí s kladkovým posunem [6]

3 Technologie studeného kelímku [7], [8]

Studený kelímek je zařízení umožňující tavbu elektricky vodivých nebo elektricky nevodivých materiálů. Výhodou studeného kelímku je, že nedochází k znečištění taveného materiálu na rozdíl od běžně využívaných pecí, kde může docházet k znečištění od jejich vyzdívek. V pracovní části studeného kelímku tzn. induktor a chladicí kolektory je udržována teplota cca 35 °C. Tavený materiál může dosahovat až 3000 °C.

Používají se dva základní typy studených kelímků. Segmentový studený kelímek je tvořen oddělenými segmenty chlazenými vodou. V tomto případě induktor nepřichází do kontaktu se vsázkou. Segmentový studený kelímek se využívá převážně pro tavbu oxidů kovů např. Al_2O_3 . Druhým typem je studený kelímek s integrovaným induktorem. Tento typ studeného kelímku je náročnější na provoz. V tomto případě je induktor tvořen měděnými pásy, ve kterých je pomocí elektromagnetické indukce ohříván materiál. V průběhu tavby by nemělo dojít ke kontaktu vsázky a přívodů k induktoru, aby nedošlo k nežádoucímu zkratu.

Jedním z těchto zařízení je i HFG160 **obr. 10** nacházející se ve Vědecko-technickém parku v Plzni. Laboratoř je vybavena několika hlavními komponenty. Komora studeného kelímku, rozvodné skříně s elektrickým zařízením a vysokofrekvenčním měničem kmitočtu, ovládací panel, chladicí a odvětrávací systém.



Obrázek 10: Laboratoř studeného kelímku [7]

Frekvenční měnič

Nejdůležitějším prvkem tohoto systému je frekvenční měnič. Pro tavení oxidů kovů se využívají IGBT tranzistory pro nižší frekvence v řádech kHz. Pro vyšší frekvence a výkony se obvykle používají triody. Pracovní napětí meziobvodu měniče se pohybuje 0,5 – 10 kV a měnič může dodávat jmenovitý výkon až 160 kW.

Komora studeného kelímku

V pracovní komoře je umístěn studený kelímek. Komora je vyrobena ze dvou vrstev nerezových plátů, mezi nimi cirkuluje chladicí voda. Komora studeného kelímku plní několik funkcí. Především je to ochrana personálu proti působení magnetických polí a vzniklému teplu během tavby, případně nežádoucím únikům taveniny. Teplo z komory studeného kelímku, ale i z induktoru a měniče je kontinuálně odváděno do statických nerezových nádrží s dostatečnou kapacitou chladicí vody. Z komory jsou dále odváděny výpary pomocí vzduchotechniky. Případně lze vytvořit ochranou atmosféru pro tavení



materiálu interagujících s kyslíkem. V komoře je umístěno několik průzorů z ochranného skla odolávajícího vysokým teplotám. V horní části komory je i otvor pro doplňování vsázky do studeného kelímku během tavby. Na tento otvor lze připevnit vytvořený manipulátor a pracovat s měřicím zařízením v komoře.

Obrázek 11: Komora studeného kelímku [8]

Řídicí systém

Tento složitý systém je samozřejmě nutné řídit. Řízení zajišťuje průmyslové PLC Simatic.

Ovládací panel je zavěšen na konzoli pro snadnou dostupnost. V ovládacím panelu jsou



analogové prvky, tedy tlačítka, ale i přehledný dotykový displej pro zobrazení parametrů např. teploty, průtoků... Veškerá naměřená data se ukládají na externí USB disk. Po skončení experimentu lze tato data vyhodnotit v PC případně vyhodnotit i kamerový záznam z laboratoře.

Obrázek 12: Ovládací panel [8]

4 Řízení krokových motorů

Krokový motor je synchronní stroj s reluktančním momentem. Hlavní částí krokového motoru je satorové vinutí v bipolárním nebo unipolárním provedení. Na hřídeli jsou nalisovány pólové nástavce obsahujícími permanentní magnety. Mezi další části patří ocelová kostra satoru, hřídel, případně enkodér pro monitorování skutečného natočení rotoru.

4.1 Způsob zapojení satorového vinutí

Unipolární zapojení vinutí

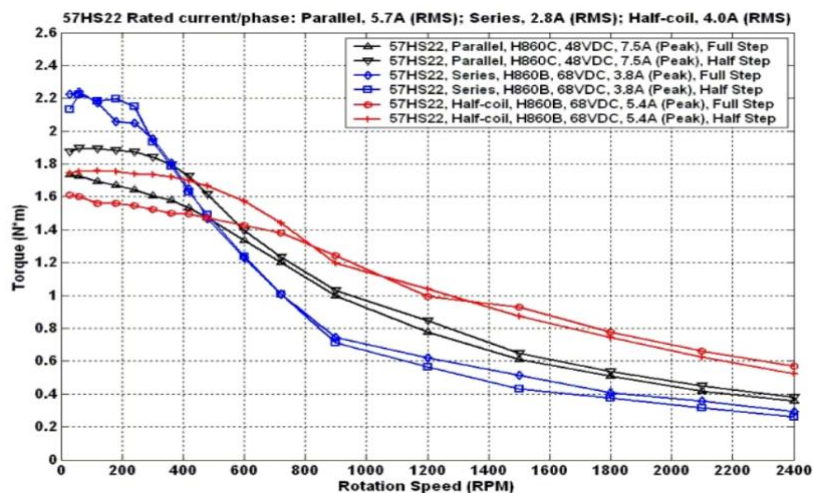
Při unipolárním zapojení je vinutí tvořeno dvěma cívkami s vyvedeným středem. Změna natočení rotoru je způsobena přivedením napětí na příslušnou polovinu vinutí. Unipolární krokový motor je snadno identifikovatelný pomocí šesti napájecích vodičů.

Bipolární zapojení vinutí

Bipolární krokový motor nemá vyvedený střed vinutí. Změna otáčení rotoru je způsobena přepólováním příslušného vinutí. Bipolární krokový motor je napájen pomocí čtyř vodičů. Na rozdíl od unipolárního zapojení protéká proud celou cívkou. Motor dosahuje vyššího momentu.

Sériové zapojení vinutí

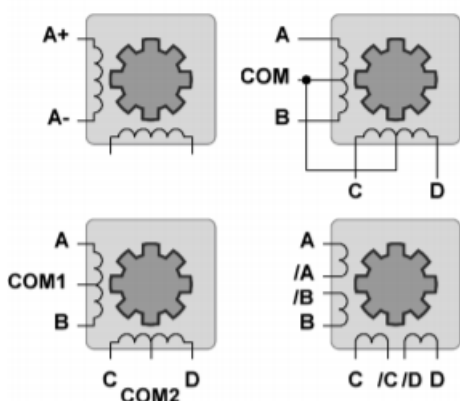
Při sériovém zapojení vinutí je omezen proud motoru vlivem odporu a indukčnosti satorových vinutí. Je také omezeno zahřívání motoru. Vlivem vyšší indukčnosti dochází ve vyšších otáčkách ke snížení momentu motoru. Tedy nedochází k dostatečně rychlým změnám směru toku proudu vinutím vlivem časových konstant.



Obrázek 13: Průběhy momentů krokového motoru [9]

Paralelní zapojení vinutí

Paralelně zapojeným vinutím krokového motoru protékají vyšší proudy oproti sériovému zapojení. Motor v nízkých otáčkách dosahuje mírně nižšího momentu, avšak moment udržuje stabilní větší rozsah rychlostí.



Tabulka 1: Zapojení vinutí

Počet vodičů	Typ zapojení
4	Bipolární
5	Unipolární
6	Unipolární nebo Bipolární
8	Unipolární nebo Bipolární

Obrázek 14: Zapojení statorového vinutí [10]

4.2 Princip řízení krokových motorů

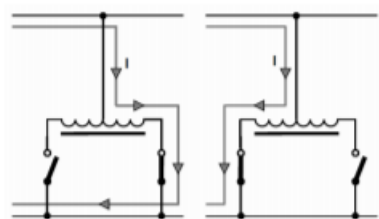
Krokový motor je řízen stejnosměrným pulzním napětím, které generuje driver motoru. Driver motoru vytváří obdélníkový signál o amplitudě napájecího napětí. Podle signálu z řídicího PLC 5 V. Dle požadovaného směru otáčení driver spíná pomocí polovodičových prvků příslušné statorové cívky. O plynulosti chodu krokového motoru a minimálním otočením hřídele vypovídá úhel $\alpha = \frac{360}{steps}$ (4.2.16), neboli počet kroků na jednu otáčku motoru. V současnosti se na trhu vyskytují bipolární krokové motory dvojfázové o $\alpha = 1,8^\circ$, nebo trojfázové krokové motory o $\alpha = 1,2^\circ$. Úhlu $\alpha = 1,8^\circ$ odpovídá 200 kroků na jednu otáčku rotoru. Na příslušném driveru lze nastavit tzv. mikrokrokování, kdy základní krok je rozdělen na menší kroky. Motor poté potřebuje na jednu otáčku rotoru např. 400, 1600, 3200 ... kroků. Mikrokrokování snižuje vibrace motoru a jeho chod je plynulejší, ale dochází ke snížení krouticího momentu motoru. Driver motoru omezuje proud procházející vinutím motoru. Proud je nutné nastavit dle pokynů výrobce, jinak by mohlo dojít k nežádoucímu přehřívání, případně poškození statorového vinutí. Pro udržení momentu motoru je motor napájen i v klidovém stavu. Tím se značně zvětšuje oteplení statorového vinutí, tedy ztráty.

4.3 Řídicí obvody krokových motorů [10]

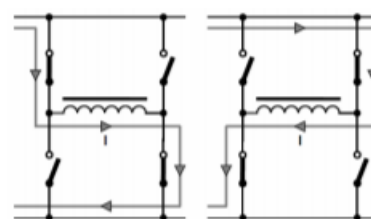
Spínáním polovodičových prvků v řídicím obvodu krokového motoru (driveru), dochází ke změně směru toku proudu statorovým vinutím. Tedy i ke změně magnetického pole buzeného tímto vinutím. Pro pootočení hřídele o jeden krok (tedy o úhel dle 4.2.16) musí dojít ke změně toku proudu v statorovém vinutí, při této změně se rotor pootočí do polohy s nejmenším magnetickým odporem vůči pólovým nástavcům statoru. Podle způsobu zapojení vinutí v kapitole 4.1 Způsob zapojení statorového vinutí existují různé způsoby řízení.

Unipolární řízení

Unipolární vinutí jedné fáze je rozděleno na dvě poloviny. Změna toku vybuzeného tímto vinutím je způsobena sepnutím příslušného polovodiče např. IGBT tranzistoru viz obr. 16. Cyklickým spínáním polovodičů v požadované frekvenci dochází k otáčení rotoru. Řídicí obvod pro toto zapojení je levnější, protože na jednu fázi potřebujeme pouze dva spínací prvky.



Obrázek 16: Unipolární řízení [10]



Obrázek 15: Bipolární řízení [10]

Bipolární řízení

Změna toku proudu, tedy změna vybuzeného magnetického toku, je docílena sepnutím příslušné dvojice polovodičů. V tomto případě proud protéká celým statorovým vinutím. Jedná se o tzv. můstkové zapojení neboli H zapojení. Oproti unipolárnímu řízení potřebujeme k změně toku v jedné fázi 4 spínací prvky.

5 Úvod do prostředí LabVIEW

Prostředí LabVIEW vzniklo díky vývoji firmy National Instruments. Tuto společnost založila trojice výzkumníků spolupracujících na přípravě sonaru pro americké námořnictvo na Univerzitě v Texasu v roce 1976. Hlavním iniciátorem myšlenky virtuální instrumentace byl James Truchard, který na systému LabVIEW začal pracovat v roce 1983. První komerční verze LabWindows Version 1.0 for DOS byla vydána již v roce 1987.

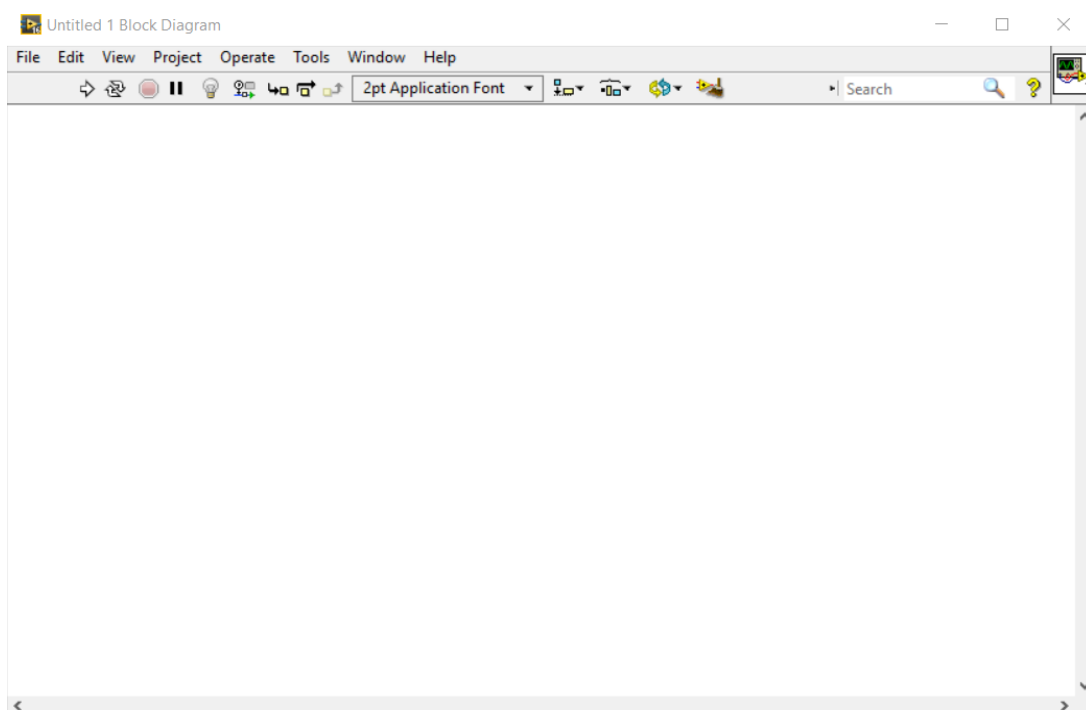
LabVIEW je zkratkou ze sousloví Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench. V názvu systému, ale i v příponách zdrojových souborů, nalezneme zkratku VI (Virtual Instrument), která je hlavní myšlenkou celého systému. Vytvořením virtuálního měřicího přístroje se šetří náklady, čas na vývoj a především úpravu těchto systémů, což je u skutečného hardwaru obtížnější. K reálnému měření a zpracování dat pomocí vytvořeného virtuálního přístroje je zapotřebí měřicí karta DAQ připojitelná přímo do PC pomocí USB, nebo lze využít sofistikovaný hardware pro potřeby LabVIEW např. CompactRIO. [11]

Další předností tohoto systému je objektové programování, jehož výhody chtěli využít i zakladatelé tohoto systému. V LabVIEW programátor pracuje s definovanými bloky, jejichž funkce a parametry jsou přehledně popsány v nápovědě systému. Jednotlivé bloky se spojují pomocí datových vodičů (Wires), jejichž různá barva naznačuje odlišný datový typ. Uživatelé LabVIEW se nemusí učit syntaxi na rozdíl od textových programovacích jazyků. Tato skutečnost snižuje časovou náročnost na vývoj algoritmu.

5.1 Seznámení s LabVIEW

Blokový diagram

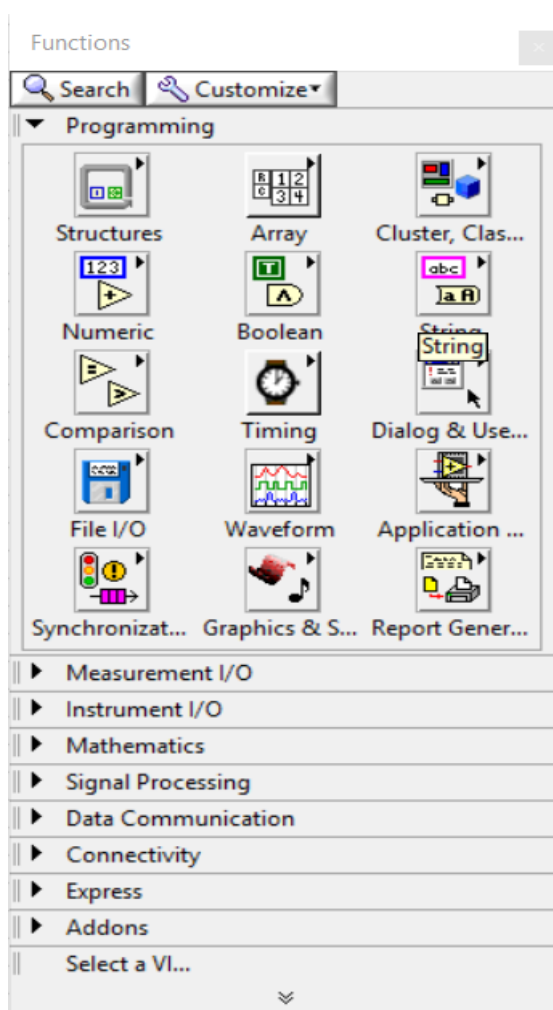
Blokový diagram je jedna z částí vytvořeného VI. V tomto okně vytváří programátor požadovaný algoritmus. Pracuje zde s jednotlivými bloky, které je nutné rozmístit s ohledem na přehlednost a tok dat tzv. Data Flow. Pro zvýšení přehlednosti lze vytvořit tzv. SubVI,



Obrázek 17: Blokový diagram

tedy podprogram, v kterém je určitá část programu s definovanou funkcí. Rozsáhlé aplikace lze sdružovat do projektů včetně příslušného hardwaru.

V horní liště blokového diagramu **obr. 17** nalezneme ikony pro ovládání běhu programu. Jednoduchou šipkou, tlačítkem Run, se spouští jeden běh programu, pokud neobsahuje nekonečnou smyčku While. Šipky v kruhu (Run Continuously) jsou v podstatě nahrazení kontinuálního běhu programu. Červené tlačítko (Abort Execution) ukončí běh programu. Nalezneme zde i ikony pro ověření správnosti funkce programu tzv. Debugging, které jsou reprezentovány žárovkou a sondou (Probe). Pomocí sondy lze sledovat aktuální hodnotu v příslušném datovém vodiči. Dále v horní liště jsou umístěny ikony pro změnu a úpravu formátu textu nebo pro zobrazení nápovědy při ověření funkce bloku. Po stisknutí pravého tlačítka myši lze zobrazit paletu funkcí **obr. 18**, která obsahuje potřebné části programu, respektive blokového diagramu. Pod možností Structures nalezneme programátor základní

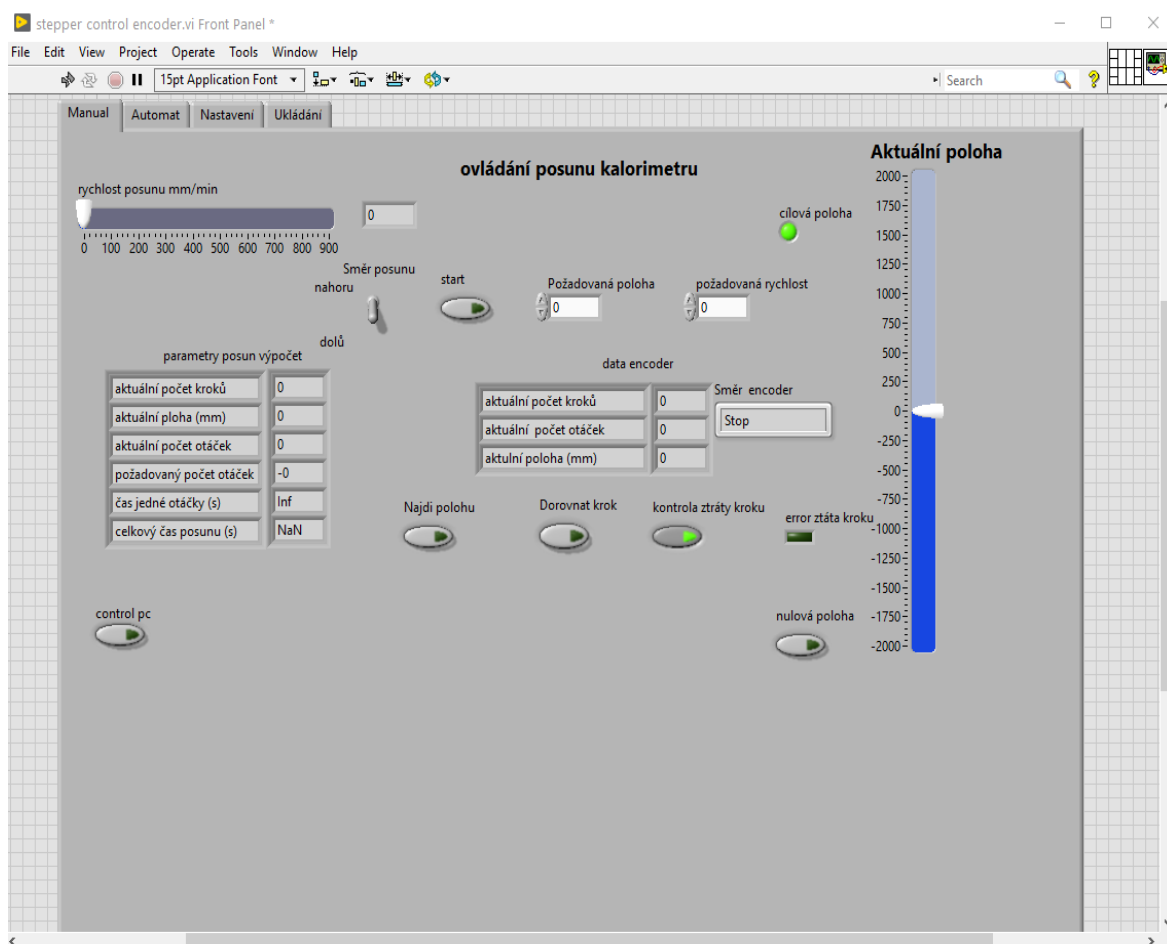


Obrázek 18: Nabídka Functions

cykly viz kapitola **5.4 Základní struktury** [14]. Poté následují bloky pro práci s maticemi. Pomocí příslušných bloků lze zjistit velikost pole, vkládat řádky nebo sloupce, provádět sloučení matic, případně jejich inverzi. Dalším důležitým blokem je Numeric, který obsahuje běžné matematické operace, ale i zaokrouhlování nebo převody datových formátů. Zmíním poslední neméně důležitý blok a to blok Boolean. Bez Booleovské algebry se neobejdeme při vyhodnocování podmínek a logických signálů. Tento blok obsahuje logické operátory jako: and, or, xor, nor nebo negaci. V mé aplikaci využívám právě Booleovskou logiku pro vytvoření řídicího signálu o příslušné frekvenci, který zpracovává driver krokového motoru a převádí řídicí signál 5V na napět'ovou hladinu 24V DC pro běh motoru.

Čelní panel aplikace

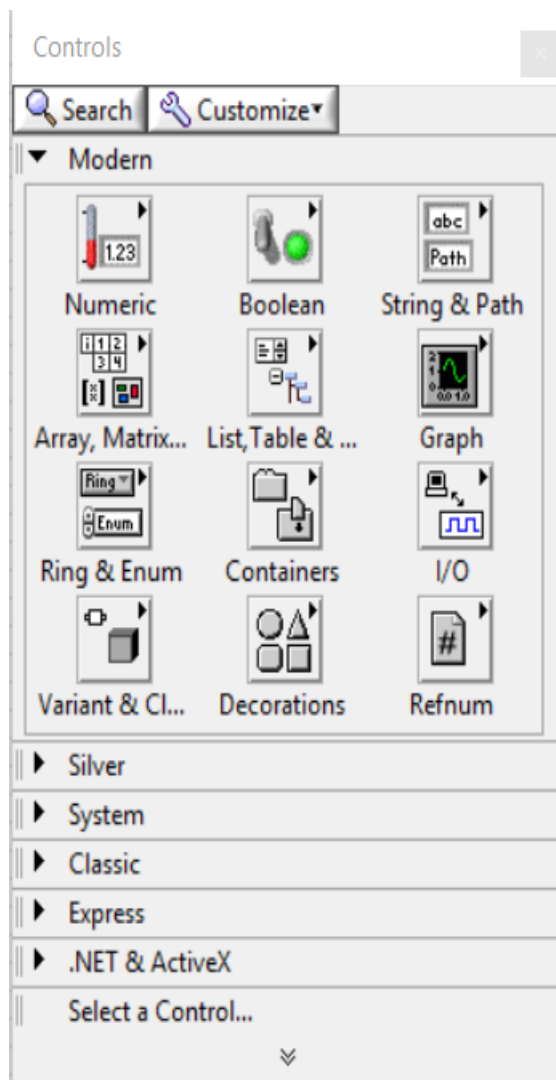
Druhou částí VI je čelní panel tzv. Front Panel, který zobrazuje výslednou podobu virtuálního přístroje. Zde uživatel ovládá systém a zadává parametry. Pomocí akčních členů tzv. Controls. Data jsou poté zpracována programem v blokovém diagramu a jsou předávána uživateli pomocí zobrazovačů tzv. Indicators.



Obrázek 19: Front Panel virtuálního přístroje

V horní liště čelního panelu jsou obdobné ovládací ikony jako v blokovém diagramu. Do Front panelu lze z palety Controls vkládat příslušné ovládací prvky viz **obr. 20**. V paletě Controls lze měnit styl akčních členů. Akční členy mohou být v podobě sliderů, bar zobrazovačů, tlačítek a podobně. Ve Front Panelu lze pohodlně rozmístit a graficky upravit jednotlivé prvky. Na **obr. 19** vidíme ukázkou čelního panelu virtuálního přístroje pro ovládání krokových motorů. Uživatel potřebuje ovládat směr posunu dále rychlost posunu a požadovanou dráhu. V čelním panelu je dále indikován stav systému a aktuální poloha. Dále je zde uživateli signalizován dojezd do požadované polohy nebo chybový stav pomocí kontrolky napodobujících LED. Vidíme zde i doplňující informace umístěné v tabulkách,

kde je možné dohledat vypočtený čas jedné otáčky, celkový čas posunu nebo aktuální počet kroků odečtených z enkodéru. Pomocí tzv. Push Button lze spustit posun, zapnout kalibraci systému, nastavit základní pozici. V ostatních záložkách lze nastavit např. ukládání dat během procesu na USB disk.



Obrázek 20: Paleta Controls

5.2 Datové typy

Datový typ Numeric je číselný formát dat. Rozlišujeme několik typů celočíselné hodnoty (Integer, Unsigned Integer), dále pak neceločíselný formát (Floating-point). Programátor může zvolit vhodný formát s ohledem na přesnost, tedy i s ohledem na potřebnou velikost paměti. Celočíselný formát je Integer: I64, I32, I16, I8 dále pak neznaménkový typ U64, U32, U16, U8. V tomto případě číslo reprezentuje velikost v paměti 64, 32, 16, 8 bitů. Mezi neceločíselné formáty patří double, Fixed-point a další. Rozdíl mezi jednotlivými datovými typy je patrný na první pohled pomocí odlišné barvy jednotlivých bloků a propojovacích cest.

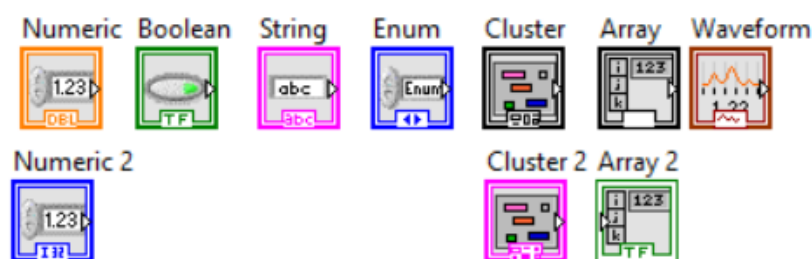
Datový typ Boolean je v prostředí LabVIEW označen zelenou barvou **obr. 21**. Přenášená data mohou být logická 1 (True) nebo logická 0 (False). Boolean logika se využívá především jako výstup různých podmínek např. rovno, větší, menší apod.

Datový typ String přenáší textový řetězec nebo pouze konstantu, tedy jeden znak. V paletě Functions v bloku String lze nalézt různé prvky pro práci s tímto datovým typem. Od vyhledávání v textovém řetězci, po rozlišování velikosti písmen nebo rozpoznávání pomocí ascii kódu.

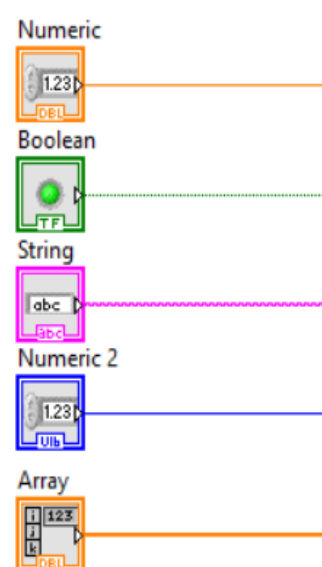
Datový typ Enum umožňuje k textu přiřadit číslo. Numerickou reprezentaci lze poté lépe a rychleji vyhodnocovat, nebo pracovat s číselným voličem např. Knob.

Datový typ Array může obsahovat různé datové typy obdobně jako datový typ Cluster. Pro oba datové typy existují různé funkce a odlišně se s nimi pracuje. Zeleně zbarvený blok Array signalizuje, že je naplněn hodnotami typu Boolean. Datové vodiče přenášející pole jsou reprezentovány větší šířkou na rozdíl od vodičů přenášejících skalární hodnoty **obr. 22**.

Datový typ Waveform obsahuje data včetně časové značky, tedy jednotlivým datům je přiřazeno určité Δt . Tato data lze zobrazit ve Waveform Chart nebo Waveform Graph. Tyto dva grafy se odlišují rozdílným zpracováním dat. Waveform Graph zobrazuje aktuální data ve zvoleném časovém úseku. Waveform Chart zobrazuje data včetně historie do naplnění paměti.[13]



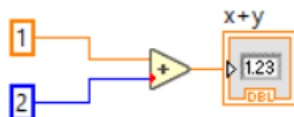
Obrázek 21: Reprezentace datových typů bloky



Obrázek 22: Reprezentace datových typů spojovacích cest

Korekce datových typů

Pokud programátor připojí nesprávný datový typ na daný terminál, dojde k automatické opravě pomocí tzv. Coercion Dot **obr. 23**. Druhou možností je úplná nekompatibilita, poté dojde k vyhodnocení chyby a přerušení datové cesty. Coercion Dot upozorňuje programátora na potenciální problém, protože automatické sjednocení datového typu může způsobit např. zaokrouhlení. Dále během procesu dochází ke zpomalení běhu programu, které může být pro některé aplikace nežádoucí.

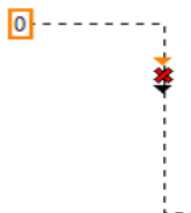


Obrázek 23: Coercion Dot

5.3 Principy přenosu dat v LabVIEW [12]

1. Datová cesta (Wire)

Data v blokovém diagramu lze přenášet pomocí datové cesty (Wire). Tok dat v tomto případě probíhá z levé strany blokové diagramu do pravé. Toto neplatí, pokud programátor použije tzv. Feedback Node, který slouží k zavedení zpětné vazby, tedy získání dat z předchozí iterace. Jednotlivé vodiče jsou rozlišeny podle datových typů. V případě nekompatibilního datového typu nebo nedokončeného spoje vznikne chybný spoj **obr. 24**.



Obrázek 24: Nedokončený spoj
(chybný spoj)

2. Lokální proměnné (Local Variable)

Pro příslušné akční členy nebo indikátory lze vytvořit lokální proměnné. Lokální proměnná je „bezdrátově přenášena“ v blokovém diagramu jednoho VI. Lokální proměnné lze především využít pro přenos dat mezi jednotlivými cykly, protože výstup z cyklu je tzv. datový tunel, který vypíše hodnotu z poslední iterace v závislosti na jeho nastavení. Pomocí lokální proměnné lze získat hodnoty aktuální v čase. Problémem lokálních i globálních proměnných je nejednoznačnost toku dat, pokud do jednoho indikátoru nebo akčního členu zapisuje více proměnných.

3. Globální proměnné (Global Variable)

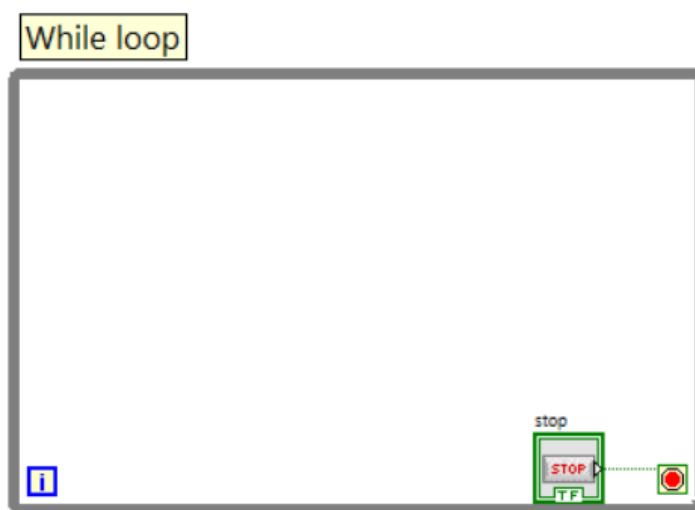
Pro přenos dat mezi více VI se využívají globální proměnné, které pracují na shodném principu s lokálními proměnnými, tedy „bezdrátovém přenosu“ dat. V projektu obsahujícím příslušné VI je nutné vytvořit řídicí VI pro správu globálních proměnných.

5.4 Základní struktury [14]

Pojem struktura může být pro některé programátory zavádějící. V běžně používaných programovacích jazycích struktura představuje seskupení dat s odlišnými datovými formáty. V prostředí LabVIEW je struktura synonymem pro cyklus.

While cyklus (While Loop)

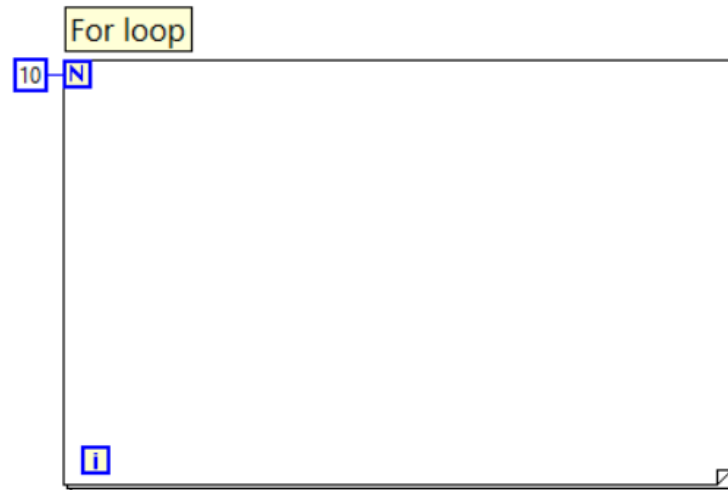
Jednotlivé cykly (struktury) jsou znázorněny v LabVIEW pomocí rámců (Frame), do kterých programátor vkládá příslušné bloky. While smyčka proběhne nejméně jednou v závislosti na hodnotě zapsané do podmínkového terminálu vpravo dole **obr. 25**. Pokud je na tento terminál připojena konstanta False, jedná se o nekonečnou While smyčku.



Obrázek 25: Cyklus While

For cyklus (For Loop)

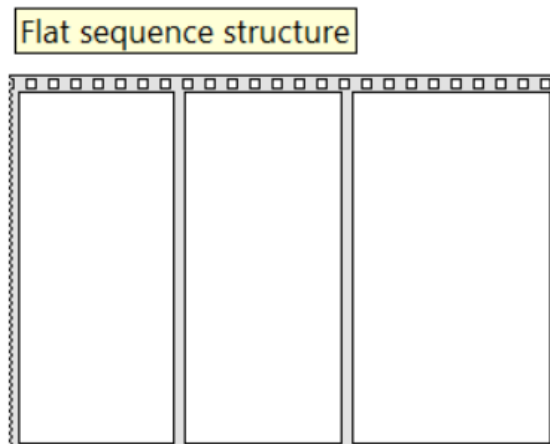
Počet iterací cyklu For není závislý na podmínce, ale na konstantě připojené k terminálu N. Případně na počtu prvků matice připojené do tohoto cyklu pomocí datového tunelu v nastavení Indexing. Cyklus For se používá především pro práci s maticemi. A to k vytvoření 1D pole nebo s dvěma vnořenými For cykly k vytvoření 2D pole dat.



Obrázek 26: Cyklus For

Sekvenční struktura (Flat Sequence)

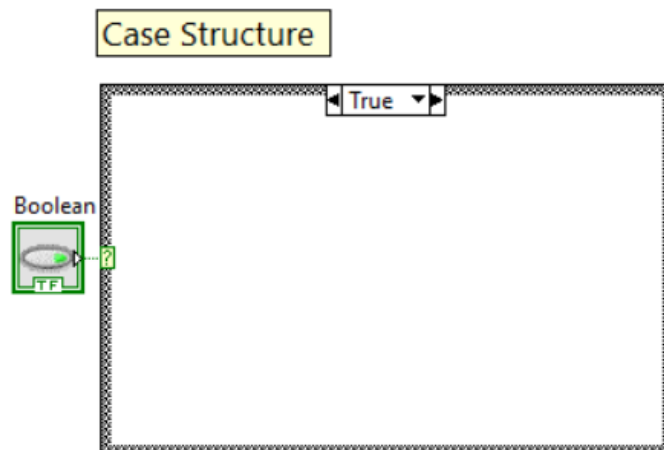
Tato struktura slouží k zajištění posloupnosti běhu kódu. Jednotlivé rámce jsou řazeny tak, jak bude probíhat kód, tedy zleva doprava. Obdobou Flat sekvence je Stacked sekvence jejíž rámce se překrývají, jsou na sobě.



Obrázek 27: Flat Sequence

Case Struktura (Case Structure)

Tato struktura slouží k větvení programu v závislosti na připojené hodnotě k podmínkovému terminálu. Strukturu Case lze přirovnat ke Switchi nebo podmínce If-else v jazyce C. Jednotlivé rámce jsou opět na sobě. Vykonává se rámec odpovídající právě hodnotě v podmínkovém terminálu, do kterého lze připojit Boolean hodnoty nebo i číselná data, datový typ Enum... Využití Case struktury je např. ve stavovém automatu a dalších aplikacích.



Obrázek 28: Case Structure

6 Návrh manipulátoru

6.1 Strojní část manipulátoru

Vytvořený manipulátor je určen pro instalaci na komoru studeného kelímku. Jeho účelem je zasouvání zařízení a různých měřicích systémů do komory z vrchu. Manipulátor se skládá ze tří hlavních částí: nosný rám, hlavní rozvaděč, ovládací panel. Posun zprostředkovává 3f krokový motor s točivým momentem 2 Nm. Krokový motor je vybaven inkrementálním optickým enkodérem s rozlišením 1000 impulzů na jednu otáčku motoru.

Nosný rám

Tuto část manipulátoru navrhli a vyrobili v Centru výzkumu Řež. Rám je složen z několika částí. Byl vyroben robustně pro zajištění spolehlivé funkce a možnosti upevnění i těžších zařízení. Části manipulátoru viz **Příloha B**.

1. Příruba
2. Kuličkový šroub s maticí
3. Vodící tyče
4. Držák motoru
5. Držáky pro upevnění koncových spínačů
6. Základna

6.2 Simulace působení elektromagnetického a teplotního pole

Pro orientační zhodnocení vlivu elektromagnetického pole vybuzeného induktorem na kalorimetr a konstrukci manipulátoru jsem provedl několik simulací v softwaru Ansys Electronic Desktop, konkrétně elektromagnetické pole jsem řešil pomocí Ansys Maxwellu.

Vytvořený model se skládá ze studeného kelímku s 18 segmenty, induktoru, kalorimetru a stínící komory z nerezové oceli. Na vnější okraj pracovní komory jsem vložil okrajovou podmínku nulové hodnoty vektorového potenciálu \mathbf{A} , která koresponduje s vlastnostmi nerezů.



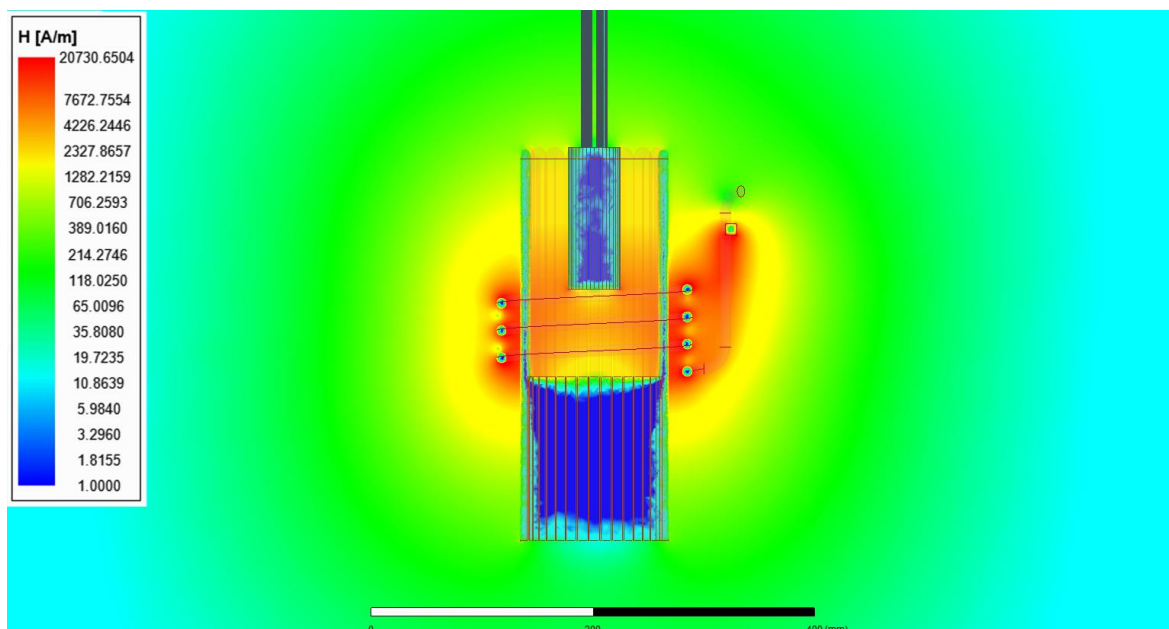
Obrázek 29: Model studeného kelímku včetně kalorimetru

V tomto případě jsem simuloval nejhorší možný stav, tedy ustálený stav bez funkčního chlazení kalorimetru. Nefunkční chlazení by způsobilo ztrátu požadovaných dat a nechtěný ohřev kalorimetru na vysokou teplotu. Simulace při frekvenci 1,7 MHz byla poměrně časově náročná z důvodu požadavků na kvalitu meshe. Výpočet ztrát probíhal při nastaveném proudu 380 A. Pomocí optometrického výpočtu jsem vyhodnocoval ztráty pro různou polohu kalorimetru od dna studeného kelímku, výpočet probíhal 8 dnů a 7 h.

Tabulka 2: Jouleovy ztráty a teplota kalorimetru v ustáleném stavu

vzdálenost (mm)	ztráty kalorimetr naměřené (W)	ztráty kalorimetr výpočet (W)	prům. teplota kalorimetr bez chlazení (°C)
10	-	1683,27	922,54
80	600	644,51	793,04
150	-	64,14	218,56
220	-	7,68	53,06
290	-	1,54	28,84
360	-	0,44	22,45
430	-	0,13	20,38
500	-	0,07	20,35
570	-	0,04	20,16
640	-	0,02	20,08

V **Tab. 2** jsou uvedeny ztráty v závislosti na poloze kalorimetru od dna studeného kelímku. Ztráty vzniklé vířivými proudy ohřívají kalorimetr v ustáleném stavu na průměrnou teplotu uvedenou také v této tabulce. Po srovnání reálně naměřených dat se simulací, lze tento model považovat za srovnatelný s realitou, protože naměřené ztráty v poloze kalorimetru cca 80 mm nad dnem studeného kelímku byly 600 W.



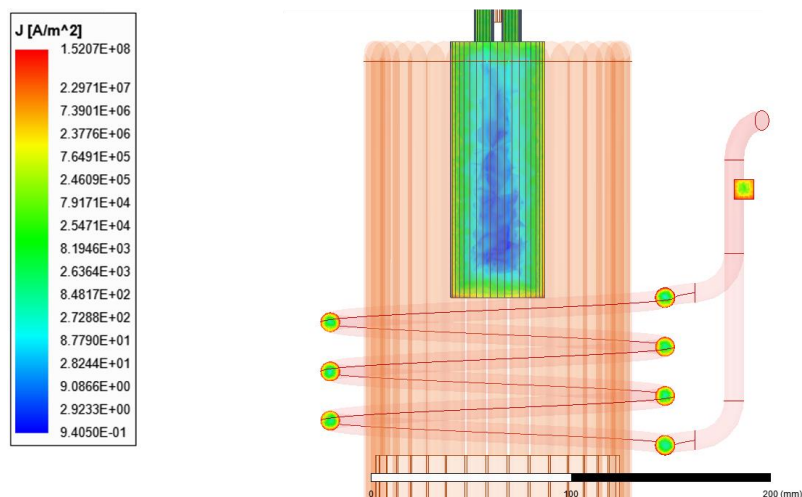
Obrázek 30: Detail rozložení intenzity elektromagnetického pole

Ze získaných dat i obrázků v **příloze D** lze stanovit, že nedochází k ovlivnění manipulátoru vně komory vlivem elektromagnetického pole. Ohřívá se pouze část zasunutá do pracovní komory, navíc teplota kalorimetru s chlazením při působení elektromagnetického pole bude výrazně nižší.

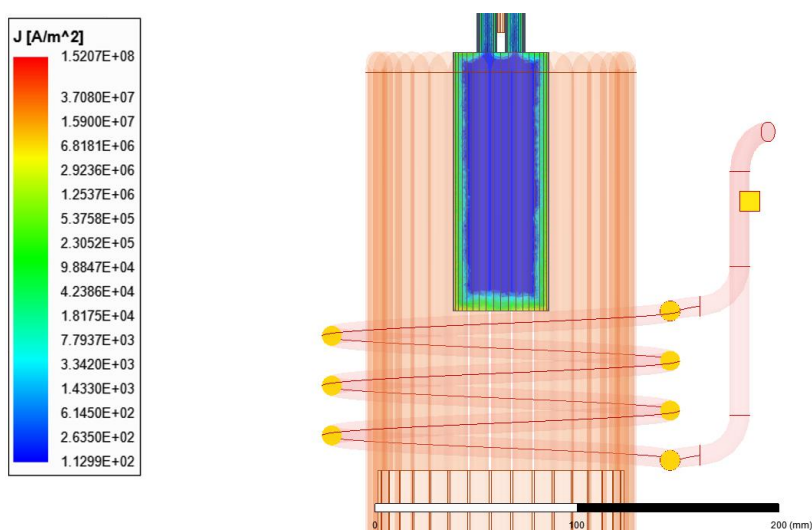
Během výpočtů jsem se pokoušel zhodnotit vliv nastavení induktoru jako plný vodič nebo vodič svazkový. Ukázalo se, že při uvažování svazkového vodiče se doba výpočtu mírně sníží vlivem zanedbání skin efektu cca o 3 hodiny. Vliv na výsledné ztráty použitím zjednodušení svazkovým vodičem se neprojevil.

Tabulka 3: Jouleovy ztráty v kalorimetru poloha 80 mm

nastavení induktoru	výpočet povrchového jevu	ztráty v kalorimetru (W)
plný vodič	kalorimetr	644,51
svazkový vodič	kalorimetr	645,21
plný vodič	kalorimetr + induktor	648,08
svazkový vodič	kalorimetr + induktor	644,7

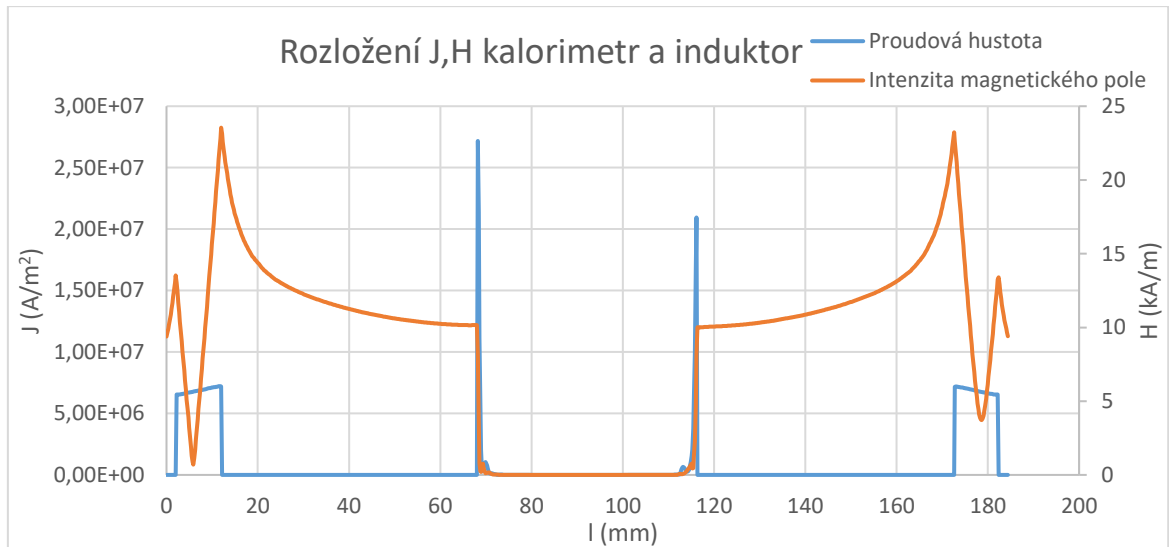


Obrázek 31: Rozložení proudové hustoty nastavení induktoru plný vodič

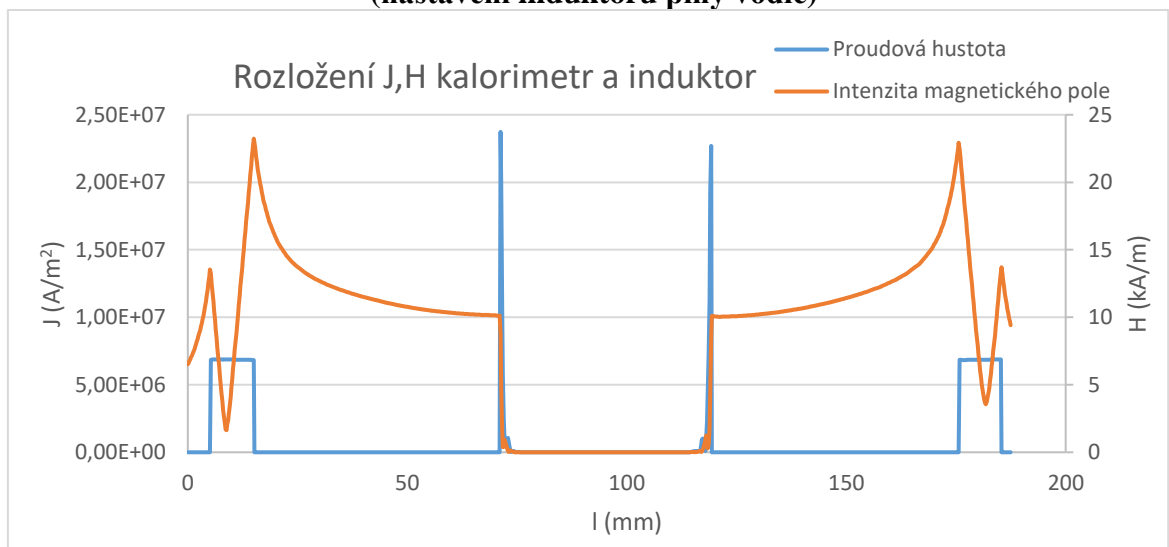


Obrázek 32: Rozložení proudové hustoty nastavení induktoru svazkový vodič

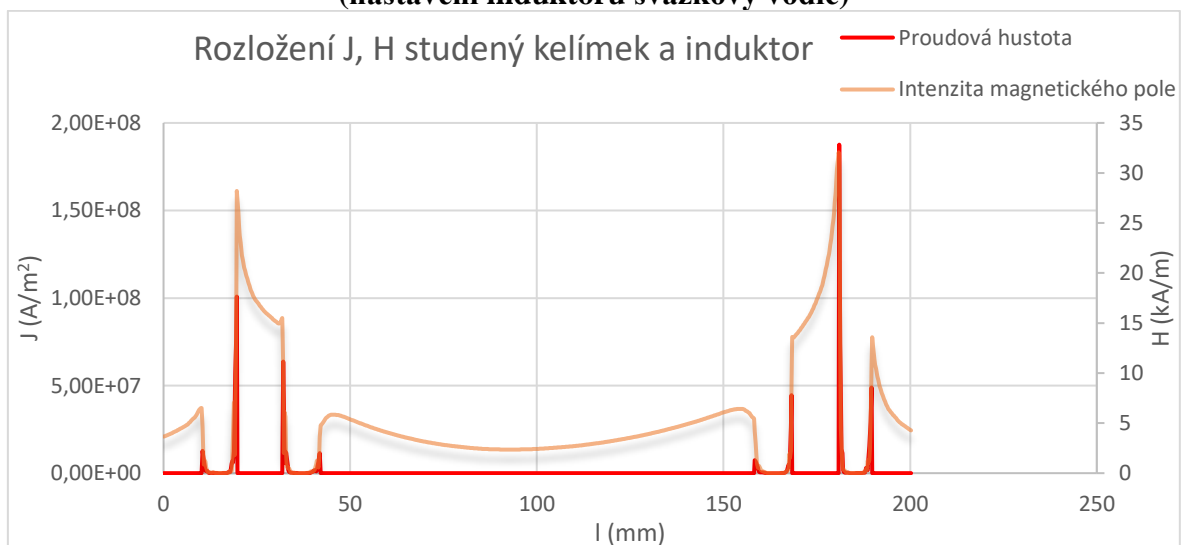
V **grafu 1** je rozložení proudové hustoty a intenzity magnetického pole v kalorimetru a induktoru. Induktor byl nastaven jako plný vodič bez uvažování povrchového jevu. Z grafu lze vypožorovat zvýšení proudové hustoty na vnitřní straně induktoru způsobené nejnižší odporovou dráhou. V druhém případě **grafu 2** je opět rozložení proudové hustoty a intenzity magnetického pole v kalorimetru a induktoru. Induktor byl nastaven jako svazkový vodič bez uvažování povrchového jevu. V tomto grafu je rozložení proudové hustoty v induktoru rovnoměrné. V **grafu 3** je rozložení proudové hustoty a intenzity magnetického pole v studeném kelímku a induktoru v nastavení plný vodič s uvažováním povrchového jevu ve studeném kelímku i induktoru. Opět lze pozorovat zvýšení proudové hustoty na vnitřní straně induktoru. Naopak ve studeném kelímku je zvýšená naindukovaná proudová hustota na jeho vnější straně.



**Graf 1: Rozložení J,H v kalorimetru a induktoru
(nastavení induktoru plný vodič)**



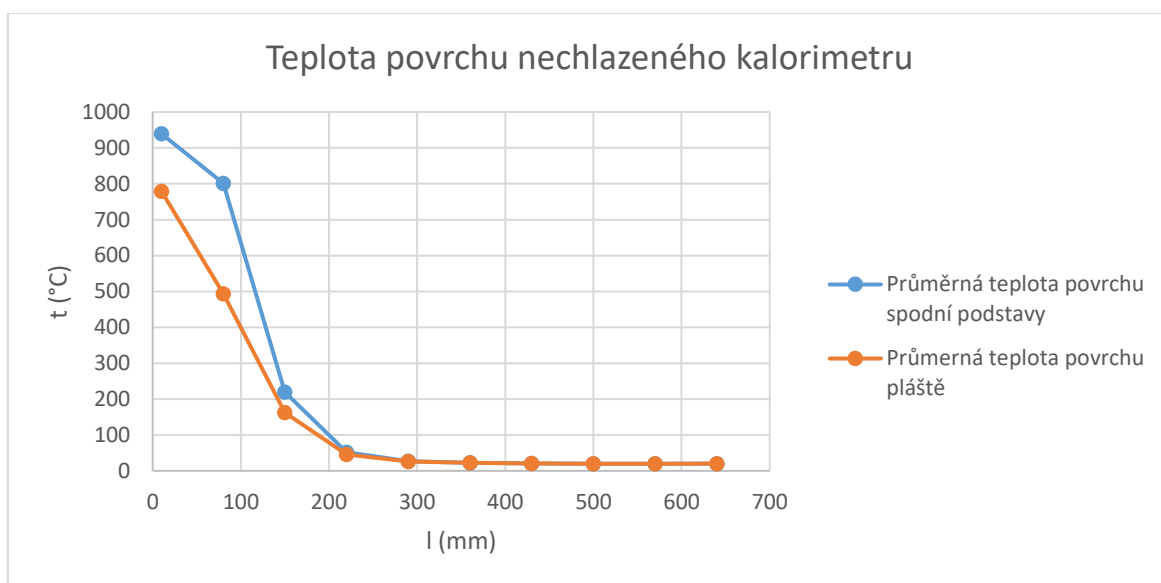
**Graf 2: Rozložení J,H v kalorimetru a induktoru
(nastavení induktoru svazkový vodič)**



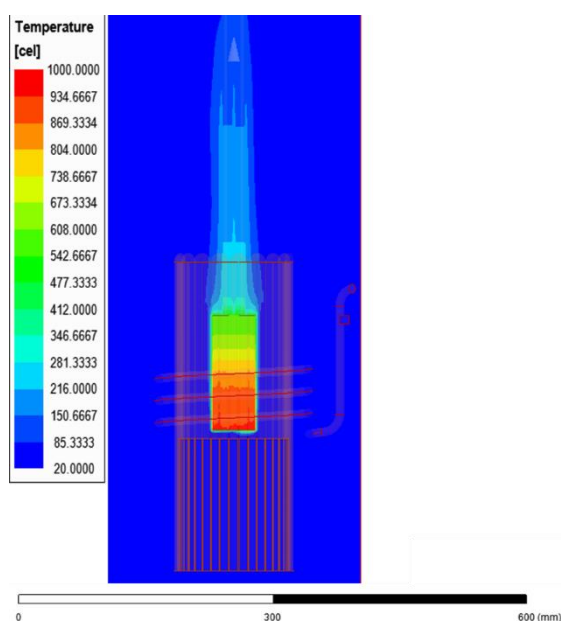
**Graf 3: Rozložení J,H ve studeném kelímku a induktoru s zohledněním povrchového jevu
(nastavení induktoru plný vodič)**

Pomocí Icepaku jsem počítal ohřev nechlazeného kalorimetru Joleovými ztrátami v ustáleném stavu pro různé polohy. Výsledky jsou uvedeny v **Tab. 2** nebo v **Příloze D**. Od polohy 360 mm nad dnem studeného kelímku se už kalorimetr v podstatě neohřívá, jeho teplota je srovnatelná s teplotou okolního prostředí bez uvažování významného příspěvku od roztavené vsázky vlivem radiace.

Graf 4 zobrazuje rozložení teploty na povrchu nechlazeného kalorimetru v závislosti na poloze od dna studeného kelímku, nejvyšší průměrné teploty dosahuje spodní podstava. Od polohy 360 mm dochází k ustálení teploty na hodnotě kolem 20 °C.



Graf 4: Rozložení průměrné teploty na povrchu kalorimetru

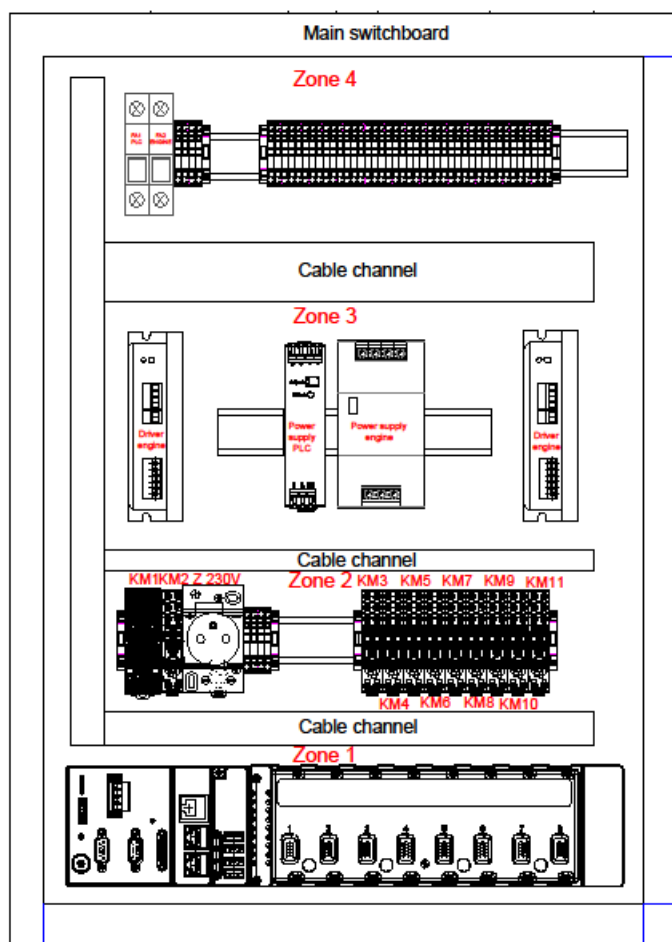


Obrázek 33: Rozložení teploty na povrchu kalorimetru poloha 10 mm

6.3 Elektrická část manipulátoru

Hlavní rozvaděč a ovládací panel systému byly instalovány do oddělených plastových boxů. Tyto boxy jsou z odolného materiálu a jejich výhodou je především nízká hmotnost pro snadnou manipulovatelnost a instalaci. Další výhodou je možnost umístění dle potřeb a možností omezeného prostoru laboratoře. Hlavní rozvaděč může být přišroubován na zeď. Ovládací panel propojený s tímto rozvaděčem lze instalovat poblíž komory studeného kelímku pro snadnou dostupnost. Podrobná elektrická schémata jsou uvedena v **Příloze E**.

6.3.1 Hlavní rozvaděč



Obrázek 34: Rozmístění komponentů rozvaděče

Ve spodní části hlavního rozvaděče je umístěno PLC c-RIO 9081 označeno zóna 1 **obr. 34**.

V zóně 2 je zdroj 5 V pro napájení enkodéru krokového motoru a ručního kodéru umístěného v externím ovládacím panelu Manual Pulse Generator (MPG). Dále je zde skupina ovládacích relé KM1–KM11. Relé slouží k převodu řídicího signálu 24 V na vhodnou napěťovou hladinu 5 V pro čtení nebo ovládací pomocí digitální karty. Ovládací signály jsou přenášeny pomocí napěťové hladiny 24 V pro omezení působení rušivých signálů z okolí.

V zóně 3 jsou instalovány napájecí zdroje. Zdroj 24V MEAN WELL napájí krokový motor a tlačítka instalovaná v ovládacím panelu. Zdroj 24V NI PS-15 napájí řídicí PLC a dotykový displej. Dále jsou zde umístěny dva drivery. K přepínání motoru na příslušný driver slouží 4 pólové relé KM1. První driver je ovládán pomocí c-RIO 9081, druhý driver je řízen z externího ovládacího MPG. Drivery jsou redundantní pro zvýšení bezpečnosti systému.

V poslední zóně 4 jsou na DIN liště instalovány jističe a svorkovnice WAGO pro připojení propojovacích kabelů mezi hlavním rozvaděčem a ovládacím panelem nebo externím ovládním MPG. Propojovací vodiče mezi jednotlivými komponenty obsaženými v hlavním rozvaděči jsou přehledně vedeny v kabelových kanálech, jejichž dalším účelem je omezení prostoru vyhrazeného pro vodiče a umožnění tak lepšímu chlazení komponentů rozvaděče.

CompactRIO 9081

C-RIO je robustně navržené PLC osazené procesorem Intel Celeron U3405 dualcore 1,06 GHz. Dále disponuje několika komunikačními porty pro připojení periférií: ethernet, 4 x USB, RS-485, RS-232, VGA. Je zde integrované FPGA řady Xilinx Spartan-6 LX75. C-RIO 9081 obsahuje 8 slotů pro I/O moduly C Series. Do PLC lze připojit a nakonfigurovat různé karty dle aplikace, případně připojit rozšiřující modul na 4-8 slotů. Kvůli robustní kovové konstrukci dosahuje PLC hmotnosti 3,1 kg a je certifikované pro výbušné prostředí dle Ex nA IIC T4 G. Lze tedy instalovat do nebezpečného prostředí do maximální teploty 135 °C. [15]



Obrázek 35: c-RIO 9081 [15]

NI 9401

NI 9401 je digitální karta s konfigurovatelnými kanály - vstupní nebo výstupní, případně kombinace obojího. Nakonfigurovat lze 8 kanálů. S počtem využitých kanálů se snižuje spínací frekvence pro Digital Input (DI) od 30 MHz – 9 MHz pro Digital Output (DO) 20 MHz – 5 MHz. Dále je nutné zohlednit zpožděním max. 500 ns pro změnu stavu True / False.

NI 9217

Karta NI 9217 je primárně navržena pro měření termočlánků. Konkrétně PT 1000. Karta disponuje čtyřmi analogovými vstupy. Lze připojit termočlánky v tří i čtyřvodičovém provedení. S využitím speciálních bloků LabVIEW lze přímo získat žádanou teplotu. Tuto kartu jsem použil pro měření změny odporu proměnného rezistoru, který slouží k manuální změně rychlosti.

6.3.2 Ovládací panel

V ovládacím panelu **obr. 36** byl instalován 10" dotykový displej Weintek MT8102iE (HMI). S rozlišením 1024 x 600 bodů typu TFT. Osazený procesorem ARTEX A8 RISC 600 MHz. Displej je vybaven několika komunikačními porty: ethernet, RS-485, RS-432, USB. Pro komunikaci mezi displejem a řídicím PLC byl využit ethernetový port. USB port slouží k ukládání dat na externí flash paměť. Dotykový displej je napájen ze zdroje 24 V DC. [16] Do boxu jsou také instalována tlačítka pro pohodlné a jednoznačné ovládání. Z bezpečnostních důvodů se veškeré režimy ovládání spouští a vypínají mechanickými tlačítky start a stop. Dále je zde dvojice tlačítek (Up, Down) pro nastavení směru posunu v poloautomatickém režimu. Víceotáčkový proměnný rezistor pro manuální nastavení požadované rychlosti. Nouzové tlačítko (Emergency Up) pro rychlé vytažení zařízení z komory studeného kelímku.



Obrázek 36: Ovládací panel

Způsoby ovládání systému:

1. Automatický režim
2. Poloautomatický režim
3. Manuální režim display
4. Manuální ovládání pomocí MPG ovladače

1. Automatický režim

Tento režim ovládání zajišťuje plně automatizovaný posun základní desky. Operátor si přednastaví jednotlivé kroky posunu. Nastavuje se požadovaná dráha, rychlost posunu, prodleva. Po nastavení automatického režimu v okně Programing lze automatický režim spustit tlačítkem start. Během procesu software vybírá předdefinované řádky a jednotlivé kroky provede zcela autonomně v definovaném pořadí.

2. Poloautomatický režim

Poloautomatický režim se aktivuje stisknutím jednoho z mechanických tlačítek Up nebo Down umístěných v pravé části ovládacího panelu. Základní deska se poté posouvá nahoru nebo dolů podle zvoleného směru. Rychlostí definovanou pomocí proměnného rezistoru.

3. Manuální režim display

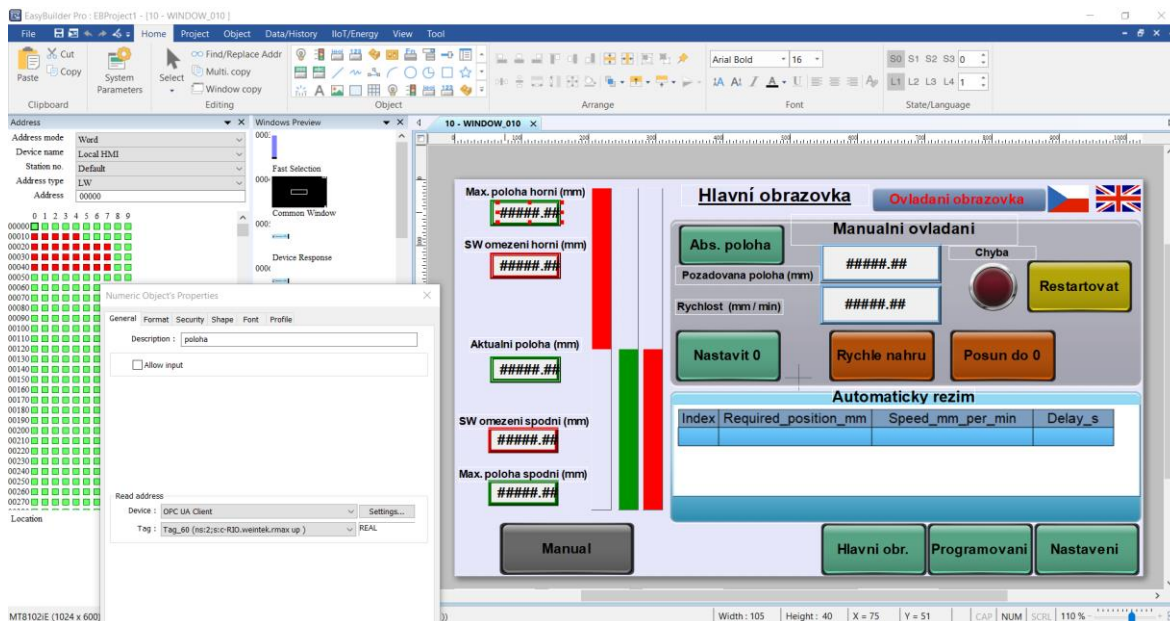
Zvolením tlačítka Handle se aktivuje manuální ovládání pomocí dotykového displeje. V tomto režimu ovládání základní deska dojede do požadované absolutní pozice nebo lze zadat relativní pozici tzn. inkrementovat nebo dekrementovat dráhu o zvolený úsek.

4. Manuální ovládání pomocí MPG ovladače

Manipulátor lze ovládat z externího ovladače Manual Pulse Generator (MPG). Externí ovladač obsahuje ruční kodér, který generuje obdélníkové pulzy 5V pro driver motoru. Ruční kodér generuje na jednu otáčku 100 pulzů. V závislosti na rychlosti a směru otáčení kodérem definuje operátor otáčení krokového motoru. Ruční ovladač obsahuje bezpečnostní prvky jako LED diodu pro indikaci aktivního stavu nebo přídržné tlačítko. Červené tlačítko slouží pro ovládání relé KM1 a tedy přepínání mezi jednotlivými způsoby ovládání.

6.3.2.1 Uživatelské rozhraní dotykového displeje

Uživatelské rozhraní bylo vytvořeno v programu Easy Builder Pro **obr. 37** určenému pro operátorské panely Weintek. V oknech je nutné rozmístit jednotlivé akční členy nebo indikátory, přiřadit příslušné adresy, definovat datové formáty... Ovládací tlačítka jsem zvolil dostatečně velká a vhodně rozmístil pro jednoduchou ovladatelnost. V System Parameters bylo nutné nastavit komunikaci po Ethernetu s využitím protokolu OPC-UA.



Obrázek 37: Easy Builder Pro

Hlavní obrazovka

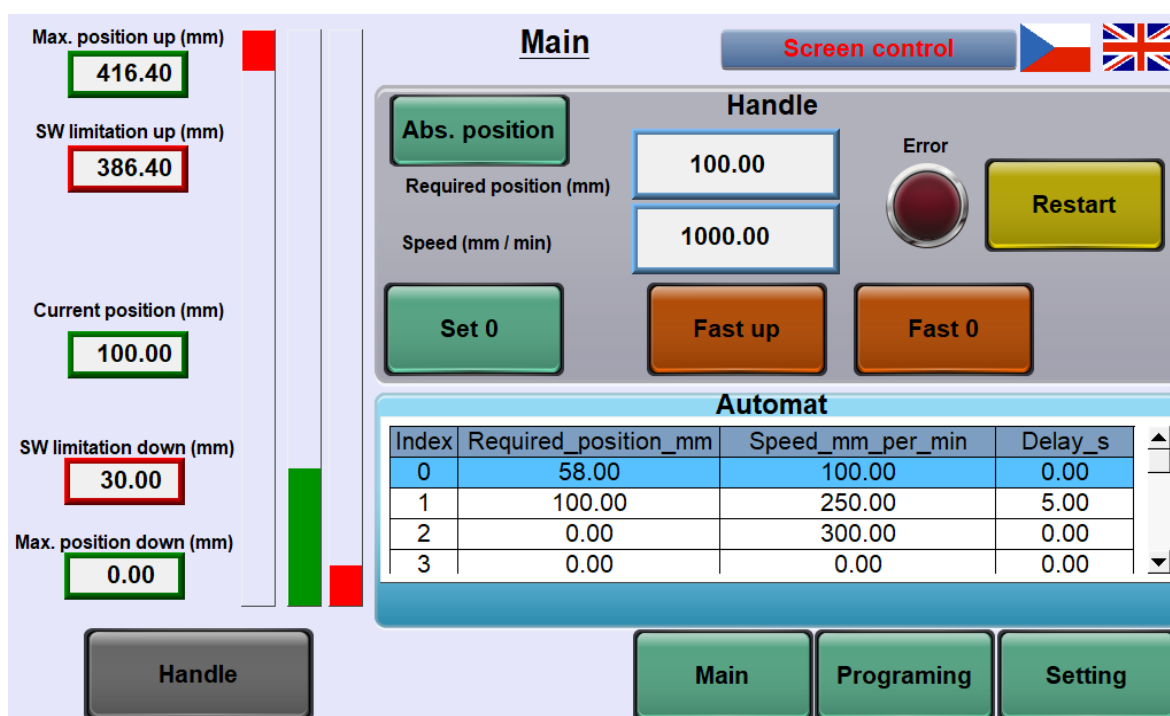
Hlavní okno **obr. 38** uživatelského rozhraní zobrazuje všechny důležité informace o poloze, nastavených limitech a aktuální rychlosti. V levé části uživatelského rozhraní se zobrazuje aktuální poloha a maximální možná dráha. Zobrazují se zde nastavené softwarové limity, které virtuálně omezují dráhu posunu vyznačenou červeným bargrafem.

V pravé části je oblast manuálního ovládání (šedý rámeček) a oblast automatického režimu (modrý rámeček). Manuálně lze nastavit nulovou pozici (Set 0), poté dojde k automatickému přepočtení maximální dráhy a limit omezujících dráhu. Lze také zadat požadovanou polohu, a to absolutně nebo relativně. Funkce Fast 0 přesune základnu maximální rychlosti do nulové pozice (Home Position). Funkce Fast up rychle přesune základnu do maximální horní pozice a dojde tedy k vytažení zařízení z prostoru komory studeného kelímku. Funkce restart restartuje bezpečnostní funkci sloužící ke kontrole posunu a provedení softwarových a skutečných kroků motoru.

V modrém rámečku se zobrazuje stav automatického posunu. Aktuálně prováděný krok je zvýrazněn modrým podbarvením.

Indikátor v pravém horním rohu zobrazuje režim ovládání. Screen control signalizuje ovládání z dotykového displeje. Semi-automatic control naznačuje ovládání pomocí tlačítek umístěných vpravo na ovládacím panelu, tedy poloautomatický režim. Poslední možností je Hardware control. Posun je ovládán z externího ovladače MPG nezávisle na PLC.

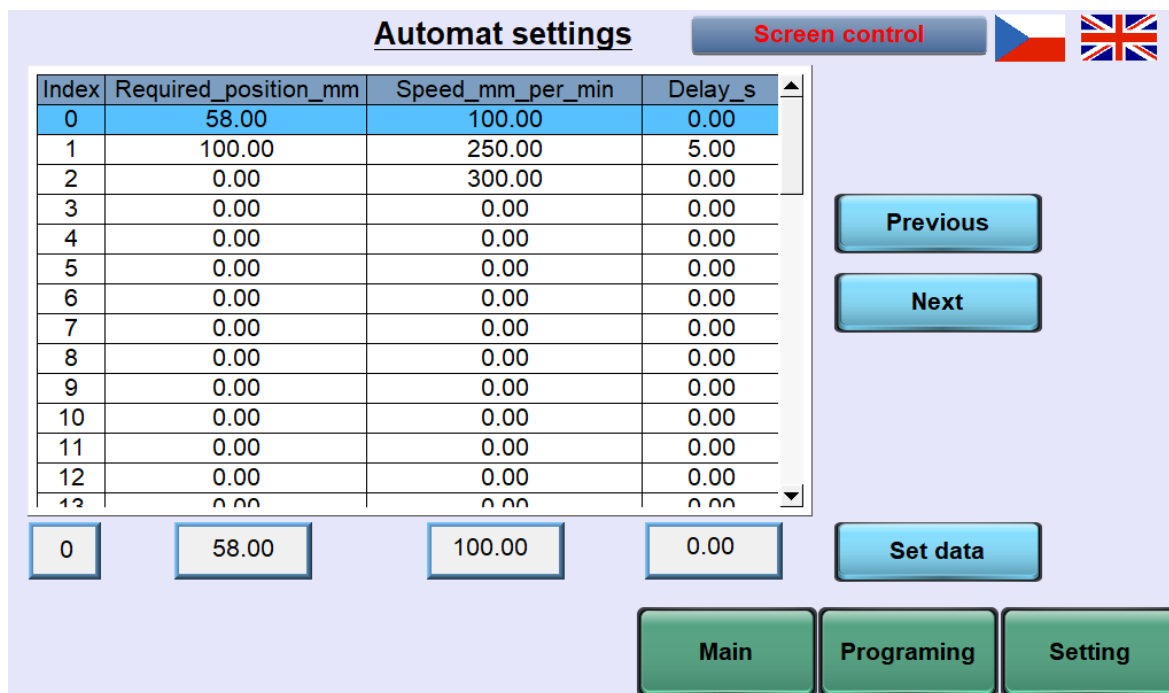
Vedle modrého rámce jsou ikony nastavení jazyků. Uživatel si může vybrat mezi dvěma jazykovými mutacemi – anglickým nebo českým jazykem.



Obrázek 38: Hlavní obrazovka

Automat settings

V tomto okně **obr. 39** uživatel nastavuje jednotlivé kroky, které bude systém provádět autonomně. Nastaví se požadovaná poloha, do které základní deska dojede. Nastaví se také rychlost posunu, případně prodleva, kterou automat vyčká do provedení dalšího kroku. Tato prodleva může být využita např. pro měření a další úkony. Požadované hodnoty se vkládají do oken pod tabulkou, k zápisu do paměti dojde po stisknutí tlačítka Set data.



Obrázek 39: Automat settings

Parameter settings

V okně nastavení se zobrazují aktuální hodnoty z probíhajícího posunu. Nastavená uražená dráha na jednu otáčku motoru (mm per turn) je závislá na stoupání kuličkového závitu a případných převodech. Lze zkontrolovat počet kroků enkodéru a počet kroků, které měl motor vykonat pro vyhodnocení případných chyb. V tomto okně uživatel nastavuje softwarové limity. Nastavené limity zkracují maximální dráhu posunu. Z bezpečnostních důvodů základna tyto limity nepřekona a zastaví právě zde. Dále je možné nastavit bezpečnost, rozdíl mezi kroky enkodéru a kroky vypočtenými v PLC. Při dosažení tohoto rozdílu software vyhodnotí chybu a zastaví motor. Tato chyba může být způsobena přjetím požadované polohy nebo mechanickými problémy např. překážkou v dráze.

7 Popis vytvořeného algoritmu

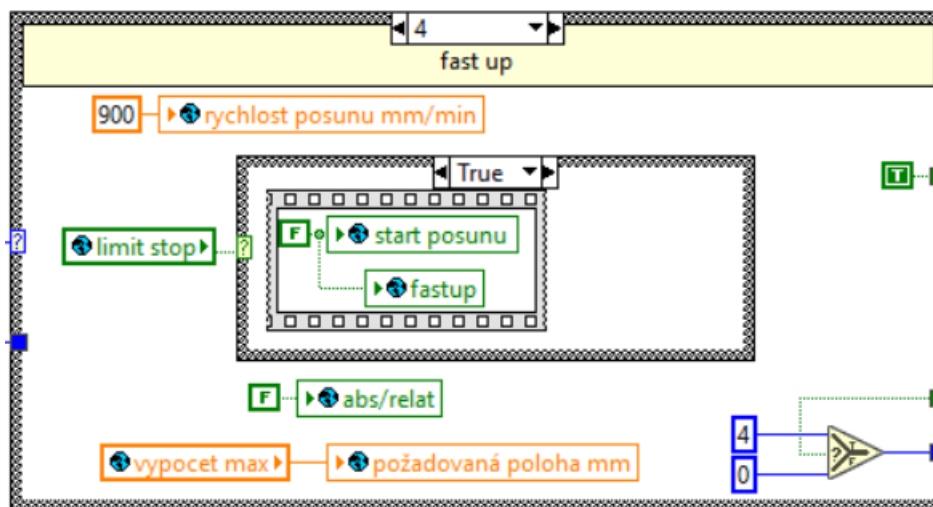
Řídicí software jsem vytvořil v prostředí LabVIEW. Program jsem rozdělil na několik podprogramů SubVI pro zvýšení jeho přehlednosti. Výpočet polohy z enkodéru a ovládání driveru zajišťuje FPGA obsažené v c-RIO 9081. Využití FPGA přináší výhodu ve zkrácení výpočetního času až na mikrosekundy. Komunikace mezi řídicím PLC a HMI je zajištěna pomocí protokolu OPC-UA. Po spuštění c-RIA se spustí Real Time aplikace a jako první naběhne hlavní VI, které obsahuje reference na spuštění komunikace mezi PLC a HMI a také spuštění FPGA VI.

7.1 Hlavní VI

Hlavní VI je v podstatě mozem systému. Obsahuje několik SubVI se specifickými funkcemi. Při jeho spuštění dojde k zápisu defaultních hodnot např. nastavený počet kroků nebo nastavené limity atd.. Dále je zde vícero podmínek pro bezpečné zastavení motoru a vyvarování se kolizi mezi jednotlivými funkcemi. Dále popíši princip některých důležitých funkcí systému.

Funkce Fast up

Tato funkce zajišťuje rychlé vytažení zařízení z komory studeného kelímku. Funkce je založena na principu stavové mašiny s využitím posuvného registru. Dle **obr. 40** Case struktura obsahuje čtyři okna. Nejprve dojde k zadání požadované polohy, v tomto případě maximální možné, následuje načtení požadované rychlosti. V třetím kroku se spustí posun. V posledním kroku se kontroluje podmínka dosažení maximální polohy, která se vyčte z globální proměnné limit stop. Následuje vynulování posuvného registru a přechod do stavu idle neboli nečinnosti. Na totožném principu je založena i funkce Fast 0, která zajišťuje rychlý dojezd základny do určené základní polohy.



Obrázek 40: Fast up

Funkce pro zadávání požadované rychlosti

Tato funkce je rovněž obsažena v hlavním VI. Jejím účelem je přepočítání požadované rychlosti zadané v mm/min na čas jedné iterace FPGA VI, která posílá ovládací impulzy na driver a definuje tak rychlost motoru. Funkce rovněž reguluje dojezd do požadované polohy postupným snižováním rychlosti v závislosti na vzdálenosti. Důležitá vstupní data funkce jsou požadovaná rychlost, počet kroků motoru na jednu otáčku a stoupání závitu tyče zajišťující posun základní desky. Výstupem je čas jednoho kroku motoru v mikrosekundách.

Přepočtení je provedeno dle rovnic 7.1.17 – 7.1.19. RPM značí počet otáček za minutu. Výpočet je proveden pomocí součinu $f \cdot 60$ děleno počtem kroků na otáčku motoru. Krokové motory mají různý počet kroků, a tedy různý úhel otočení na jeden krok viz **4.2 Princip řízení krokových motorů**. Následným odvozením se dostáváme k vyjádření frekvence (7.1.19), ze které jde jednoduše odvodit perioda, čas jednoho kroku je tedy polovina periody.

$$RPM = \frac{angle}{360} \cdot f \cdot 60 = \frac{360}{steps} \cdot f \cdot 60 = \frac{f \cdot 60}{steps} \left(\frac{r}{min} \right) \quad (7.1.17)$$

$$speed = \frac{f \cdot 60}{\frac{steps}{mm \text{ per rotation}}} \left(\frac{mm}{min} \right) \quad (7.1.18)$$

$$f = \frac{speed \cdot \frac{steps}{mm \text{ per rotation}}}{60} (Hz) \quad (7.1.19)$$

Funkce pro kalibraci systému

Kalibrační funkci je nutné spustit po zapnutí systému. Software neukládá poslední polohu v případě odpojení zařízení od napájení. Kalibrační systém se eliminuje případná deformace koncových spínačů. Funkce kalibrace je založena na projetí celé dráhy mezi horním a spodním koncovým spínačem, následně se provede výpočet krajních bodů a limit ze získaného počtu kroků a stoupaní kuličkového šroubu. Funkce pro kalibraci se skládá ze dvou částí, viz **Příloha C**.

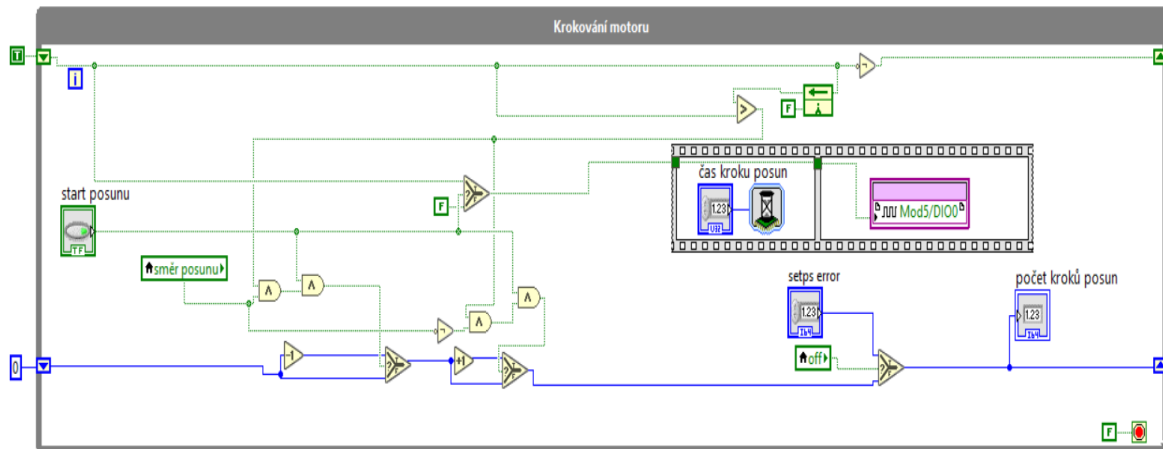
Funkce pro výpočet požadované polohy

Po zadání požadované polohy uživatelem dojde k vyhodnocení v závislosti na aktuální poloze. Výsledný rozdíl mezi aktuální a požadovanou polohou se přepočte na potřebný počet kroků motoru, který se odešle do FPGA VI. V závislosti na aktuální a požadované poloze se také automaticky dopočte směr posunu. Dále je možné zvolit relativní zadání požadované polohy. V tomto případě dochází k uložení aktuální polohy do posuvného registru a přičtení nebo odečtení aktuálně požadované polohy. Základna se posune o právě zadanou vzdálenost vůči aktuální poloze.

FPGA VI

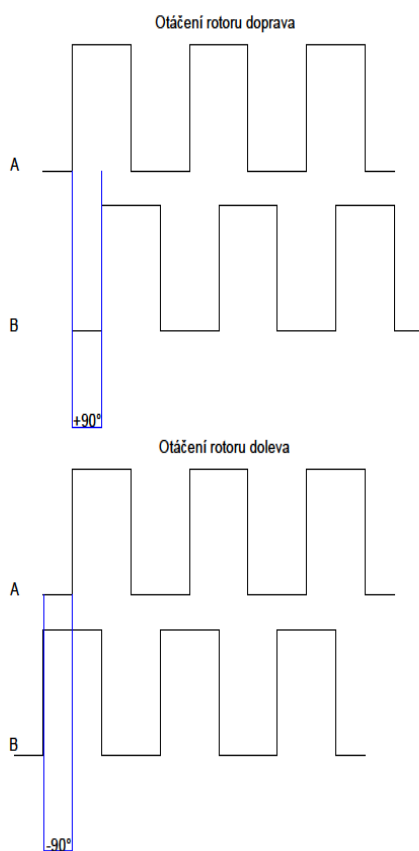
Tato část programu zajišťuje generování řídicích pulzů odesílaných na driver pomocí TTL logiky z karty NI 9401. Pomocí obdélníkových pulzů je definována rychlost otáčení. Dále je definován směr otáčení motoru +5 V nebo 0 V. V tomto VI dochází k vyčítání signálu z enkodéru motoru, který nám dává informaci o skutečné poloze základní desky a na základě těchto dat lze dále kalkulovat dráhu a nastavené softwarové omezení této dráhy. Taktéž zde

vyčítám signály z jednotlivých analogových tlačítek a proměnného rezistoru, kterým se mění rychlost motoru v závislosti na jeho změřeném odporu pomocí karty NI 9217.



Obrázek 41: FPGA VI řízení motoru

Jedna z ovládacích smyček ve FPGA VI je určena pro krokování motoru **obr. 41**. V závislosti na požadavku start posunu se aktivuje odesílání pulzů na digitální výstup karty NI 9401. Doba trvání jednoho pulzu je dána dle předchozího výpočtu z funkce pro zadání požadované rychlosti.

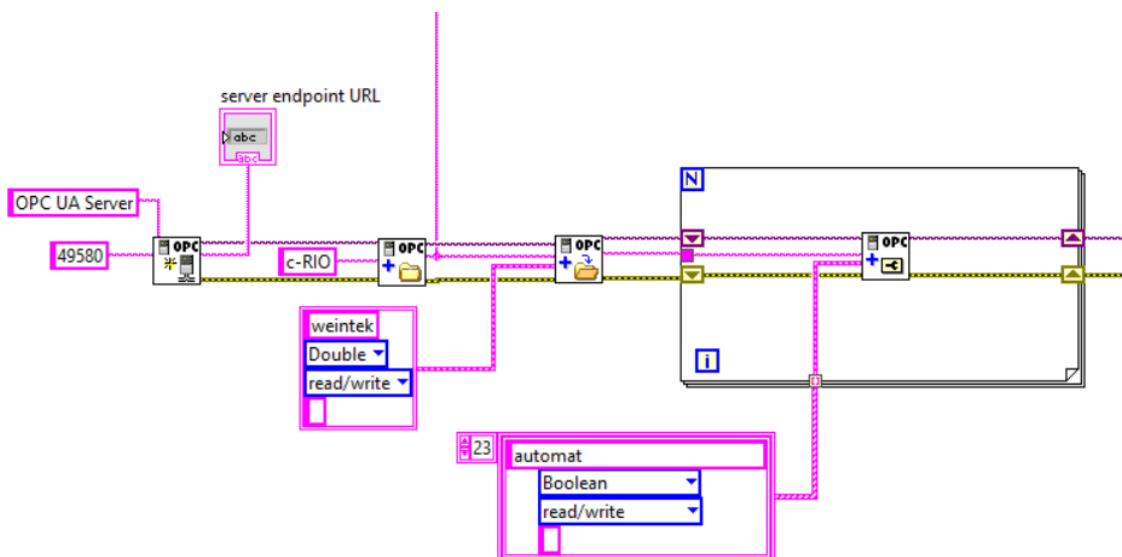


Obrázek 42: Signál z enkodéru

FPGA VI obsahuje několik dalších While smyček. Jedna zabezpečuje vyčítání ostatních signálů z karet NI 9401 a NI 9217. Celkem je využito 11 digitálních kanálů. V další smyčce dochází k vyčítání dat z enkodéru, z kterého je vyvedeno pět vodičů, dva pro napájení 5 V DC, čtyři pro vyčítání TTL signálu z optočlenu. Z enkodéru tedy vystupují dva signály vzájemně posunuté o 90° . Posuzováním dvou signálů místo jednoho se eliminuje případné rušení. Při zpoždění signálu A o 90° elektrických za signálem B se motor otáčí doleva. Naopak při zpoždění signálu B o 90° elektrických za signálem A se motor otáčí po doprava. Dále se vyhodnocuje uražená dráha v závislosti na počtu otáček, ze známého počtu impulzů 1000 na jednu otáčku.

7.2 Komunikační protokol OPC–UA

Tato část programu zabezpečuje komunikaci mezi PLC a Human Machine Interface (HMI) pomocí protokolu OLE for Proces Control Unified Architecture (OPC-UA). Tento protokol slučuje předchozí protokoly OPC DA, OPC AE. Jedná se o protokol pro přenos informací horizontálně i vertikálně tzn. Machine to PC nebo Machine to Machine. OPC-UA je nezávislé na hardwaru i na operačním systému, programovacím jazyku, a je významný hráč v oblasti Industry 4.0.[17] V aplikaci je instalován na c-RIO jako OPC Server a displej (HMI) je v tomto případě klient. **Obr. 43** zobrazuje implementaci OPC-UA v LabVIEW. Je nutné definovat komunikační port shodný s klientem, vybrat hardware, v našem případě c-RIO 9081. Nakonec se definují názvy adres a jejich datové typy. Ve vytvořeném algoritmu je použito 76 adres. Do definované adresy se zapisují nebo vyčítají data z příslušných globálních proměnných pro zpracování dat v dalších VI.



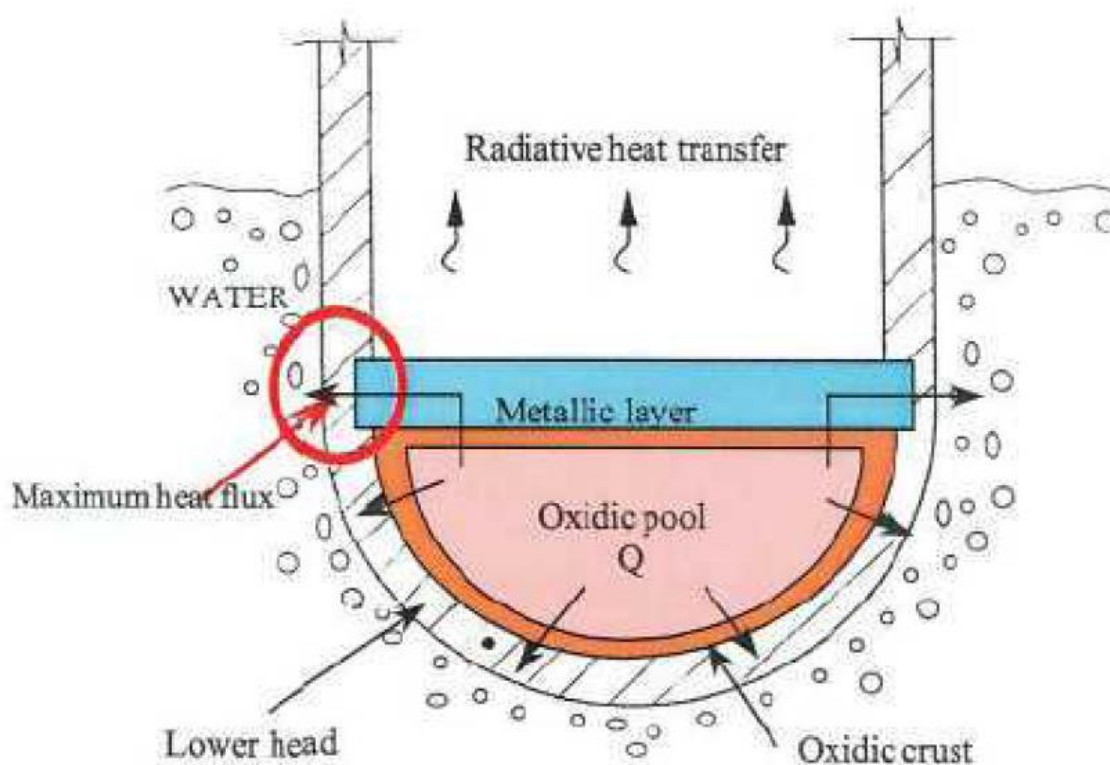
Obrázek 43: Implementace OPC-UA v LabVIEW

SubVI poloautomatický režim

Toto subVI zabezpečuje funkci poloautomatického režimu ovládání pomocí tlačítek Up a Down. Po stisknutí tlačítka Up nebo Down a potvrzením tlačítkem start se spustí posun definovanou rychlostí pomocí potenciometru. Běh tohoto režimu je signalizován podsvícením tlačítek s integrovanými LED diodami. Tyto diody jsou určeny pro 24 V DC, a proto je bylo nutné spínat pomocí relé. Digitální karta nedodává dostatečný proud pro sepnutí ovládací cívky, a proto jsem musel využít sepnutí pomocí bipolárních tranzistorů NPN. Rezistivita potenciometru 500Ω je lineárně přepočítávána s převodem $0,1 \Omega / 0,2 \text{ mm/min}$.

8 Test manipulátoru v praxi

Test manipulátoru proběhl v Centru výzkumu Řež v laboratoři studeného kelímku. Manipulátor byl nejprve testován při použití bez zdrojů ionizujícího záření. Poté proběhl ostrý provoz manipulátoru, při kterém se simulovala těžká jaderná havárie reaktoru za podmínek, kdy není k dispozici dostatečná kapacita chladicího média pro odvod tepla z aktivní zóny. V aktivní zóně reaktoru (core) vlivem rozpadu štěpných produktů nadále roste teplota. Vlivem vysoké teploty se taví jaderné palivo UO_2 společně s krytím paliva Zr tím vzniká tzv. corium. Tato směs se hromadí na dně reaktoru, kterou je nutné chladit, pro udržení celistvosti nádoby reaktoru. Tento způsob řešení havárie se nazývá In-vessel retention (IVR).



Obrázek 44: Tepelný tok z coria [18]

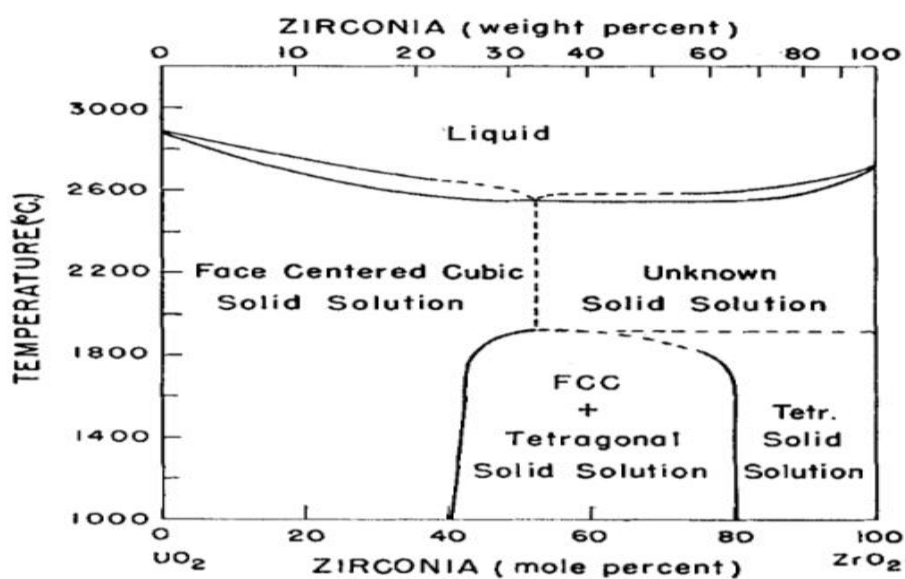
Cílem testu bylo simulovat havárii a měřit tepelný tok z coria vytvořeného ve studeném kelímku odváděného do chladicí vody. Obr. 44 ukazuje podmínky během IVR. Největší tepelný tok do nádoby reaktoru prostupuje skrze metalickou vrstvu, protože tavenina oxidu UO_2 vytvoří u stěny nádoby ztuhlou krustu, která působí jako tepelný izolant. [18] Měřicím zařízením byl v tomto případě kalorimetr, jehož stěna simulovala nádobu reaktoru. Na základě rozdílu teplot a změřeného průtoku se pomocí kalorimetrické rovnice stanovil tepelný tok z coria. Dispozičně test probíhal opačně, ale na stejných fyzikálních principech.

Kalorimetr byl posouván pomocí vytvořeného manipulátoru instalovaného na pracovní komoře indukčního systému se studeným kelímkem **obr. 45**.



Obrázek 45: Použití manipulátoru v praxi

V průběhu testu bylo potřeba velmi pomalu zasouvat kalorimetr do taveniny a eliminovat tak případnou expanzi taveniny. Směs dvou látek během ohřevu prochází několika fázemi od solidu, tzn. pevného skupenství k liquidu, tedy kapalině. Do teploty přibližně 2570 °C se směs $\text{UO}_2 + \text{ZrO}_2$ nachází v pevném skupenství. Teplota roztaveného coria, tedy teplota liquidu, je dle fázového diagramu přibližně 2660 °C pro hmotnostní obsah ZrO_2 20 %.



Obrázek 46: Fázový diagram $\text{UO}_2 + \text{ZrO}_2$ [18]

Druhou možností pro zvládnutí těžké havárie jaderného reaktoru, kdy dochází k tavení aktivní zóny, je Ex-Vessel Cooling (ExVC). V tomto případě dochází k protavení nádoby reaktoru, pod kterým musí být vybudován kanál z žáruvzdorného betonu a lapač coria. Tato nádrž (lapač) je chlazena a zabraňuje dalšímu postupu coria a poškození kontejnmentu. Tento systém dosahuje vyšší účinnosti chlazení kvůli větší chladicí ploše. Ex-Vessel Cooling v tomto experimentu nebyl testován.



Obrázek 47: Detail komory studeného kelímku

Během testu manipulátoru se neprojeví žádné závažné problémy. Zaměstnanci CV Řež využívali především automatický režim posunu, případně doladění pozice pomocí ručního MPG ovladače. Z testu vyplynuly návrhy na drobná vylepšení systému, především na uživatelsky přívětivější prostředí dotykového panelu dle potřeb zaměstnanců.

Závěr

V rámci této diplomové práce se podařilo vytvořit manipulátor použitelný v praxi. Manipulátor je určen pro potřeby zařízení studeného kelímku. Využití je především pro měření a zasouvání zařízení do pracovní komory studeného kelímku během tavy. Zařízení je tedy nezbytné pro bezpečnost výzkumníků. Manipulátor je využíván v laboratoři studeného kelímku v Centru výzkumu Řež.

Manipulátor je složen ze tří hlavních částí: nosný rám, ovládací panel a hlavní rozvaděč. Během přípravy manipulátoru byl kladen důraz na bezpečnost. Nosný rám byl vyroben masivně s možností pracovat i s těžšími zařízeními. Zařízení je možné ovládat čtyřmi způsoby. Operátor si tedy může vybrat komfortnější variantu ovládání v závislosti na aplikaci.

Během práce na manipulátoru jsem využil své znalosti v programovacím prostředí LabVIEW, avšak byla potřeba spoustu věcí doplnit. Naučit se pracovat se sofistikovaným hardwarem od firmy National Instruments konkrétně s PLC CompactRIO a vhodně zvolit karty pro sběr a distribuci dat. Bylo nutné se vypořádat s nekompatibilitou hardwaru i softwaru v určité konfiguraci. Zapojení komponent se neobešlo bez předběžného návrhu elektrických obvodů. Dále bylo nezbytné konzultovat návrh řídicího systému se zaměstnanci CV Řež, aby vyhovoval jejich požadavkům.

Pro orientační zhodnocení základních dějů v komoře studeného kelímku bez vsázky. Jsem provedl několik simulací elektromagnetického a teplotního pole v ustáleném stavu. Pro nejhorší stav tzn. poruchu chlazení kalorimetru, s jehož pomocí se během měření vyhodnocoval tepelný tok z coria. Výsledky simulací jsou srovnatelné s daty získanými měřeními.

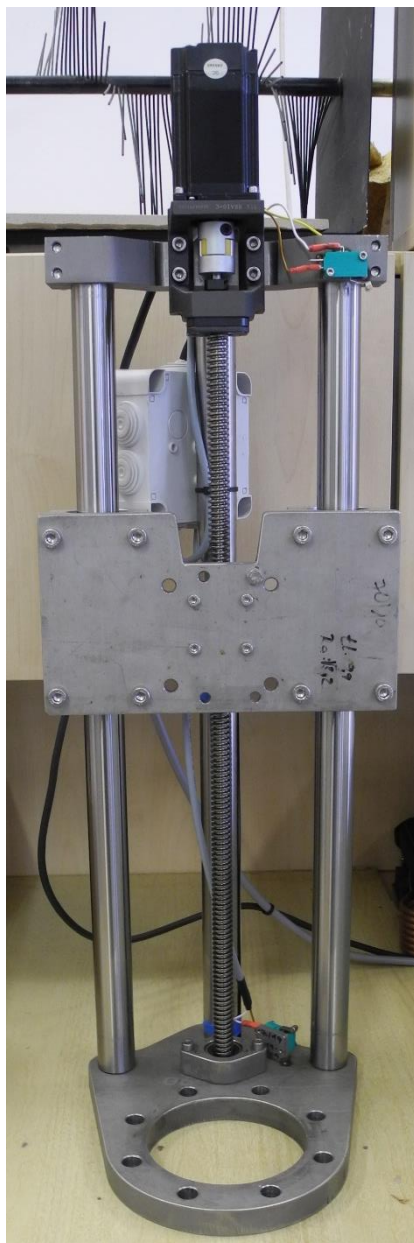
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] S. JIŘINEC. Vysokoteplotní tavení nekovových materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. V Plzni, 2017. Disertační práce (Ph.D.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [2] KUKA [online], Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-sluzby/roboticke-systemy/prumyslove-roboty/kr-1000-titan> [Cit. 25.02.2020]
- [3] Atoma. Principy komunikace a a diagnostika sítí Profinet [online]. 2013. Dostupné z:http://www.automata.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10377.pdf [Cit. 26.02.2020]
- [4] Programing a KUKA ROBOT with a SIMATIC S7-1500 [pdf], [online], Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/123/109482123/att_960645/v3/109482123_S7-1500_KUKA_mxAutomation_DOKU_v12_en.pdf [Cit. 25.02.2020]
- [5] ROBOTIX [online], Dostupné z: <https://www.robotix.co.uk/support/programming/programming.htm>, [Cit. 17.02.2020]
- [6] ROBOTERM [online], Dostupné z: <https://www.roboterm.cz>, [Cit. 18.02.2020]
- [7] D. Rot, J. Kozeny, S. Jirinec, J. Jirinec, A. Podhrazky, I. Poznyak, "Induction melting of aluminium oxide in the cold crucible," 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, 2017
- [8] J. Kozeny, D. Rot, I. Poznyak, S. Jirinec, J. Jirinec, and A. Podhrazky, "Cold crucible HFG160," *Electroscope*, 2017, roč. 2017, ISSN: 1802-4564
- [9] Leadshine Technology Co. [online], Dostupné z: <http://www.leadshine.com/productdetail.aspx?type=products&category=stepper-products&producttype=2-phase-stepper-motors&series=57hs&model=57hs22> [Cit. 18.02.2020]
- [10] Krokové motory [online], Dostupné z: <http://profirobot.cz/wp-content/uploads/2018/03/Krokov%C3%A9-motory.pdf> [Cit. 19.02.2020]
- [11] J. VLACH, J. HAVLÍČEK a M. VLACH. *Začínáme s LabVIEW* Vyd. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2008. 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.
- [12] M. Knedlík. Ovládání prvků diodového pole pomocí LabVIEW. V Plzni, 2018. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.

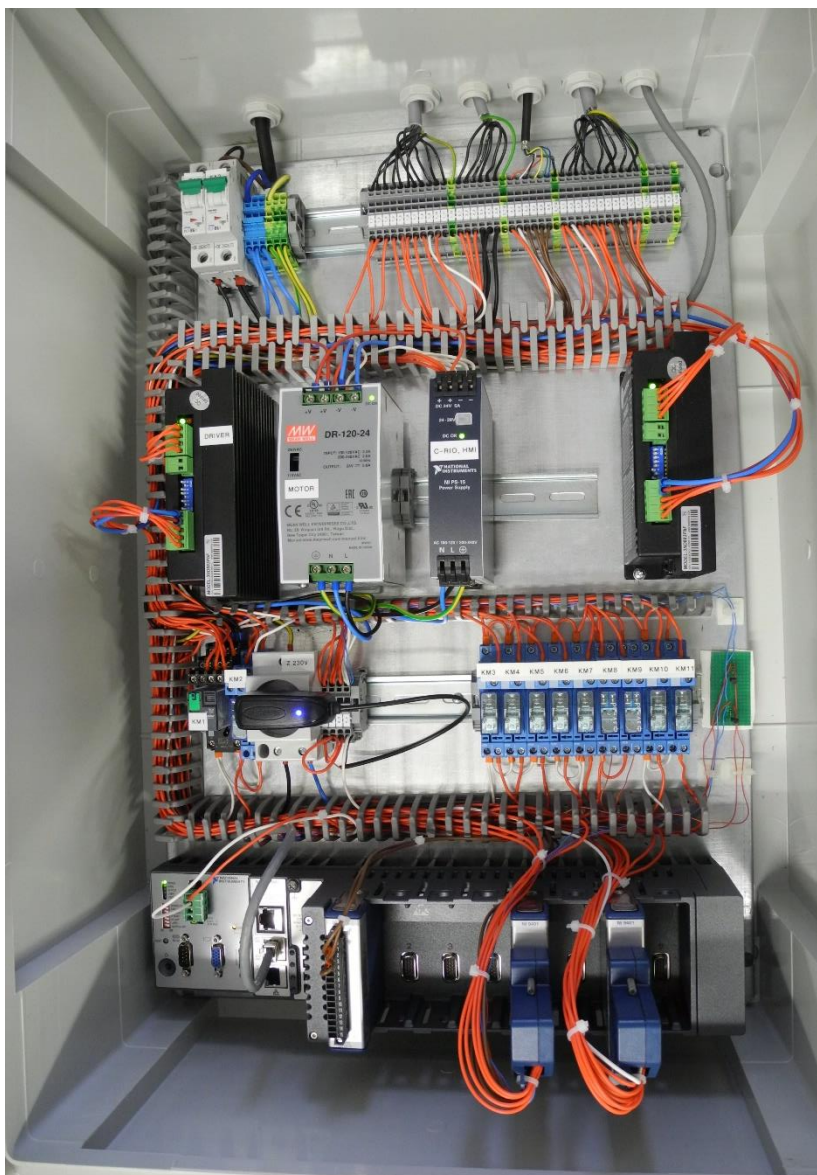
- [13] J. PECHOUŠEK. Základy programování v prostředí LabVIEW. Vyd. 1. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2004. 84 s. ISBN 80-244-0800-7.
- [14] J. ŽÍDEK. Grafické programování ve vývojovém prostředí LabVIEW [pdf]. Ostrava: Katedra elektrických měření, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava, 2002. 215 s. Dostupné z: http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/FAQ/labview/VI_Skripta.pdf
- [15] National Instruments. LabVIEW. [online]. Dostupné z: <http://czech.ni.com/labview> [Cit. 26.02.2020]
- [16] Grafický panel Weintek MT8102iE,[pdf], [online], Dostupné z: <https://www.weintek.cz/pdf/MT8102iE.pdf>, [Cit. 6.03.2020]
- [17] Unified Architecture [online], Dostupné z: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua>, [Cit. 24.03.2020]
- [18] J. Seiler, K Froment, "EFFETS MATER/AUX SUR LES PHENOMENES MULTIPHASIQUES SE PRODUISANT LORS DES PHASES AVANCEES D'ACCIDENT GRAVE DE REACTEUR NUCLEAI," [pdf], Rapport, 2003
- [19] LAMBERTSON, MUELLER. Uranium Oxide Phase Equilibrium Systems: III, UO₂-ZrO₂, Journal of The American Ceramic Society, Vol. 36, No. 11, 1953

Přílohy

Příloha A: Části manipulátoru



Obrázek 48: Nosný rám se základnou



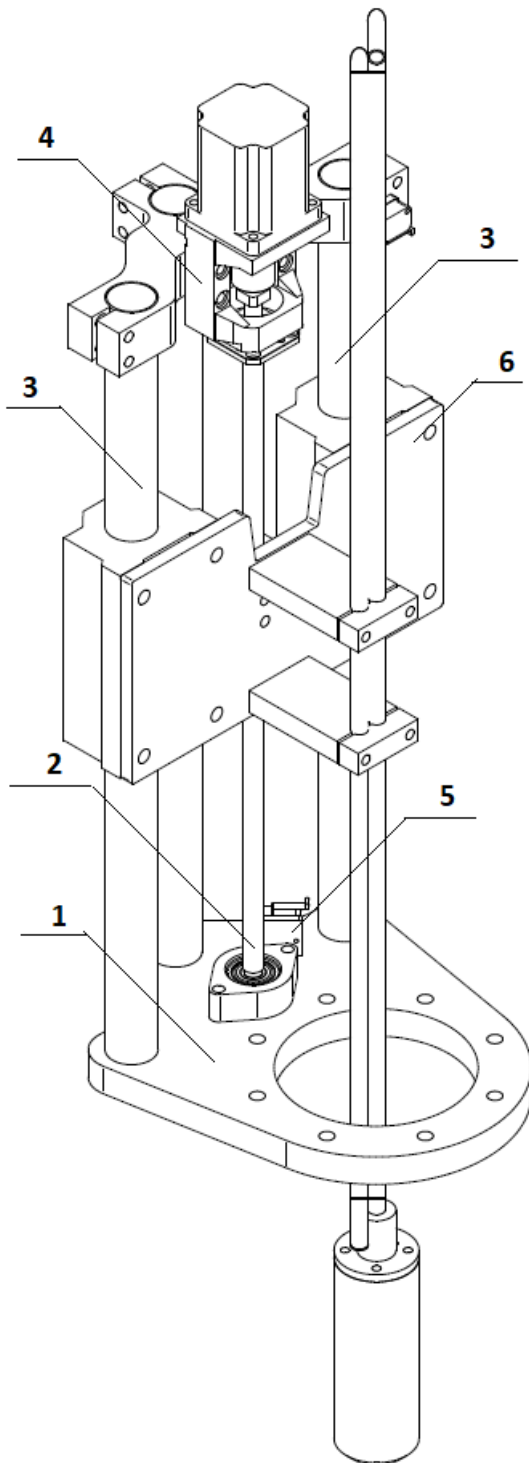
Obrázek 49: Hlavní rozvaděč



Obrázek 50: Ovládací panel



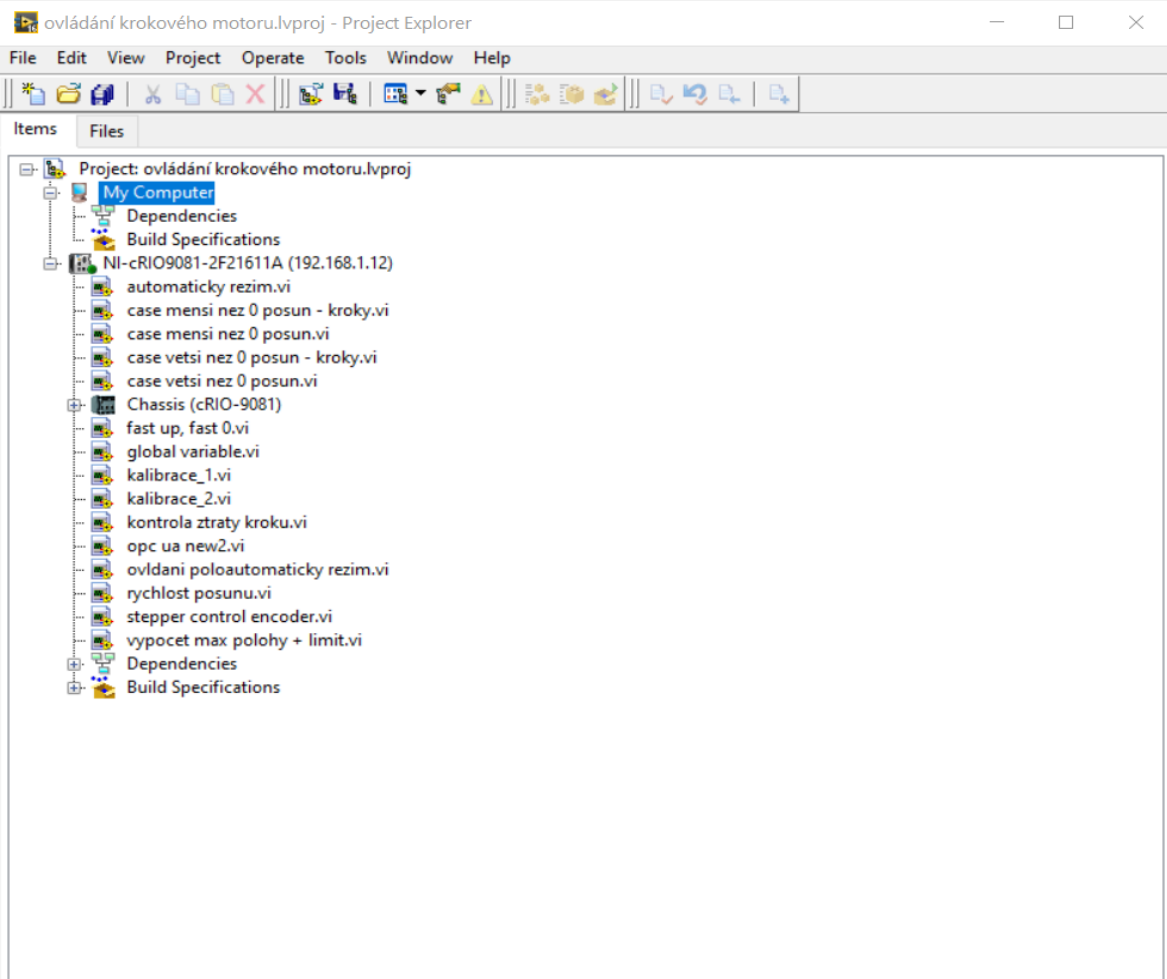
Obrázek 51: Externí MPG ovladač

Příloha B: Popis strojních částí

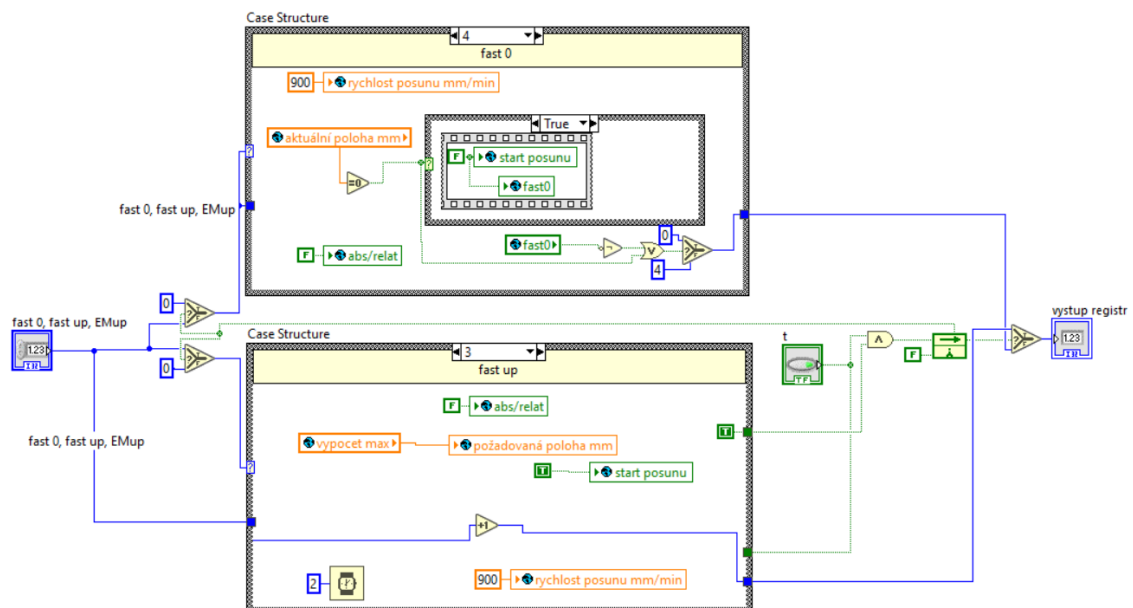
1. Příruba
2. Kuličkový šroub s maticí
3. Vodicí tyče
4. Držák motoru
5. Držáky pro upevnění koncových spínačů
6. Základna

Obrázek 52: Popis strojních částí manipulátoru

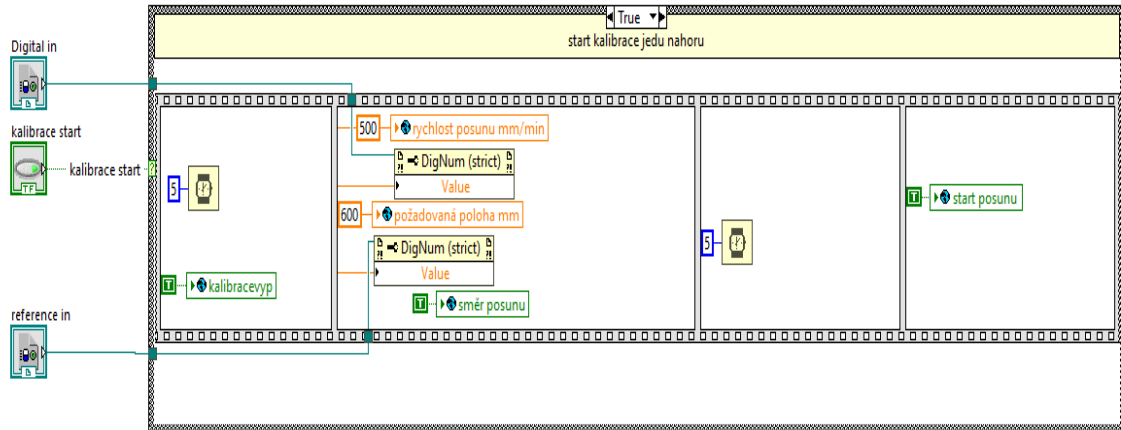
Příloha C: Důležité části řídicího algoritmu



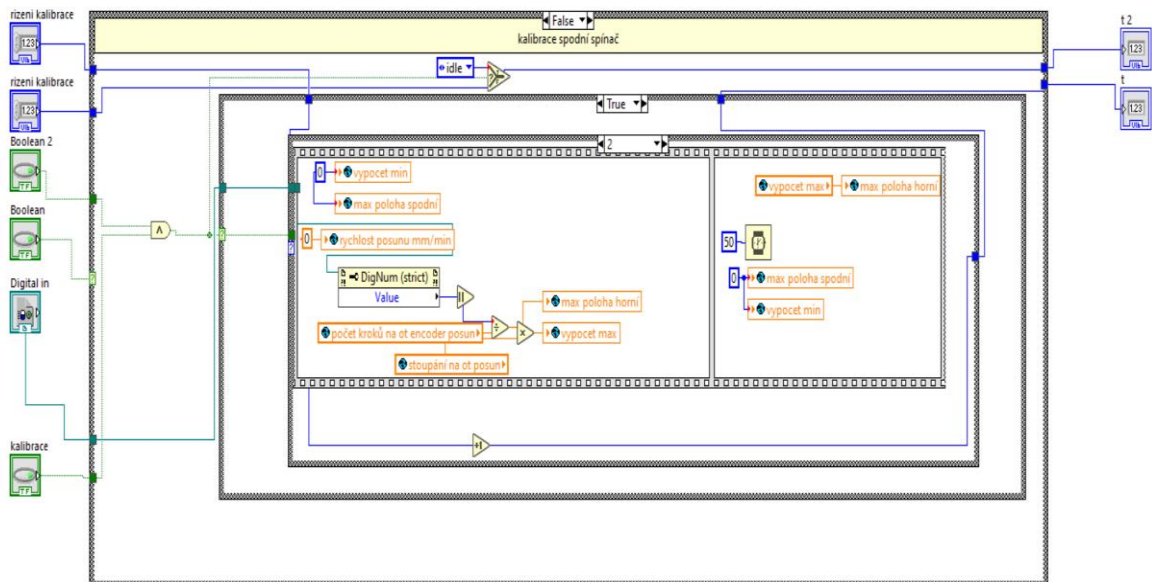
Obrázek 53: Vytvořený projekt



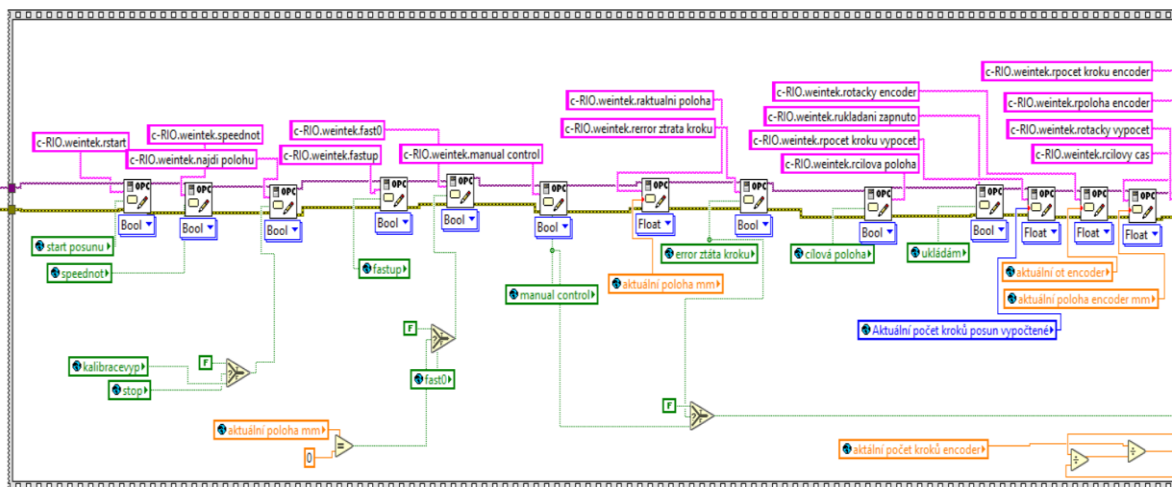
Obrázek 54: SubVI funkce Fast up a Fast 0



Obrázek 55: Funkce kalibrace_1

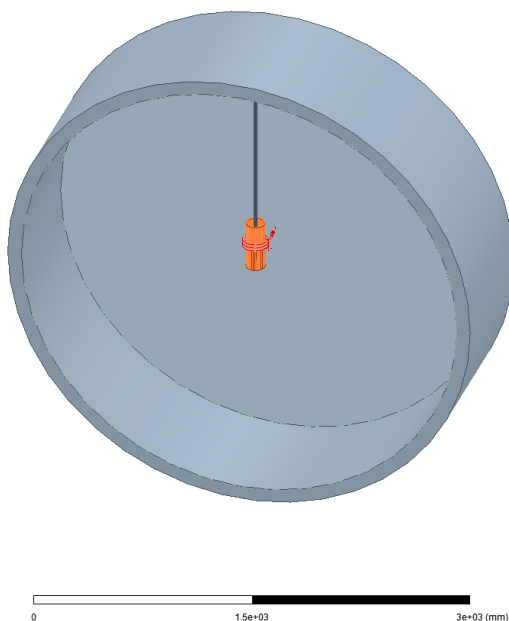


Obrázek 56: Funkce kalibrace_2

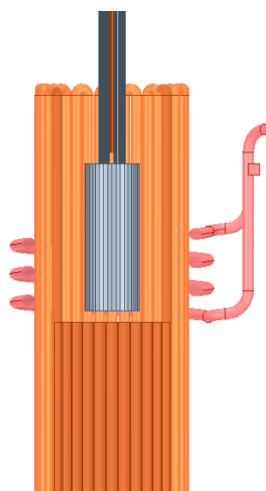


Obrázek 57: Adresování a implementace OPC-UA v LabVIEW

Příloha D: Model studeného kelímku s kalorimetrem a výsledky simulace elektromagnetického a teplotního pole



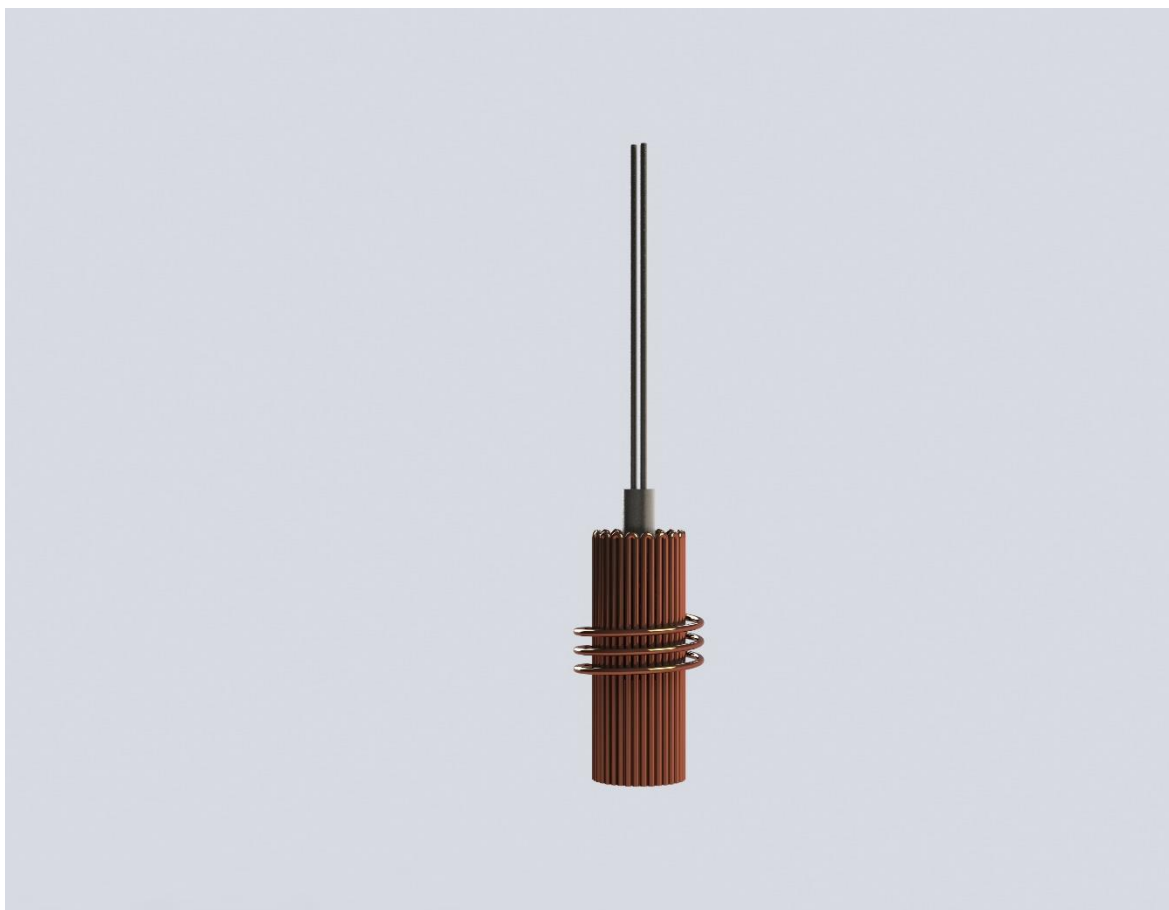
Obrázek 58: Model studeného kelímku s pracovní komorou



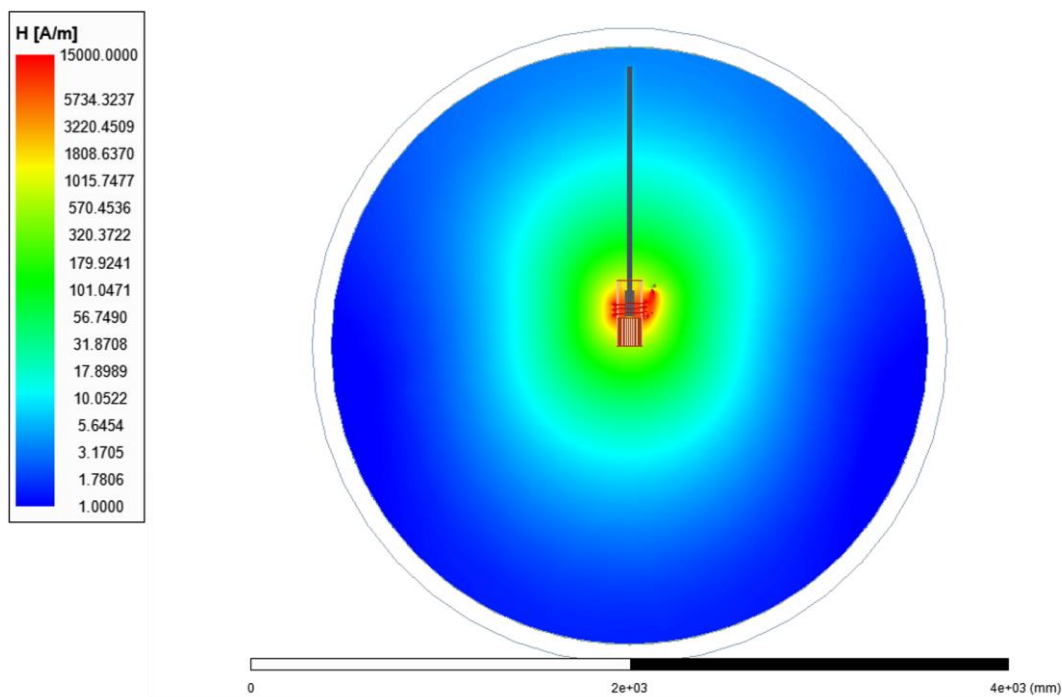
Obrázek 59: Model studeného kelímku v řezu



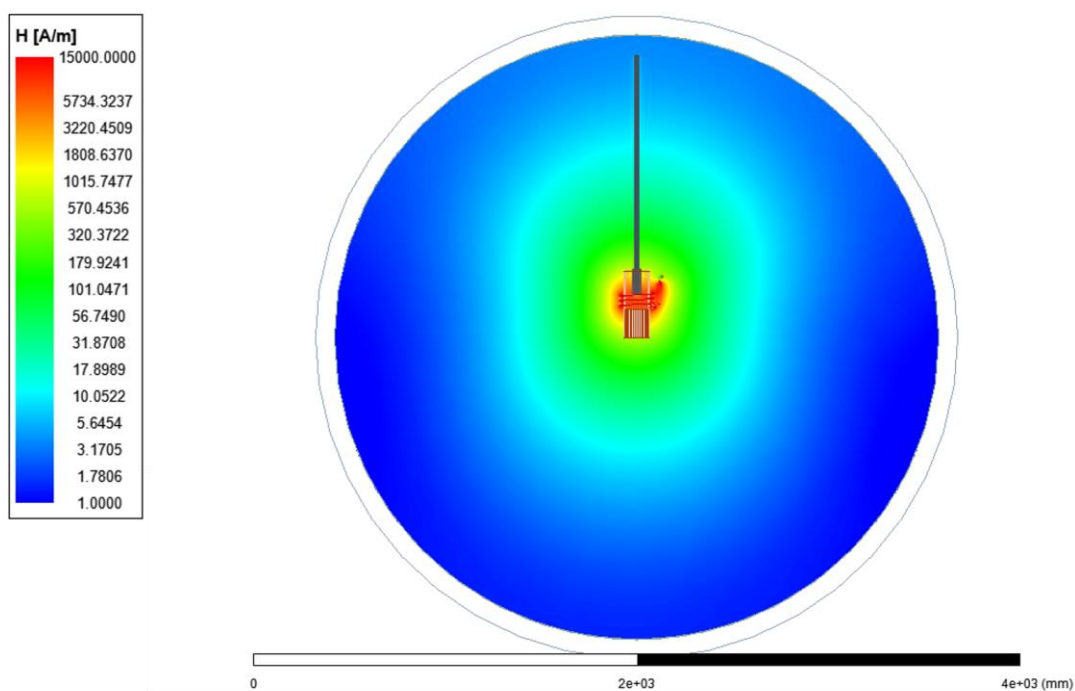
Obrázek 60: Detail studeného kelímku v řezu



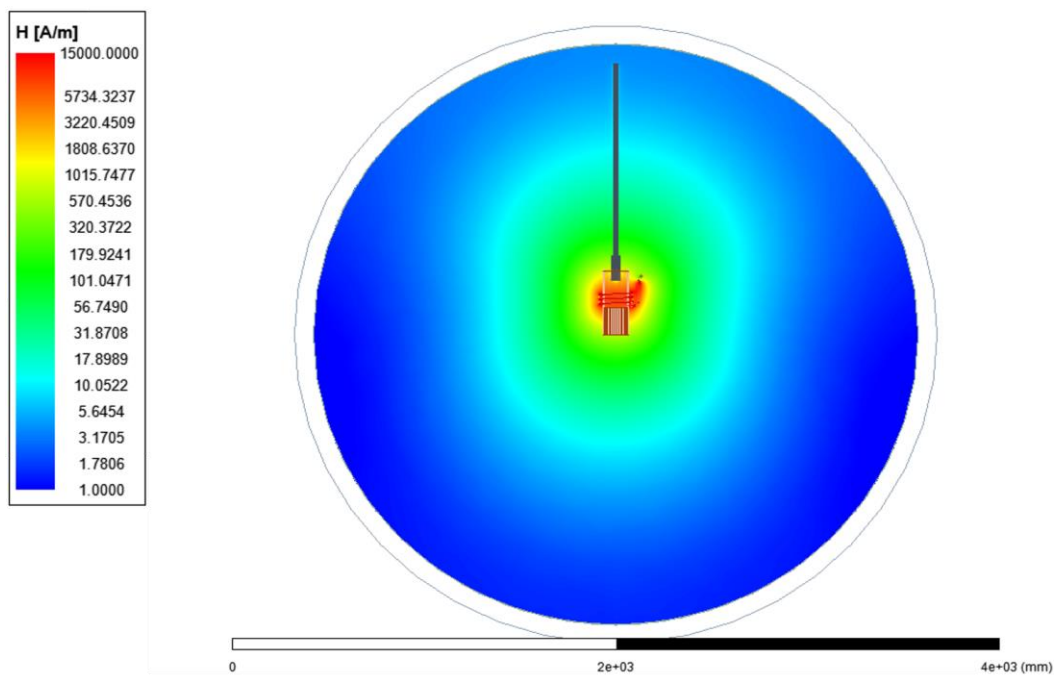
Obrázek 61: Model studeného kelímku s kalorimetrem



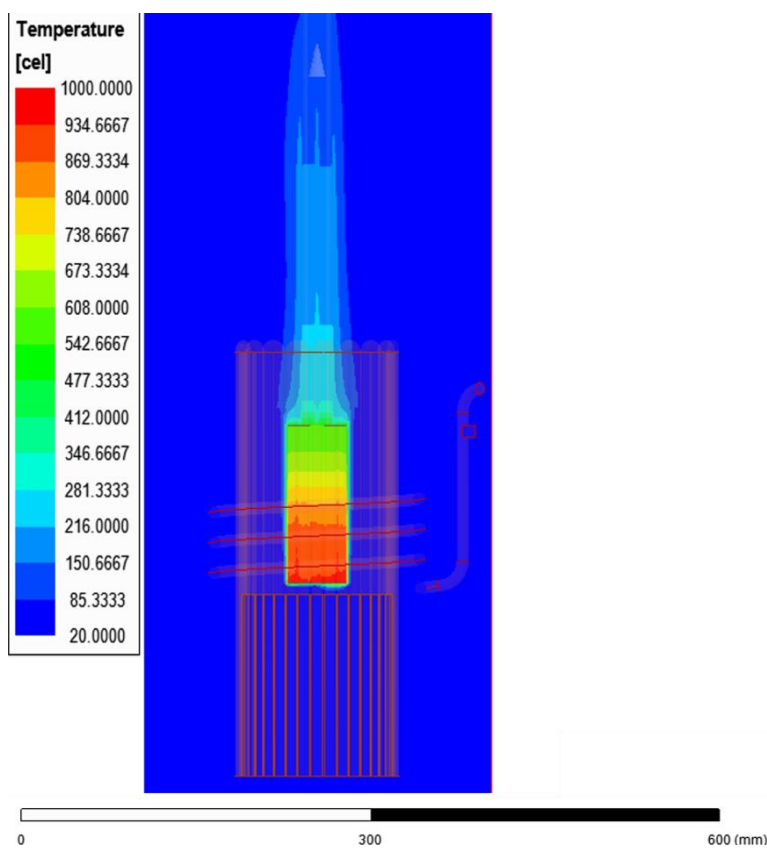
Obrázek 62: Rozložení intenzity elektromagnetického pole poloha 10 mm



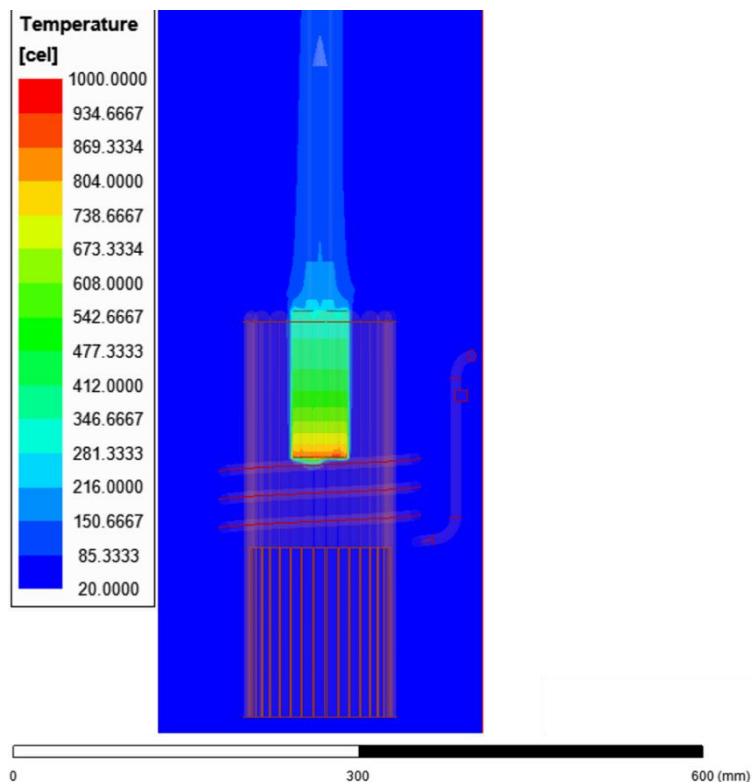
Obrázek 63: Rozložení intenzity elektromagnetického pole poloha 80 mm



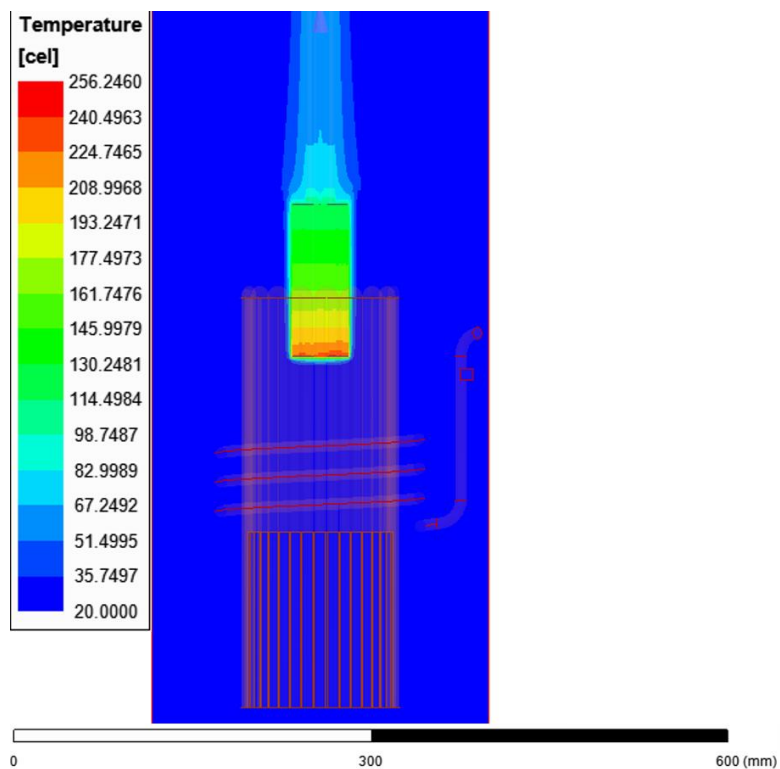
Obrázek 64: Rozložení intenzity elektromagnetického pole poloha 150 mm



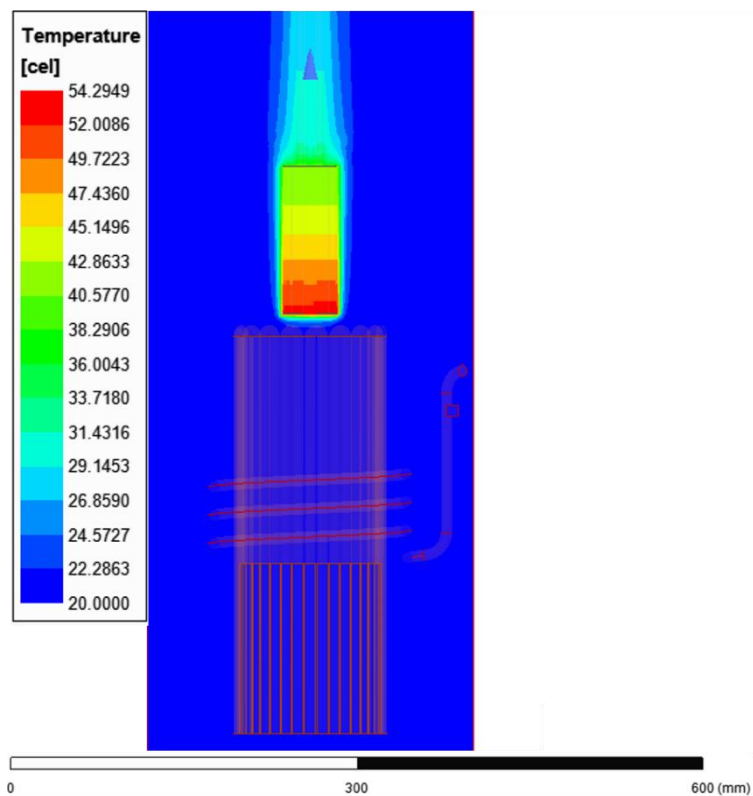
Obrázek 65: Rozložení teploty na povrchu kalorimetru poloha 10 mm



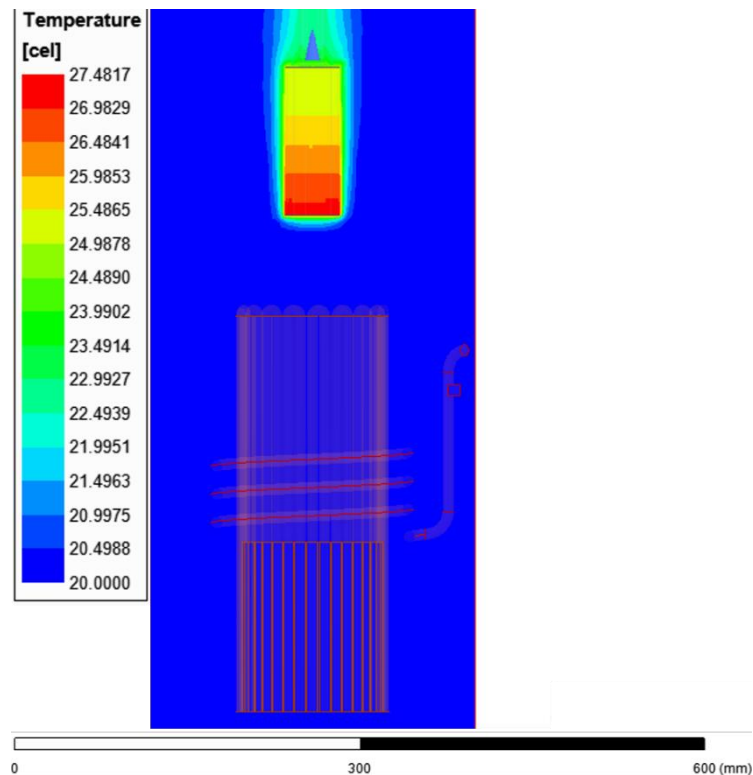
Obrázek 66: Rozložení teploty na povrchu kalorimetru poloha 80 mm



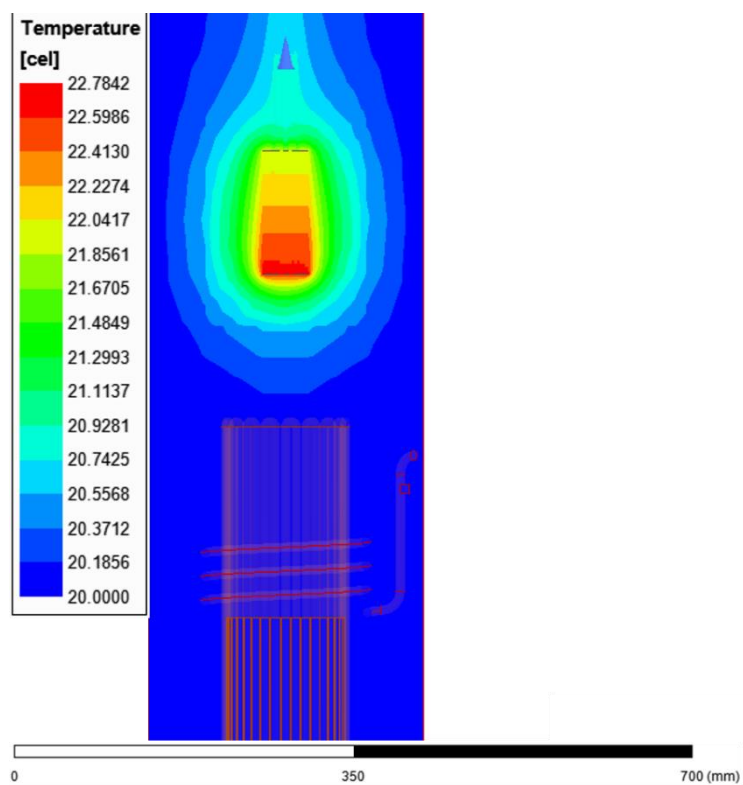
Obrázek 67: Rozložení teploty na povrchu kalorimetru poloha 150 mm



Obrázek 68: Rozložení teploty na povrchu kalorimetru poloha 220 mm



Obrázek 69: Rozložení teploty na povrchu kalorimetru poloha 290 mm



Obrázek 70: Rozložení teploty na povrchu kalorimetru poloha 360 mm

Příloha E: Elektrické schéma manipulátoru