



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

## AUTOMATIZACE A ŘÍZENÍ DEPOZICE MULTIVRSTEV METODOU IBS/IBAD

AUTOMATION AND CONTROL OF MULTILAYERS DEPOSITION BY IBS/IBAD

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MICHAL PAVERA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MICHAL URBÁNEK, Ph.D.

BRNO 2011



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Michal Pavera

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Fyzikální inženýrství a nanotechnologie (3901T043)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Automatizace a řízení depozice multivrstev metodou IBS/IBAD**

v anglickém jazyce:

### **Automation and control of multilayers deposition by IBS/IBAD**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při depozici multivrstev pro spintroniku, případně fotoniku je nutné dosáhnout velmi dobré opakovatelnosti depozičního procesu. Přesné nastavení a kontrola pracovních parametrů iontových zdrojů spolu s automatizací výměny terčů umožní opakovatelnou tvorbu tenkých vrstev s kontrolou tloušťky s předností desetin nanometru.

Cíle diplomové práce:

- Navrhněte a realizujte ovládací software v prostředí LabView
- Navrhněte a realizujte případné mechanické úpravy depoziční aparatury tak, aby byl splněn požadavek na maximální automatizaci.
- Proved'te testování automatické depozice multivrstev

Seznam odborné literatury:

H. R. Kaufman, J. J. Cuomo and J. M. E. Harper "Technology and applications of broad-beam ion sources used in sputtering." J. Vac. Sci. Technol. 21 3, 725-735 (1982).

J. Travis and J. Kring, "LabVIEW for Everyone: Graphical programming made Easy & Fun", Prentice Hall PTR (2006).

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Urbánek, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

---

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá automatizací depozičního procesu metodou iontového naprašování a iontového naprašování za použití asistujícího iontového svazku. Práce obsahuje výkresovou dokumentaci mechanických úprav depoziční komory navržených za účelem ovládní clony substrátu a otáčení terče pomocí krokových motorů. Jsou prezentovány způsoby ovládní krokových motorů a řešeny problémy s jejich přesným nastavením. Dalším úkolem je návrh systému pro počítačové řízení depozičního procesu. Jsou diskutovány způsoby ovládní iontových zdrojů, měřky tlaku, průtokoměru, tloušťkoměru a jejich propojení s počítačem prostřednictvím sběrnice RS-232 a analogově digitálních převodníků. Dále je navržen ovládací program v programovacím nástroji LabVIEW, s jehož pomocí je možná automatická depozice multivrstev. Na závěr je provedeno testování automatické depozice a výsledky jsou komentovány.

## **Klíčová slova**

Iontové naprašování, IBAD, IBS, depozice tenkých vrstev, LabVIEW.

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the automation of the deposition process by ion beam sputtering and ion beam assisted deposition. This work contains drawings of mechanical adjustments of the deposition chamber designed to control shutter and rotation of the target using stepper motors. There are presented ways to control stepper motors and troubleshoot their exact settings. Another task is to design a system for computer control of the deposition process. There are discussed ways to control the ion sources, pressure meter, flow meter and thickness meter, and their connection to a PC via RS-232 and analog-digital converters. It is also designed control program in LabVIEW, which allow automated multilayer deposition. Last part of the thesis deals with testing automatic deposition and results are commented.

## **Keywords**

Ion sputtering, IBAD, IBS, thin film deposition, LabVIEW.

PAVERA, M. *Automatizace a řízení depozice multivrstev metodou IBS/IBAD*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 89 s. Vedoucí diplomové práce  
Ing. Michal Urbánek, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Automatizace a řízení depozice multivrstev metodou IBS/IBAD“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně 27. května 2011

.....  
Podpis autora

## **Poděkování**

Toto poděkování bych rád věnoval všem, kteří se jakkoli podíleli na vzniku této diplomové práce. V první řadě vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Urbánkovi, PhD., za vedení a cenné podněty. Dále děkuji Prof. RNDr. Jiřímu Spoustovi, PhD., za připomínky při vypracování této práce. Rád bych také poděkoval svým rodičům za všestrannou podporu při studiu a také doktorandům z laboratoře 518 za poskytnutí užitečných rad.



# Obsah

Úvod .....	1
1 Teoretický úvod.....	2
1.1 Historie.....	2
1.2 Interakce iontů s atomy terče .....	3
1.3 Růst tenkých vrstev .....	6
1.4 Iontové naprašování .....	8
2 Popis depoziční aparatury .....	10
2.1 Depoziční komora.....	11
2.2 Širokosvazkové iontové zdroje Kaufmanova typu .....	12
2.3 Držák terčů.....	13
2.4 Zakládací komora s držákem substrátu.....	13
2.5 Clona substrátu .....	14
3 Přístroje .....	16
3.1 Rotační vývěva .....	16
3.2 Kryogenní vývěva.....	16
3.3 Stabilizované napěťové a proudové zdroje.....	17
3.4 Měrka tlaku .....	18
3.5 Průtokoměr.....	19
3.6 Tloušťkoměr .....	19
4 Postup zahájení depozice .....	20
4.1 Spuštění kryopumpy .....	20
4.2 Příprava aparatury a založení vzorku.....	20
4.3 Depozice multivrstev .....	21
4.4 Vyjmutí vzorku z aparatury .....	21
4.5 Zapálení výboje a extrakce iontů .....	22
5 Konstrukční a elektrické úpravy .....	23
6 Automatizace přístrojů .....	26
7 Ovládací program.....	29
7.1 LabVIEW .....	29
7.2 Program Kaufman v2.0.....	30
7.3 Hlavní program .....	31
7.4 Uživatelské rozhraní .....	32

8	Testování automatické depozice.....	40
	Závěr .....	42
	Dodatek A. Počítačová komunikace s přístroji.....	43
	A.1 Měrka tlaku Balzers TPG300.....	43
	A.2 Průtokoměr 247.....	44
	A.3 Tloušťkoměr STM 100/MF.....	46
	A.4 Iontové zdroje.....	48
	A.5 Clona substrátu a otáčení terčem.....	50
	A.6 Propojení s počítačem .....	53
	Dodatek B. Programy a podprogramy.....	54
	B.1 Základy programování v LabVIEW.....	54
	B.2 Měrka tlaku Balzers TPG.....	56
	B.3 Průtokoměr MKS 247.....	59
	B.4 Tloušťkoměr STM 100/MF.....	61
	B.5 Krokové motory Microcon SX23-2727.....	65
	B.6 Iontové zdroje.....	71
	B.7 Vzájemné propojení .....	85
	Literatura.....	87
	Seznam příloh .....	88

# Úvod

Tenkové vrstvy se v dnešní době staly nedílnou součástí běžného života. Jejich uplatnění můžeme nalézt zejména v elektrotechnice a optice. Správná příprava tenkých vrstev požadovaných parametrů je tedy velmi důležitá.

Předkládaná diplomová práce se zabývá depozicí tenkých vrstev pomocí metody iontového naprašování. K tomuto účelu je na Ústavu fyzikálního inženýrství určena depoziční aparatura Kaufman. Pomocí tohoto přístroje jsou připravovány například tenké vrstvy a multivrstvy ke studiu magnetických vlastností obří magnetorezistence, apod.

Pro správné pochopení procesu depozice je v prvních kapitolách popsán teoretický princip iontového naprašování. Následující kapitoly se zabývají popisem depoziční aparatury, jejich mechanických a elektrických částí a také přístrojů, které se při depozici používají.

Hlavní část diplomové práce je věnována procesu automatizace depozičního procesu a způsobu komunikace s dílčími přístroji. Dále se zabývám mechanickými úpravami depoziční komory, aby bylo možno ovládat clonu substrátu a držák terčů pomocí krokových motorů.

Před začátkem práce na automatizaci depozičních procesů probíhaly veškeré depozice manuálně. Automatizaci iontových zdrojů jsem řešil již v bakalářské práci, kde byly navrženy a realizovány elektrické úpravy stabilizovaných zdrojů. Pomocí těchto úprav je možné zdroje ovládat prostřednictvím analogově digitálních převodníků. V bakalářské práci byl rovněž navržen program pro ovládání iontových zdrojů, ten však bylo nutné přepracovat. Ovládání clony substrátu a držáku terčů pomocí krokových motorů nebylo až do doby vzniku této práce realizováno.

Na závěr předložené diplomové práce jsou uvedeny výsledky testování ovládání aparatury provedením zkušební depozice.

# 1 Teoretický úvod

Následující kapitola se zabývá teoretickým základem nutným k pochopení procesů, které vedou k naprašování částic a tvorbě tenkých vrstev. Naprašováním, nebo také nanášením tenkých vrstev je myšlen děj, kdy na povrch substrátu dopadají částice, které tak vytvářejí vrstvu deponovaného materiálu.

## 1.1 Historie

Anglicky se proces naprašování označuje jako sputtering a toto slovo vychází z latinského sputo. Sputo lze do češtiny přeložit jako vyplivovat, což ve spojení s dějem interakce částic a povrchu materiálu trefně vystihuje podstatu naprašování. Ačkoli by inspirace latinským jazykem mohla naznačovat, že k objevu došlo již za římské říše, opak je pravdou.

První výskyt slova depozice (anglicky physical vapour deposition) je datován do roku 1966. V tomto roce bylo poprvé toto slovo spojeno s procesem naprašování v knize „Vapour deposition“ [1] autorů C. F. Powella, J. H. Oxleyho a J. M. Blogera Jr. Samotná depozice však byla objevena mnohem dříve.

Objev depozice je úzce spjat s vývojem vakuové techniky, elektřiny, magnetismu a chemií plynů. Roku 1640 byla vynalezena první pístová vakuová pumpa. Jejím vynálezcem byl Otto von Guericke a byla určena k čerpání vody z těžebních dolů. Michael Faraday jako první roku 1838 použil vakuovou pumpu k vytvoření vakua v aparatuře, ve kterém pozoroval doutnavý výboj. V této aparatuře se mu podařilo zformovat plasma mezi dvěma mosaznými elektrodami. Přestože se mnozí zabývali studiem doutnavého výboje, teprve William Robert Grove si roku 1852 všiml dějů, které proces doutnavého výboje provázely [2]. Využil Faradayových poznatků a jako první začal studovat proces, který nazýváme naprašování.

W. R. Grove zkoumal výboj ve vakuové trubici mezi kovovou jehlou a leštěnou stříbrnou destičkou. Při zapojení stříbrné destičky jako anody a kovové jehly jako katody pozoroval rozklad katody a změnu barvy anody. Celý děj je možné popsat následovně. Na katodu dopadají ionty plynu (ty vznikají během doutnavého výboje), které vyrážejí atomy z katody. Tyto atomy se usazují na anodě, na které vytvářejí tenký povlak a mění tak její barvu. Grove poznatky publikoval v článku pro Transactions of the Royal Society. Tento článek ale nevyvolal příliš pozornosti. Grove je dnes známý převážně jako vynálezce plynového galvanického článku.

V dalších letech docházelo k bližšímu zkoumání procesu naprašování, avšak výsledky nebyly příliš průkazné a měření byla nereprodukovatelná. Ve 30. letech 20. století byly hlavní nevýhodou této metody velké energetické ztráty, způsobené pohybem iontů přes poměrně hustý plyn, který byl nutný k udržení výboje. Metoda vyžadovala vysoké napětí, ale energie dopadajících iontů byly malé a naprašování neefektivní.

Roku 1930 vyvinul Frans Michel Penning takzvanou Penningovu past [3]. Jednalo se o zařízení, ve kterém bylo za pomoci kombinace statických elektrických a magnetických polí možné ionizovat plyny a vytvářet plasma pouze v bezprostřední blízkosti povrchu terče

naprašovaného materiálu. Díky tomu se mohlo snížit napětí a tlak v komoře a proces naprašování se značně zefektivnil. Tomuto typu naprašování se říká magnetronové.

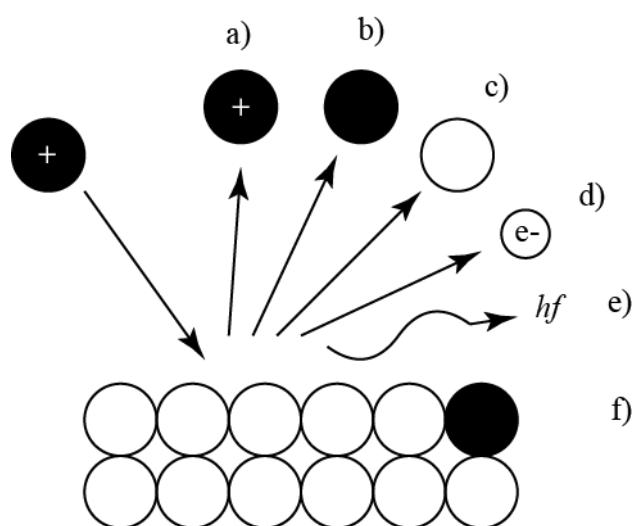
Během následujících let byly vyvinuty další metody naprašování (např. iontové [5][6]), které byly spojeny s dalšími významnými vynálezy (např. vynález iontového zdroje).

Dnes hraje proces naprašování významnou roli při výrobě nanometrových vrstev používaných například v optice či elektrotechnice.

## 1.2 Interakce iontů s atomy terče

Interakcí iontů s atomy terče rozumíme procesy, ke kterým dochází při dopadu iontů o různých energiích a hmotnostech na terč tvořený různě hmotnými atomy pevných látek.

V závislosti na energii primárních iontů může docházet na povrchu terče k celé řadě fyzikálních procesů. Jevy spojené s interakcí iontů o energiích 1 eV až 1 MeV s povrchem pevné látky jsou na Obrázek 1.1.



**Obrázek 1.1:** Interakce dopadajících iontů s povrchem pevné látky, a) odraz a zpětný rozptyl primárních iontů, b) záchyt primárních iontů, jejich neutralizace a následná reemise, c) odprašování povrchových vrstev terče, d) e) excitace atomových hladin vzorku a následná emise fotonů či elektronů, f) implementace dopadajících iontů do terče

Z rozsahu energií je patrné, že vlnová délka de Broglieho vlny iontů je i při nejnižších energiích mnohem menší než je mřížková konstanta pevné látky. De Broglieho vlnovou délku můžeme odvodit následovně [4]. Hybnost částice o hmotnosti  $m$  a rychlosti  $v$  je dána vztahem

$$p = mv \tag{2.1}$$

a de Broglieho vlnová délka tedy nabývá hodnot

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}. \quad (2.2)$$

Budeme-li zvažovat částice, jejichž rychlost je mnohem menší než rychlost světla ( $v \ll c$ ), není nutné zvažovat relativistické účinky a kinetická energie takových částic bude

$$E_k = \frac{p^2}{2m}. \quad (2.3)$$

Úpravou a dosazením do rovnice pro de Broglieho vlnovou délku získáme vztah

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}} \quad (2.4)$$

Pokud budeme zvažovat reálný případ pro ionty argonu (relativní atomová hmotnost argonu je 39,944 amu) dopadající na povrch mědi (mřížková konstanta  $a_0 = 3,615 \text{ \AA}$ ), pak z rovnice přímo vychází, že de Broglieho vlnová délka je značně menší.

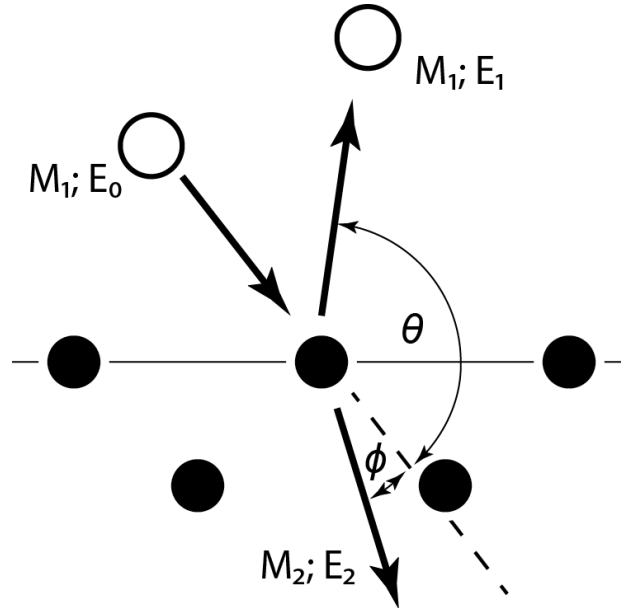
Díky tomu lze vzájemnou interakci mezi dopadajícími ionty a atomy terče dostatečně přesně popsat jako pružnou srážku dvou hmotných bodů, tzv. binární srážku. V takovém případě se zachovává energie a hybnost celého systému.

V Tabulka 1.1 jsou shrnuty procesy, ke kterým dochází při různých energiích primárních iontů.

Energie primárních iontů	Důsledek
1 – 30 eV	Dochází k rozptylu primárních iontů na povrchu materiálu. Ionty nepronikají do povrchu a povrch není poškozován. Při hodnotě energie okolo 20 eV začíná docházet k odprašování materiálu.
30 – 1000 eV	Již dochází k binárním srážkám a výtěžek odprašování materiálu z terče lineárně roste v závislosti na rostoucí energii. Dopadající ionty se dostávají do hloubek několika atomových vrstev materiálu. Na povrchu materiálu dochází k vytváření vakancí a intersticiálních poruch.
1 – 30 keV	Je dosaženo maximálního výtěžku při odprašování. Materiál je poškozován tepelnými klíny a dochází k vzájemnému propojování defektů. Ionty pronikají do nižších atomových vrstev. Vyrůstá pravděpodobnost excitace atomů a následné deexcitace fotonů a elektronů.
30 – 1000 keV	Výtěžek odprašování postupně klesá, což je způsobeno procesem, při kterém jsou odprašené atomy ionizovány a excitovány. Povrchy jsou silně poškozovány a defekty se propojují i do hloubky. Dochází k excitaci atomů a následní deexcitaci fotonů a elektronů.

**Tabulka 1.1:** Procesy probíhající na povrchu terče v závislosti na energii dopadajících iontů

Interakci iontů s atomy si můžeme popsat užitím základní kvantové teorie dvouatomového systému [7]. Uvažujme pouze elastické srážky (Obrázek 1.2), při kterých je zachována kinetická energie. Kolize mezi dvěma částicemi tak mohou být zcela řešeny využitím zákona zachování energie a zákona zachování hybnosti.



**Obrázek 1.2:** Elastická srážka

Uvažujme tedy dvě částice, jejichž hmotnost je  $M_1$  (hmotnost dopadající částice) a  $M_2$  (hmotnost atomu terče). Počáteční rychlost jedné z částic je  $v_0$ . Takové částici odpovídá kinetická energie

$$E_0 = \frac{1}{2} M_1 v_0^2. \quad (2.5)$$

Následkem elastické kolize budou energie a rychlosti přerozděleny mezi částice projektilu a atomy terče. Jejich velikosti budou  $v_1$  a  $v_2$ , respektive  $E_1$  a  $E_2$ . Následkem srážky dojde i k vychýlení trajektorií obou částic. Jednotlivé úhly označme jako úhel odrazu  $\phi$  a úhel rozptylu  $\theta$ . Řešením rovnic zákona zachování energie a zákona zachování hybnosti dojdeme k následujícím úvahám

$$E_0 = \frac{1}{2} M_1 v_0^2 = \frac{1}{2} M_1 v_1^2 + \frac{1}{2} M_2 v_2^2, \quad (2.6)$$

$$M_1 v_0 = M_1 v_1 \cos \theta + M_2 v_2 \cos \phi, \quad (2.7)$$

$$0 = M_1 v_1 \sin \theta + M_2 v_2 \sin \phi. \quad (2.8)$$

Úpravou těchto rovnic dospějeme k výrazům

$$(M_2 v_2)^2 = (M_1 v_0)^2 + (M_1 v_1)^2 - 2 M_1 v_0 v_1 \cos \theta, \quad (2.9)$$

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \cos \theta \pm \left[ \left( \frac{M_1}{M_1 + M_2} \right)^2 \cos^2 \theta + \frac{M_2 - M_1}{M_1 + M_2} \right]^{1/2}, \quad (2.10)$$

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{M_1 \cos \theta \pm \sqrt{M_2^2 - M_1^2 \sin^2 \theta}}{M_1 + M_2}. \quad (2.11)$$

Úpravou části rovnice, která se nachází pod odmocninou, dostaneme

$$\left(\frac{M_1}{M_1 + M_2}\right)^2 \cos^2 \theta = -\frac{M_2 - M_1}{M_1 + M_2}, \quad (2.12)$$

$$\cos^2 \theta = 1 - \frac{M_2^2}{M_1^2}. \quad (2.13)$$

Uvažujme případ, kdy  $M_1 > M_2$ . V tomto případě úhel  $\theta$  může nabývat pouze hodnoty  $0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$ . Jedná se o limity úhlu, pod kterým může být částice o hmotnosti  $M_1$  rozptýlena do prostoru. Pokud by byla hodnota  $\theta$  větší, byl by poměr  $\frac{v_1}{v_0}$  imaginární, nebo negativní, což by z fyzikálního hlediska nemělo význam.

V opačném případě, tedy  $M_1 < M_2$ , může úhel  $\theta$  nabývat hodnoty v celém rozsahu  $0 \leq \theta \leq \pi$ . Poměr  $\frac{v_1}{v_0}$  může nabývat kladných, nebo záporných hodnot. Záporné hodnoty jsou fyzikálně nereálné a neuvažují se.

Poměr energií projektilu před a po srážce bude pro reálné částice roven

$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{\left[ \cos \theta \pm \sqrt{\left(\frac{M_2}{M_1}\right)^2 - \sin^2 \theta} \right]^2}{\left(1 + \frac{M_2}{M_1}\right)^2}. \quad (2.14)$$

Obdobně lze odvodit i poměr energie atomu terče po srážce a energie primárního iontu

$$\frac{E_2}{E_0} = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cos^2 \phi. \quad (2.15)$$

### 1.3 Růst tenkých vrstev

Tenkou vrstvou rozumíme vrstvu, jejíž jeden z prostorových rozměrů se pohybuje v řádech nanometrů (pokud je navíc jeden z rozměrů menší než 10 nm hovoříme o ultratenkých vrstvách).

Při dopadu atomu vyraženého z terče na substrát dochází v ideálním případě (energie dopadajícího atomu je dostatečná) k vytváření tenké vrstvy. Dopadající atomy migrují po povrchu, dokud nenaleznou energeticky výhodnou pozici (nejčastěji jde o místa na substrátu, ve kterých se nacházejí defekty, intersticiály, vakance apod.). V této pozici se atom „usadí“ a vytvoří příslušnou vazbu. Tomuto procesu se říká adsorbce. V případě, že má dopadající atom energii příliš vysokou, může dojít i k jeho odražení od povrchu. Pokud je navíc dopadajícímu atomu dodána tepelná energie, může dojít k desorbci, tedy vypuzení atomu ze substrátu.

Existují tři základní modely růstu tenkých vrstev na substrátu [8]. Jde o modely

1. ostrůvků (Volmer - Weber),
2. vrstev (Frank – Van der Merwe),
3. Stranski – Krastanov.



Pokud se při dopadu atomů na povrch substrátu vytvářejí clustery, uplatňuje se ostrůvkový model. Clustery jsou myšleny energeticky výhodné seskupení atomů. Tyto clustery následně rostou v prostoru přijímáním a vázáním dalších naprašovaných atomů. Při kompletním zaplnění povrchu ostrůvky dojde k jejich vzájemnému propojení a vytvoření kontinuální vrstvy. Ostrůvky vznikají v důsledku silnějších vazeb mezi samotnými naprašovanými atomy, než mezi atomy a povrchem substrátu. Tímto způsobem jsou vytvářeny vrstvy při depozici kovů nebo polovodičů na povrch izolantů.

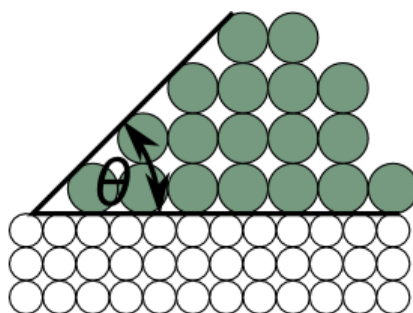
Model Frankův – Van der Merweův má opačný charakter. Naprašované atomy se vážou přímo k atomům substrátu, protože tyto vazby jsou silnější, než vzájemné vazby mezi naprašovanými atomy. Tímto způsobem dochází k postupnému vytvoření kontinuální monovrstvy. Další vrstva se stejným způsobem vytváří na první vzniklé monovrstvě a celý proces se opakuje. Vazby mezi atomy dvou naprašovaných monovrstev už ale nejsou tak silné a energeticky výhodné. Příkladem, kdy se uplatňuje tento model, může být epitaxní růst krystalu polovodičů.

Poslední model, tedy Stranskiho – Krastanovův, je kombinací předešlých dvou. V tomto modelu jsou nejdříve vytvořeny vazby mezi naprašovanými atomy a atomy substrátu. V momentě, kdy je na povrchu substrátu nadeponovaná jedna nebo více monovrstev, dochází k formování ostrůvků. Tento model je nejběžnější a uplatňuje se v systému vazeb kov – kov nebo kov – polovodič.

Jedná se o termodynamické tendence nalezení energeticky nejvýhodnější vazby. Definujme si veličinu povrchové energie ( $\gamma$ ) jako vazebnou energii mezi částicemi na povrchu materiálu. Částice se snaží tuto energii minimalizovat. Při růstu vrstvy můžeme definovat tři různé typy této energie: energie mezi substrátem a deponovanou vrstvou ( $\gamma_{fs}$ ), energie mezi substrátem a naprašovanými částicemi ( $\gamma_{sv}$ ) a energie mezi deponovanou vrstvou a naprašovanými částicemi ( $\gamma_{fv}$ ). Pro energetický popis meziatomových vazeb a lepší porozumění jednotlivým modům se používá Youngova rovnice

$$\gamma_{sv} = \gamma_{fs} + \gamma_{fv} \cos \theta, \quad (2.16)$$

kde  $\theta$  je úhel mezi stěnou, kterou tvoří částice naprašovaného materiálu, a povrchem substrátu. Názorně je možné si tento úhel demonstrovat na stěně ostrůvků (viz Obrázek 1.3).



**Obrázek 1.3:** Úhel mezi stěnou ostrůvku a povrchem substrátu

Z podstaty modelu ostrůvků platí, že  $\theta > 0$  a

$$\gamma_{sv} < \gamma_{fs} + \gamma_{fv}. \quad (2.17)$$

Povrchové napětí mezi substrátem a deponovanou vrstvou je obecně mnohem menší než mezi materiálem a naprašovanými částicemi. Z tohoto důvodu můžeme hodnotu  $\gamma_{fs}$  zanedbat. Zbytek rovnice nám naznačuje, že k růstu ostrůvků dojde tehdy, když je povrchové napětí deponované vrstvy větší než povrchu substrátu.

Pro model Frankův – Van der Merwův je typické, že  $\theta \cong 0$  a

$$\gamma_{sv} \geq \gamma_{fs} + \gamma_{fv}. \quad (2.18)$$

Nakonec pro model Stranskiho – Krastanovův platí

$$\gamma_{sv} > \gamma_{fs} + \gamma_{fv}. \quad (2.19)$$

V limitním případě, když jsou atomy deponovaného materiálu a substrátu shodné, lze položit  $\gamma_{fs} = 0$ . Obecně lze tedy říct, že materiály s malou povrchovou energií budou tvořit vazby s deponovanými atomy a preferovaný mód bude Frankův – Van der Merwův. Při velkých tloušťkách deponovaného materiálu se bude povrchové napětí zvyšovat. Ze snahy o jeho snížení se bude uplatňovat mód Stranskiho – Krastanova.

Velmi často je třeba deponovat i vícevrstvé struktury (tzv. multivrstvy). Při přípravě takových vrstev je však žádoucí, aby rozhraní mezi jednotlivými vrstvami deponovaných materiálů bylo dostatečně ostré [9].

Vlastnosti naprašované vrstvy jsou převážně ovlivněny energií dopadajících atomů. Tato energie je spojena s procesem promíchávání vrstev jednotlivých rozhraní. Jde o proces, kdy atomy o velkých energiích dopadají na povrch deponovaného materiálu, vnikají pod povrch a rozmíchávají atomy na rozhraní.

Druhým parametrem ovlivňujícím tvorbu rozhraní mezi vrstvami, je meziatomová mobilita. Tento parametr je úzce spjat s teplotou substrátu. Nízká teplota substrátu minimalizuje transport částic v oblasti rozhraní a vede k akumulaci ostrůvků a zvyšování drsnosti. Při zvýšení teploty dojde ke zvýšení meziatomové mobility a snížení drsnosti povrchu. Vysoká teplota může také aktivovat rekrytalizaci, která v konečném důsledku opět vede k rozmíchávání rozhraní.

Dostatečně ostré rozhraní je tedy spjato s přesnou kombinací energie atomů a teplotou substrátu.

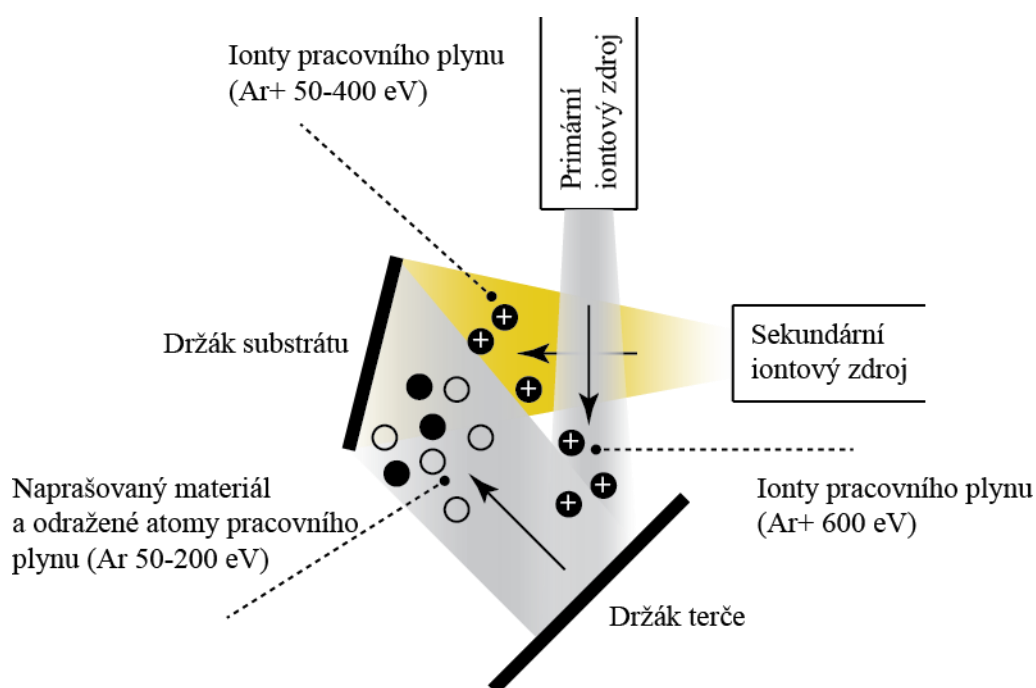
## 1.4 Iontové naprašování

Metody IBS/IBAD (Ion Beam Sputtering/Ion Beam Assisted Deposition), tedy naprašování iontovým svazkem, respektive naprašování za použití asistujícího iontového svazku, patří k základním metodám iontového naprašování. Těchto metod je využíváno i v depoziční aparatuře na Ústavu fyzikálního inženýrství.

Uspořádání jednotlivých částí má pro správnou funkčnost metody zcela zásadní význam. Reálné zařízení IBS/IBAD má následující podobu.

Jako pracovní médium se v iontovém zdroji využívají vzácné plyny. Důvodem je malá reaktivnost mezi atomy vzácného plynu a materiály, které nemají zcela zaplněný vodivostní pás. Nejčastěji se v iontovém zdroji používají plyny argonu. Ionty pracovního plynu jsou urychleny a dopadají na terč s energií v řádech stovek elektronvoltů. Úhel mezi dopadajícími ionty primárního zdroje a normálou plochy terče není kolmý, je nastaven tak, aby při vyražení atomů z terče docházelo k jejich přímému dopadu na substrát.

Ionty dopadající na terč předávají část své energie atomům terče a tím je z terče vyrážejí (viz Obrázek 1.4). Tyto ionty jsou na terči také neutralizovány a jako neutrální atomy (s energií v řádech desítek elektronvoltů) jsou terčem odraženy do prostoru depoziční komory. Atomy vyražené z terče dopadají na substrát, na kterém se tak postupně deponuje tenká vrstva. Na terč mohou také dopadat neutralizované atomy vzniklé z iontů iontového zdroje. Ty se na substrát neuchycují, ale pouze jej částečně zahřívají.



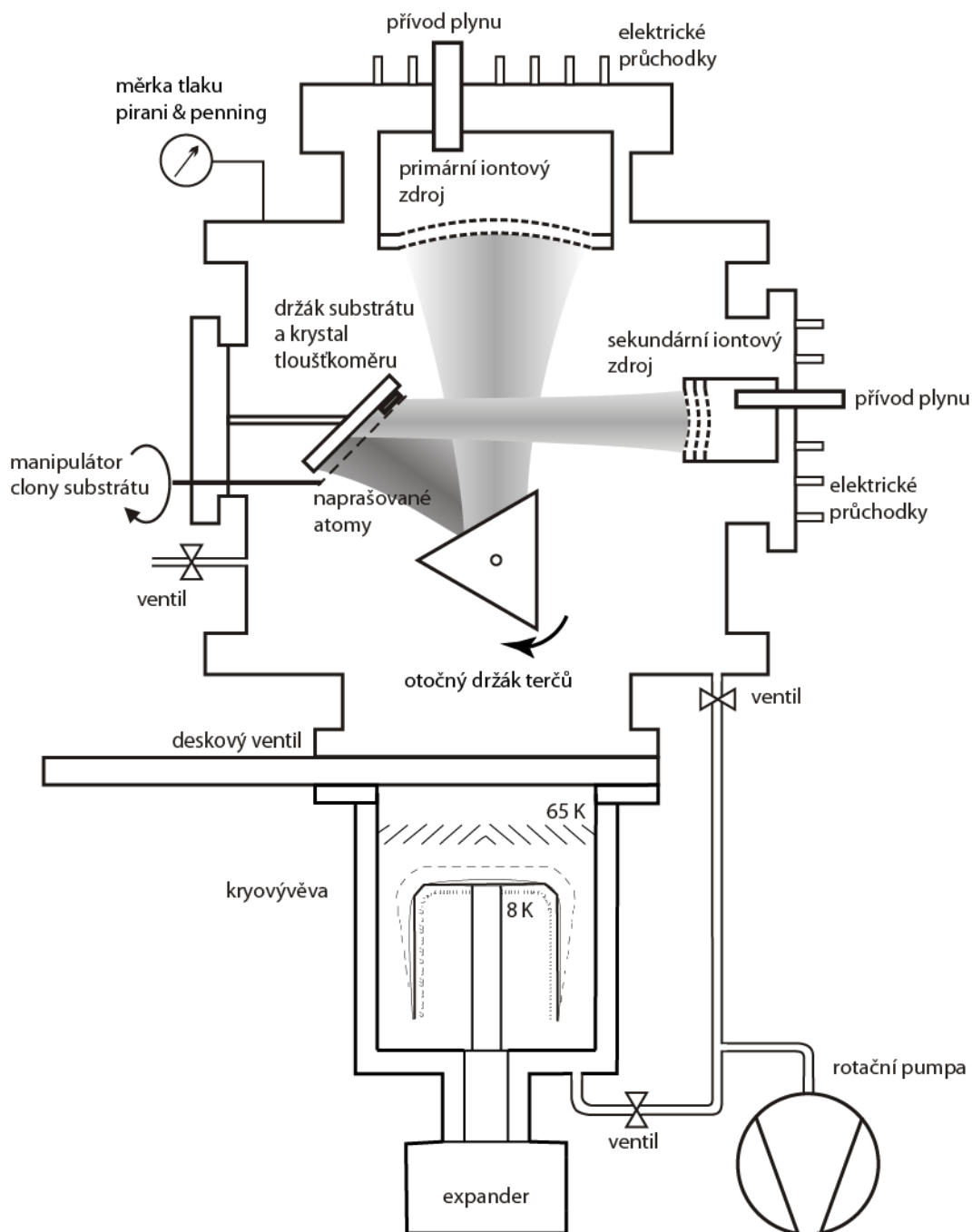
**Obrázek 1.4:** Princip metody IBS/IBAD

Pro metodu naprašování za použití asistujícího iontového svazku (IBAD) je k aparatuře připojen ještě druhý iontový zdroj. Ionty emitované tímto zdrojem mají energii nižší než ionty zdroje primárního a jsou emitovány přímo na substrát.

Využitím sekundárního iontového svazku za současné depozice primárním iontovým svazkem lze měnit fyzikální a chemické vlastnosti deponované vrstvy (např. adheze, drsnost, index lomu).

## 2 Popis depoziční aparatury

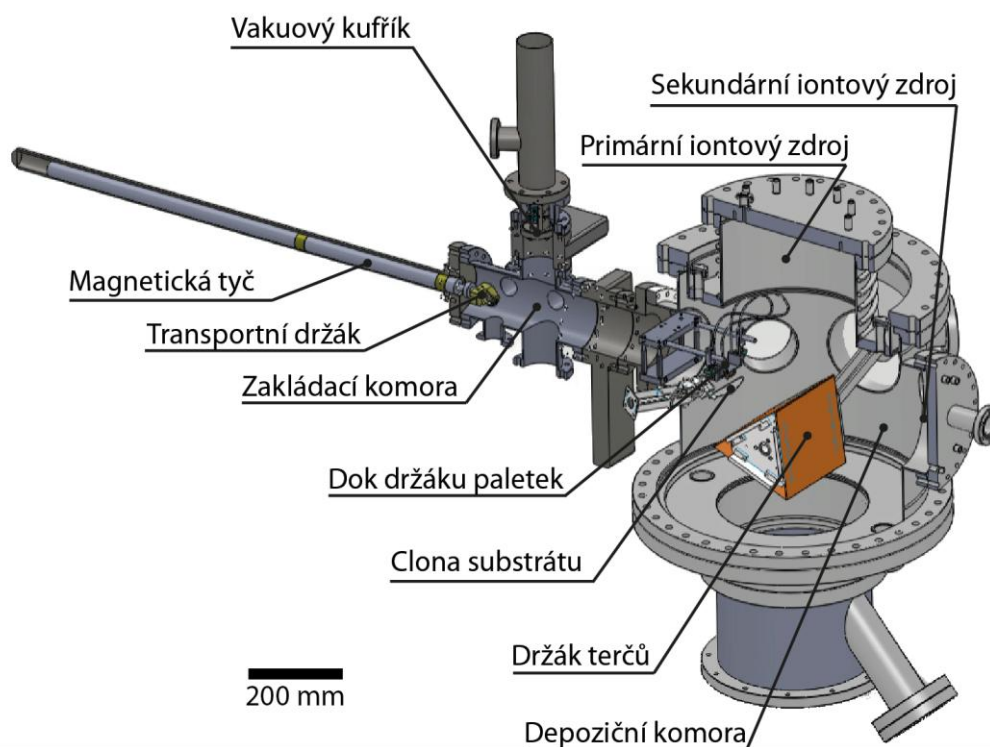
V současné době se na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně používá pro deposici tenkých vrstev mimo jiné iontové naprašování. K tomuto účelu slouží vysokovakuová depoziční aparatura (viz Obrázek 2.1), která obsahuje dva širokosvazkové iontové zdroje Kaufmanova typu. Vynálezcem těchto iontových zdrojů je Harold R. Kaufman, na jehož počest je celá aparatura familiárně nazývána „Kaufman“. Díky přítomnosti dvou iontových zdrojů lze celou aparaturu využívat nejen k iontovému leptání a naprašování (IBS – ion beam sputtering), ale i k naprašování s asistujícím iontovým svazkem (IBAD – ion beam assisted deposition).



Obrázek 2.1: Schéma depoziční aparatury „Kaufman“

Základním principem iontového naprašování je rozprašování materiálu terče pomocí urychlených iontů z iontového zdroje. Z terče jsou emitovány atomy naprašovaného materiálu směrem na substrát, kde kondenzují a tvoří tenkou vrstvu. Depoziční aparatura je sestavena z mnoha dílčích součástí. Ty lze pro zjednodušení rozdělit na pět základních celků (viz Obrázek 2.2):

- Depoziční komora.
- Širokosvazkové iontové zdroje Kaufmanova typu.
- Držák terče.
- Zakládací komora s držákem substrátu.
- Clona substrátu.



**Obrázek 2.2:** Model depoziční komory vytvořený v programu Autodesk Inventor

Detailnější pohled na dok držáku paletek, clonu substrátu a držák terčů je na Obrázek 2.3

## 2.1 Depoziční komora

Depoziční komora tvoří celkový skelet depoziční aparatury. Je navržena tak, aby do ní bylo možné osadit všechny nutné součásti, tedy oba iontové zdroje, držák terče i substrátu a clonu substrátu. Aparatura také obsahuje velké množství přírub, které jsou určeny pro přídatná zařízení, jako chlazení substrátu, měrky vakua nebo elektrické průchodky využívané například k napájení neutralizačního vlákna. Celkový počet přírub a jejich rozmístění po depoziční komoře je navrženo tak, aby bylo možné celou aparaturu různě modifikovat.

## 2.2 Širokosvazkové iontové zdroje Kaufmanova typu

Jak již bylo řečeno, depoziční komora je osazena dvěma iontovými zdroji Kaufmanova typu. Tyto iontové zdroje byly vynalezeny na počátku 60. let 20. století Haroldem R. Kaufmanem, který je vyvíjel jako pohon kosmických sond. Za tímto účelem měl mít svazek emitovaných iontů průměr až několik metrů.

Iontové zdroje Kaufmanova typu jsou variantou duoplasmatronu. Duoplasmatron je založen na následujícím principu. Katodové vlákno (např. wolfram) ve vakuové komoře emituje elektrony, které jsou urychlovány elektrickým polem směrem k anodě. Do vakuové komory je zároveň vsřikováno malé množství plynu (např. Ar). Atomy plynu se sráží s elektrony a vytváří se tak plasma, tedy shluk částic, ve kterém jsou atomy plynu nabity a ionizovány. Částice jsou dále urychlovány sérií mřížek (zpravidla dvou) a vytvářejí tak iontový paprsek značně urychlených částic. Při ideálních podmínkách má kladný iont rychlost

$$v_{iont} = \sqrt{2 \cdot \Delta\varphi \cdot \frac{Q_{iont}}{m_{iont}}}, \quad (3.1)$$

kde  $Q_{iont}$  je náboj iontu,  $m_{iont}$  je hmotnost iontu a  $\Delta\varphi$  je rozdíl potenciálů mezi místem vzniku iontů a místem dopadu.

Depoziční aparatura „Kaufman“ v laboratořích Ústavu fyzikálního inženýrství obsahuje dva iontové zdroje, které pro zjednodušení budeme v následujícím textu označovat jako primární a sekundární iontový zdroj.

Primární iontový zdroj je hlavním zdrojem iontů depoziční aparatury. Je umístěn na horní straně depoziční komory a vytváří iontový svazek o průměru cca 150 mm. Tento zdroj je využíván k odprašování atomů z terče. Z katody, tvořené wolframovým vláknem o průměru 0,5 mm, jsou termoemisí emitovány elektrony. Emitované elektrony jsou urychlovány napětím 40 V směrem k anodě. Do iontového zdroje je vháněn pracovní plyn, který je urychlenými elektrony ionizován. Z pracovních plynů se nejčastěji používá argon, případně jiné vzácné plyny. Důvodem použití vzácných plynů je jejich malá reaktivnost s atomy ostatních prvků a během procesu naprašování netvoří vazbu s deponovaným materiálem. Iontový zdroj dále obsahuje sérii permanentních magnetů a pólových nástavců. Ty se starají o efektivní zakřívování trajektorie urychlovaných elektronů a zvyšují tak ionizační účinky zdroje. Takto vytvořené ionty poté prochází sérií molybdenových mřížek. Jde o stínící a extrakční mřížku. Stínící mřížka má za úkol oddělit vytvářené plasma od zbytku komory, extrakční slouží k extrakci iontů do komory. Dle rozdílu potenciálů mezi iontovým zdrojem a terčem, na který ionty dopadají (nejčastěji 600 V) jsou ionty emitované z iontového zdroje značně urychlovány a jejich energie může dosahovat hodnot v rozmezí 50 – 1200 eV. Takto urychlené ionty poté dopadají na terč, odkud vyrážejí atomy požadovaného materiálu.

Sekundární iontový zdroj (vedlejší iontový zdroj) principiálně odpovídá primárnímu iontovému zdroji. Je však menší a může vytvořit iontový svazek o průměru cca 75 mm. Z technického hlediska navíc obsahuje decelerační mřížku, která je umístěna za extrakční

mřížkou a odstiňuje výbojovou komoru. I tyto extrakční mřížky jsou vyrobeny z molybdenu a rozdíl potenciálů jednotlivých mřížek se nastavuje v rozmezí 50 – 400 V. Sekundární iontový zdroj je umístěn z boku depoziční komory a natočen kolmo k držáku substrátu, emitované ionty tak dopadají přímo na substrát. Sekundární iontový zdroj se využívá k současnému ostřelování substrátu při deponování primárním svazkem, což značně ovlivňuje chemické a fyzikální vlastnosti deponovaného materiálu jako tvrdost nebo index lomu. Dále se sekundární iontový zdroj používá k leptání a čištění substrátu.

## 2.3 Držák terčů

Ionty emitované iontovým zdrojem dopadají na terč, ze kterého jsou následně vyráženy atomy požadovaného deponovaného materiálu. Depoziční aparatura „Kaufman“ je vybavena terčem ve tvaru trojbokého hranolu, který je umístěn ve středu depoziční komory (Obrázek 2.2, Obrázek 2.3). Na každou ze stěn tohoto hranolu lze umístit desku požadovaného materiálu, který chceme deponovat. Tento terč se nachází pod hlavním iontovým zdrojem a stěna s deponovaným materiálem je vůči dopadajícím iontům (např.  $\text{Ar}^+$ ) natočená o cca  $30^\circ$  tak, aby vyrážené atomy přímo dopadaly na substrát. Samotný terč je v depoziční komoře umístěn na pohyblivém rameni, které je pevně přichyceno k přírubě. Z druhé strany příruby jsou umístěny otočné ovládací prvky, kterými je možné pohybovat terčem vně depoziční komory. Celé rameno, respektive uchycení terče, je navrženo tak, aby bylo terčem možné pohybovat ve vertikálním směru a také aby bylo možné terčem otáčet. Oba pohyby jsou zajištěny systémem pák, kardanovou hřídelí a ozubeným soukolím. Pohyb ve vertikálním směru má za důsledek změnu vzdálenosti terče od substrátu a ovlivňuje dopad atomů na substrát. Rotaci samotného terče je zajištěno přesné nastavení úhlu, pod kterým z terče dopadají atomy na substrát. Protože je terč zároveň osazen třemi různými materiály, schopnost rotovat terčem umožňuje změnu deponovaného materiálu, i když je depoziční komora uzavřená. Takto lze jednoduchým způsobem deponovat struktury vícevrstvého charakteru.

Mezi primárním iontovým zdrojem a terčem je umístěno neutralizační vlákno (wolfram). Toto vlákno emituje elektrony a má za úkol neutralizaci svazku iontů. Toto vlákno se používá kvůli případné neutralizaci nabíjení terčů z nevodivých materiálů. Nabíjení je nežádoucí, protože snižuje počet atomů vyrážených z terče a tím depoziční rychlost klesá.

## 2.4 Zakládací komora s držákem substrátu

Z terče jsou vyráženy atomy naprašovaného materiálu, které dopadají na substrát. Substrát je umístěn na držáku v depoziční komoře v pevné pozici vůči poloze terče.

Samotná zakládací komora se skládá z mnoha mezikusů a funkčních součástí. Je navržena tak, aby bylo možné substrát zakládat (popřípadě vyjímat) do depoziční komory bez nutnosti zavzdušnění celé aparatury. Celkový návrh zakládací komory se skládá ze čtyř hlavních částí (vakuový kufřík, zakládací komora, magnetická tyč s transportním držákem paletky a dok s držákem) [10], které jsou navzájem pospojovány a připojeny k depoziční komoře prostřednictvím příruby umístěné na boku aparatury.

Pro zakládání vzorků je použit modifikovaný vakuový kufřík. Tento kufřík je od depoziční komory oddělen ventilem a není tedy nutné zavzdušňovat celou depoziční komoru při výměně

jednotlivých vzorků. Vakuový kufřík je navržen tak, aby v něm bylo možné přepravovat do zakládací komory i více paletek najednou, včetně takzvaných rozšířených paletek, které jsou navrženy k současnému deponování většího množství vzorků. Prostor v zakládací komoře není dostatečný pro plné využití vakuového kufříku a v současné době je pro potřeby depozice vakuový kufřík modifikován. Modifikace kufříku spočívá v přišroubované násadě na dno těla kufříku, do které se vkládají rybinové paletky běžně používané v laboratořích Ústavu fyzikálního inženýrství, jež jsou kompatibilní i v rámci dalších měřicích zařízení. Do budoucna se nabízí dopracování a realizace návrhu zakládací komory pro plné využití vakuového kufříku.

Po založení vzorku do držáku na vakuovém kufříku se kufřík uzavře a začne se předčerpávat rotační vývěvou. Následně dojde k otevření ventilu mezi kufříkem a zakládací komorou a čerpání komory kufříku převezme kryogenní vývěva.

Do zakládací komory je vsunuta magnetická tyč s transportním držákem, přesně do polohy nad přírubou s vakuovým kufříkem. Držák s paletkou je vertikálně vsunut do zakládací komory, kde je paletka upevněna do držáku na magnetické tyči. Pomocí magnetické tyče je paletka z kufříku vyňata a po zasunutí kufříku zpět do těla kufříku je paletka přesunuta do doku v depoziční komoře (Obrázek 2.2, Obrázek 2.3). Paletka umístěná v držáku na magnetické tyči je do doku umístěna tak, aby úhel mezi paletkou (respektive substrátem na paletce) a dnem komory byl  $52^\circ$ . Při správném nastavení terče (vertikální polohy i úhlu natočení vůči držáku substrátu) je dosaženo požadované koncentrace částic naprašovaného materiálu z terče na substrát.

Držák paletky na magnetické tyči kromě požadovaného úhlu zaručuje elektrický a tepelný kontakt mezi dokem a paletkou se substrátem. Na doku se nachází dva elektrické kontakty, díky kterým je substrát na paletce možné zahřívat až na hodnotu  $400^\circ\text{C}$ . Tepelný kontakt je zaručen měděnými čelistmi. Čelisti jsou tvořeny systémem rovnoměrně rozložených kanálků a jsou navrženy k chlazení substrátu za použití kapalného dusíku.

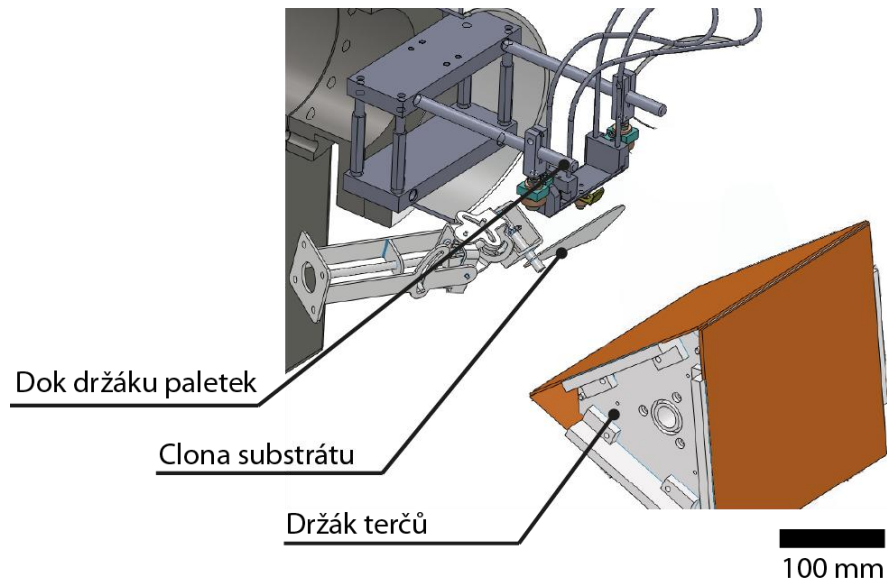
Po samotné depozici je substrát s nadeponovaným materiálem z depoziční komory vyjmut postupem, který je opačný k postupu zakládání vzorku.

## **2.5 Clona substrátu**

Při usazení paletky do doku v depoziční komoře je celá paletka se substrátem zacloněna (Obrázek 2.3). Clona substrátu [11] má několik důležitých funkcí, které se uplatňují jak při začátku depozice, tak při jejím konci.

Před depozicí mohou být jednotlivé terče zoxidovány, což bývá způsobeno například zavzdušňováním komory při výměně sady jednotlivých terčů. V takovém případě by docházelo k naprašování zoxidované vrstvy na substrát. Takový efekt je ovšem nežádoucí. Aby k němu nedocházelo, je substrát před depozicí zakryt clonou. Po zapnutí iontového svazku je terč bombardován ionty a dochází k odprašování zoxidované vrstvy. Po odstranění takto znehodnocené vrstvy je substrát odcloněn a začíná samotná depozice.





**Obrázek 2.3:** Detail na clonu substrátu, dok a držák terčů ( model vytvořen v programu Autodek Inventor)

Clona substrátu se používá také kvůli nutnosti dostatečné stability depoziční rychlosti a homogenity naprašovaného materiálu během procesu depozice. V prvních okamžicích po zapnutí iontového svazku není tok naprašovaných částic na substrát dostatečně stabilní. Dostatečné stability a homogenity je dosaženo po několika vteřinách a poté dochází k odclonění substrátu.

Clona se také využívá k ukončení depozice a to v momentě, kdy je dosaženo požadované tloušťky naprašovaného materiálu.

Clona substrátu má vějířovitý tvar a je umístěná na kloubovém ramenu. Toto rameno je možné s dostatečnou přesností nastavit tak, aby clona v požadované vzdálenosti překrývala celý substrát. Celé rameno je přichyceno k přírubě, na jejíž druhé straně, vně depoziční komory, se nachází otočný ovládač. Přenos pohybu ovládače na samotnou clonu je umožněn soustavou kardanové hřídele a ozubeného soukolí. Pro samotnou clonu jsou důležité pouze dvě polohy. Jedná se o polohy, kdy je substrát zacloněn a kdy zacloněn není.

## 3 Přístroje

Správná funkce depoziční aparatury je zajištěna mnoha dílčími přístroji. V této kapitole budou tyto přístroje blíže popsány a bude vysvětlena jejich funkce.

### 3.1 Rotační vývěva

Depoziční komora na Ústavu fyzikálního inženýrství je osazena dvěma vakuovými vývěvami. Rotační vývěva je určena k předčerpání vakuové komory na dostatečně nízkou hodnotu tlaku před samotným spuštěním vývěvy kryogenní.

Rotační vývěva je založena na principu excentricky uloženého rotoru s lopatkami. Ve válci rotoru jsou dvě štěrbiny, ve kterých jsou připevněny přepážky a které jsou navzájem odtlačovány pružinovým systémem. Celý rotor je umístěn do válcové komory, která je o něco větší než válec rotoru. Válec rotoru se v jednom místě dotýká stěny komory a pružinové přepážky uzavírají zbytek prostoru. Do komory ústí dvě hrdla. Prvním hrdlem je nasáván plyn, který vývěva stlačuje a pohybem rotoru je vypouštěn druhým hrdlem. Často jsou rotační vývěvy konstruovány jako dvoustupňové. Jde prakticky o sériové propojení dvou vývěv, které jsou konstrukčně uspořádané tak, aby rotory byly umístěny na společné hřídeli.

Celý systém bývá ponořen v oleji, který má těsnící úlohu a funguje i jako mazivo. Protože v komoře dochází ke stačování plynu, je olej využíván i jako chladič. Nevýhodou olejových rotačních pump je vnikání oleje do vakuové komory a její následné kontaminace.

Depoziční aparatury „Kaufman“ používá pro předčerpání vakuové komory rotační vývěvu firmy Leybold. Jedná se o vývěvu Leybold-Heraeus. Jde o olejovou vývěvu s čerpací rychlostí 16,5 m<sup>3</sup>/h a mezním dosažitelným tlakem  $6 \cdot 10^{-1}$  mbar.

Pozn. Čerpací rychlost je funkcí tlaku a je závislá na velikosti čerpacího otvoru. Je jí možno vypočítat následující rovnicí [12]

$$S_p = 3,64 S(p_1 - p_2) \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (4.1)$$

kde  $S$  je velikost čerpacího otvoru,  $p_1$  tlak v čerpaném systému,  $p_2$  mezní tlak pumpy,  $T$  teplota v čerpaném systému a  $M$  molární hmotnost atomů čerpaného plynu (v jednotkách SI).

### 3.2 Kryogenní vývěva

Jako druhé vývěvy se v depoziční aparatuře používá pumpa kryogenní. Pomocí kryogenní vývěvy je v aparatuře dosaženo vysokého vakua.

Princip kryogenní vývěvy je založen na kondenzaci zbytkového plynu. Kryogenní pumpa je tvořena nádobou, která je propojena s kondenzační plochou. Na kondenzační ploše dochází ke kondenzaci molekul zbytkového plynu čerpaného prostoru. Jako pracovní médium se používá kapalné hélium.

Kryogenní vývěva obsahuje pouze nasávací otvor a čerpaný plyn jí tedy neprochází. Molekuly se usazují na kondenzační ploše, na které se postupně vytváří vrstva kondenzátu. Tento kondenzát postupně snižuje čerpací schopnosti vývěvy. Ty lze obnovit odstavením vývěvy, zahřátím kondenzační plochy a následnou desorpčí.

Přestože čerpací rychlosti kryovývěvy jsou vysoké, jejich nevýhodou je neefektivní čerpání z atmosférického tlaku. Vzhledem k velkému množství plynu, které by bylo nutné vázat, proto je nutné předčerpání komory rotační vývěvou.

V reálné aparatuře je použita kryogenní vývěva Leybold Coolvac 2.000 CL. Čerpací rychlost této vývěvy je 2100 l/s.

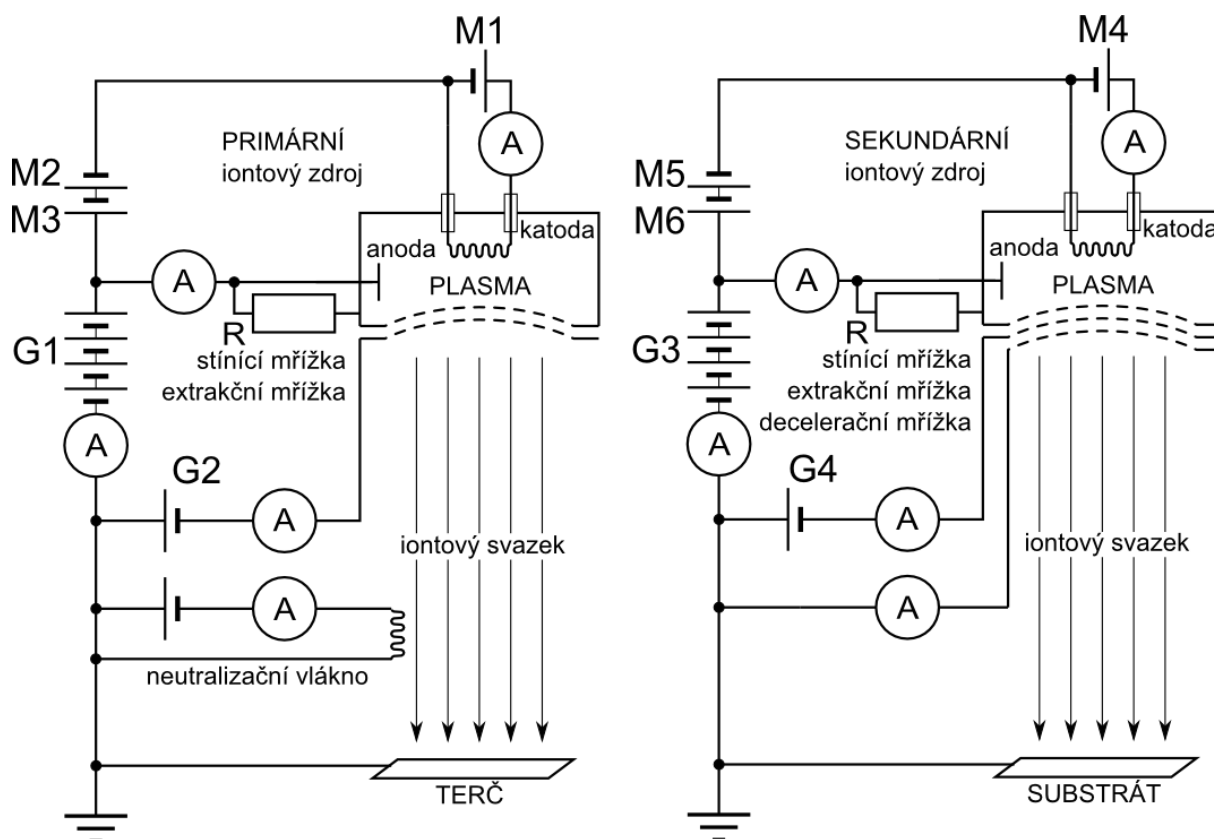
### 3.3 Stabilizované napěťové a proudové zdroje

Soustava napěťově proudových stabilizovaných zdrojů má za úkol ovládání primárního a sekundárního iontového zdroje. Každý z iontových zdrojů je ovládán pěti nezávislými stabilizovanými zdroji. Jedná se o vysokonapěťové zdroje firmy Glassman a nízkonapěťové firmy Mesit. Jejich výčet, možnosti nastavení a příslušnost k jednotlivým iontovým zdrojům je uveden v Tabulka 3.1.

Primární iontový zdroj		Sekundární iontový zdroj	
Označení	Přístroj	Označení	Přístroj
G2	Glassman Series EH (0 – 1 kV, 0 – 100 mA)	G4	Glassman Series EH (0 – 1 kV, 0 – 100 mA)
G1	Glassman Series WX (0 – 3 kV, 0 – 350 mA)	G3	Glassman Series ER (0 – 3 kV, 0 – 100 mA)
M3	Mesit 40V – 10A (0 – 40 V, 0 – 10 A)	M6	Mesit 40V – 10A (0 – 40 V, 0 – 10 A)
M2	Mesit 40V – 10A (0 – 40 V, 0 – 10 A)	M5	Mesit 40V – 10A (0 – 40 V, 0 – 10 A)
M1	Mesit 40V – 40A (0 – 40 V, 0 – 40 A)	M4	Mesit 40V – 40A (0 – 40 V, 0 – 40 A)

**Tabulka 3.1:** Výčet stabilizovaných zdrojů

Propojení jednotlivých stabilizovaných zdrojů je naznačeno na Obrázek 3.1. Z tohoto obrázku je patrné, že zapojení pro primární a sekundární iontový zdroj se pouze nepatrně liší.



**Obrázek 3.1:** Zapojení stabilizovaných zdrojů pro ovládní primárního a sekundárního iontového zdroje

M1 (respektive M4) je používán jako zdroj proudu. Nastavením tohoto přístroje na vhodnou hodnotu dojde ke žhvení vlákna katody a následné emisi elektronů. Zdroje M2, M3 (respektive M5, M6) nastavují napětí mezi anodou a katodou v iontovém zdroji, čímž urychlují elektrony emitované vláknem katody směrem k anodě.

Napěťové zdroje G2 a G1 (respektive G4 a G3) slouží k nastavení potenciálu na výbojové komůrce iontového zdroje (G1, respektive G3) a extrakční mřížce (G2, respektive G4). Mají za úkol extrakci emitovaných iontů z iontového zdroje směrem na terč (respektive substrát).

Odlišnost zapojení je dána tím, že sekundární iontový zdroj obsahuje ještě uzemněnou decelerační mřížku. V zapojení primárního iontového zdroje se navíc vyskytuje neutralizační vlákno. Pro napájení neutralizačního vlákna je vyčleněn vlastní stabilizovaný zdroj typu Mesit 40V – 10A.

Přesné nastavení hodnot na stabilizovaných zdrojích bude popsáno v oddílu 4.5, který se zabývá postupem pro zavedení depozice. Ovládní iontových zdrojů (respektive kaskády stabilizovaných zdrojů) je také zcela zásadní při zavádění automatizace depozičního procesu.

### 3.4 Měrka tlaku

Základem každé vakuové aparatury je měrka tlaku. V naší vysokovakuové depoziční komoře je využíváno dvou tlakových senzorů. Jedná se o senzory typu studené katody (cold cathode, Penning) a Pirani.

Pro nižší vakuum je využíváno měrky Pirani. Ta je založená na měření tepelné vodivosti plynů [12]. Odporový drát (např. z niklu) je zahříván na konstantní teplotu. Měřený plyn odporový drát ochlazuje a změna se zaznamenává termočlánkem. Přenos tepla je závislý na koncentraci plynu a tudíž i na jeho tlaku. Porovnáním změny teploty termočlánku s referenční hodnotou následně dochází k určování tlaku. Tyto měrky se používají pro rozsah tlaků  $10^{-1}$  Pa až  $10^5$  Pa.

Pro měření tlaku vyššího vakua se používá ionizační měrka se studenou katodou. Pomocí elektrického výboje jsou v měrce na katodě emitovány elektrony [12]. Ty krouží po spirálních drahách díky silnému magnetickému poli a jsou přitahovány k anodě. Tím se prodlouží dráha elektronu a tedy i pravděpodobnost srážek s molekulami měřeného vakuového systému. Měřený tlak plynu, který se nachází mezi katodou a anodou, interaguje s emitovanými elektrony a je ionizován. Takto vzniklé ionty dopadají na anodu, na které generují proud. Měřený proud odpovídá jisté koncentraci molekul plynu a tedy i jeho tlaku. Rozsah měřitelných tlaků této měrky je  $10^{-1}$  Pa až  $10^{-7}$  Pa.

Pro měření tlaku používáme zařízení firmy Balzers. Jde o zařízení Balzers TPG 300, které je rozšiřitelné různými moduly. Naše zařízení obsahuje modul PI 300D, který je připojen na Piraniho senzor a jeho měřitelný rozsah je od atmosférického tlaku až na hodnotu  $8 \cdot 10^{-2}$  Pa. Druhým obsaženým modulem je PE 300C9 s měřitelným rozsahem tlaků  $5 \cdot 10^{-1}$  Pa až  $10^{-7}$  Pa.

Zařízení Balzers je automatizováno a jeho zapojení a ovládání bude popsáno v dalších kapitolách.

### **3.5 Průtokoměr**

Průtokoměr zajišťuje dávkování správného množství pracovního plynu do komory jednotlivých iontových zdrojů. K tomuto účelu využíváme dvou snímačů toků (jeden pro každý iontový zdroj). Tyto snímače jsou napojeny na zařízení MKS - Type 247, což je čtyřkanálový kontroler, který se zabývá jejich ovládáním.

### **3.6 Tloušťkoměr**

Toto zařízení nás informuje o naměřené tloušťce deponované vrstvy. Tloušťkoměr pro měření nanometrových rozměrů je založen na principu měření frekvence kmitajícího piezoelektrického krystalu. Během procesu depozice je materiál nanášený i na krystal a tím se mění jeho hmotnost. Zvyšující se hmotnost ovlivňuje frekvenci kmitání krystalu a změna je zaznamenávána. Z této změny lze nepřímou metodou zjistit tloušťku deponované vrstvy.

Depoziční komora je vybavená piezoelektrickým snímačem firmy Sycon instruments. Jedná se o typ STM-100/MF, jehož rozlišení je  $0,1 \text{ \AA/s}$ .

## 4 Postup zahájení depozice

Před řešením procesu automatizace je nutné stanovit posloupnost manuálních úkonů, které vedou k samotnému procesu depozice. Z tohoto výčtu bude na první pohled patrné, které kroky tohoto procesu lze automatizovat a které nikoli.

### 4.1 Spuštění kryopumpy

Naprosto samostatným blokem úkonů je uvedení kryopumpy do provozuschopného stavu. Kryopumpa se zpravidla nevypíná, ale pouze se uzavře prostor mezi kryopumpou a depoziční komorou, kterou zavzdušňujeme.

1. V prvním kroku je uzavřen deskový ventil mezi kryopumpou a depoziční komorou. Ventil mezi rotační pumpou a depoziční komorou se také uzavře. Při spouštění kryopumpy zůstane otevřený pouze ventil spojující kryopumpu s pumpou rotační.
2. Rotační pumpa předčerpá komoru kryopumpy.
3. Při dosažení tlaku v rozmezí  $10^{-3} - 10^{-4}$  mbar můžeme kryopumpu zapnout.
4. Na ovládacím zařízení kryopumpy nastavíme funkci regenerace, která má za úkol uvést přístroj do chodu. Během tohoto procesu dochází k desorbci a následnému vymrazování kryopumpy. Na konci tohoto procesu se začne čerpat plyn.

### 4.2 Příprava aparatury a založení vzorku

Nyní si uveďme modelový příklad depozice multivrstvy Co-Cu-Au na křemíkový substrát při metodě IBS. Na počátku je depoziční aparatura otevřená a zavzdušněná, kryopumpa i rotační pumpa jsou zapnuty a všechny ventily jsou uzavřeny. Držák terčů se nachází mimo depoziční komoru.

1. V prvním kroku si připravíme terč. Z ochranného obalu vyjmeme terče požadovaných materiálů a připevníme je na držák terčů. V našem případě půjde o terče Co, Cu a Au.
2. Připravený držák s terči umístíme do depoziční komory na dokovací hřídel, která zajišťuje přenos rotačního pohybu.
3. Rameno s terčem nastavíme do požadované vertikální polohy a celou aparaturu uzavřeme. Je nutné uzavřít i zavzdušňovací ventil, který se nachází na přírubě s ovládacími prvky ramene terče.
4. Otevře se pneumatický ventil mezi rotační pumpou a depoziční komorou a prostor se začne čerpat.
5. Při dosažení tlaku v depoziční komoře v rozmezí  $10^{-3} - 10^{-4}$  mbar (cca 1 hodina) se uzavře ventil mezi rotační pumpou a depoziční komorou. Deskový ventil mezi kryopumpou a depoziční komorou se naopak otevře a čerpání převezme kryopumpa, která byla připravena k čerpání podle odstavce 4.1.
6. Během dočerpávání komory na hodnotu tlaku v rozmezí  $10^{-7}$  mbar (cca 1 hodina) je možné si připravit substrát.
7. Substrát (v našem případě křemík) se umístí na rybinovou paletku. Paletku upevníme do držáku na spodní straně vakuového kufříku.

8. Vakuový kufřík je uzavřen a otevře se ventil mezi komorou vakuového kufříku a kryopumpou. Tlak v komoře po otevření ventilu by neměl vzrůst na hodnotu větší než  $2 \cdot 10^{-6}$  mbar.
9. Po dočerpání vakua na hodnotu v rozmezí  $10^{-7} - 10^{-8}$  mbar (vyrovnání tlaků mezi depoziční komorou a komorou vakuového kufříku) se otevře deskový ventil mezi vakuovým kufříkem a zakládací komorou.
10. Paletka je vsunuta do zakládací komory, kde je následně umístěna na držák upevněný k magnetické tyči.
11. Pomocí magnetické tyče je rybinová paletka s držákem umístěna do doku v depoziční komoře.

### 4.3 Depozice multivrstev

1. Uzavře se clona substrátu (substrát je zakryt).
2. Pomocí otočného manipulátoru se nastaví požadovaný terč (terč Co) na přesný úhel tak, aby odprašované atomy přímo dopadaly na substrát.
3. Zapne se primární iontový zdroj a spustí se na něm extrakce iontů požadovaných parametrů (samotný proces spuštění extrakce je poměrně složitý a bude popsán zvlášť).
4. Otevře se clona substrátu a dojde k depozici materiálu na substrát (depozice vrstvy Co).
5. Při dosažení požadované tloušťky deponovaného materiálu depozici ukončíme. Ukončení je možné provést dvěma způsoby: buď uzavřením clony substrátu, nebo vypnutím iontového zdroje.
6. Pomocí otočného ovladače vyměníme současný terč (Co) za nový (Cu), tak abychom mohli deponovat druhou vrstvu navržené struktury.
7. Pokud byl po depozici první vrstvy iontový zdroj vypnut, opět jej zapneme. Dále otevřeme clonu substrátu a deponujeme druhý materiál (depozice vrstvy Co).
8. Po dosažení požadovaných parametrů depozici opět ukončíme a postup opakujeme i pro další materiál (depozice Au). V tomto bodu se využívá tloušťkoměru pro stanovení požadované tloušťky deponované vrstvy.
9. Tímto způsobem nadeponujeme navrženou vrstvu (multivrstva Co-Cu-Au) a nakonec vypneme iontové zdroje.

Proces depozice může být ještě doplněn využitím sekundárního iontového zdroje (metoda IBAD). Postup by byl však analogický.

Celý proces depozice multivrstev popsáný výše by měl být automatizovaný, včetně otáčení terčů a uzávěru clony substrátu.

### 4.4 Vyjmutí vzorku z aparatury

Postup pro vyjmutí substrátu s nadeponovanou vrstvou z depoziční aparatury je opačný k postupu jeho zakládání. Liší se pouze v posledním bodu. Jde o krok, ve kterém je paletka v držáku na vakuovém kufříku. Deskový ventil je mezi komorou vakuového kufříku a zakládací komorou uzavřen. Ventil na komoře vakuového kufříku se otevře a prostor se zavzdušní, aby bylo možné nadeponovaný vzorek vyjmout.

## 4.5 Zapálení výboje a extrakce iontů

Jak již bylo uvedeno výše, postup při zahájení extrakce iontů je poměrně složitý, a proto je mu věnován vlastní oddíl. Spuštění iontového výboje je pro oba zdroje analogické. Liší se pouze v některých nastavovaných a měřených parametrech. Dále bude popsán pouze proces spuštění extrakce primárního iontového zdroje a rozdíly pro sekundární zdroj budou uvedeny v závorkách. Iontové zdroje jsou ovládány pomocí stabilizovaných zdrojů a v následujícím odstavci budou používány zkratky použité v oddíle 3.3 (Obrázek 3.1). Nastavení napětí a proudu na jednotlivých zdrojích je do značné míry variabilní, v popisu budou použity nejběžněji užívané hodnoty. Na počátku procesu zapálení výboje je nutné do komory iontového zdroje napustit pracovní plyn.

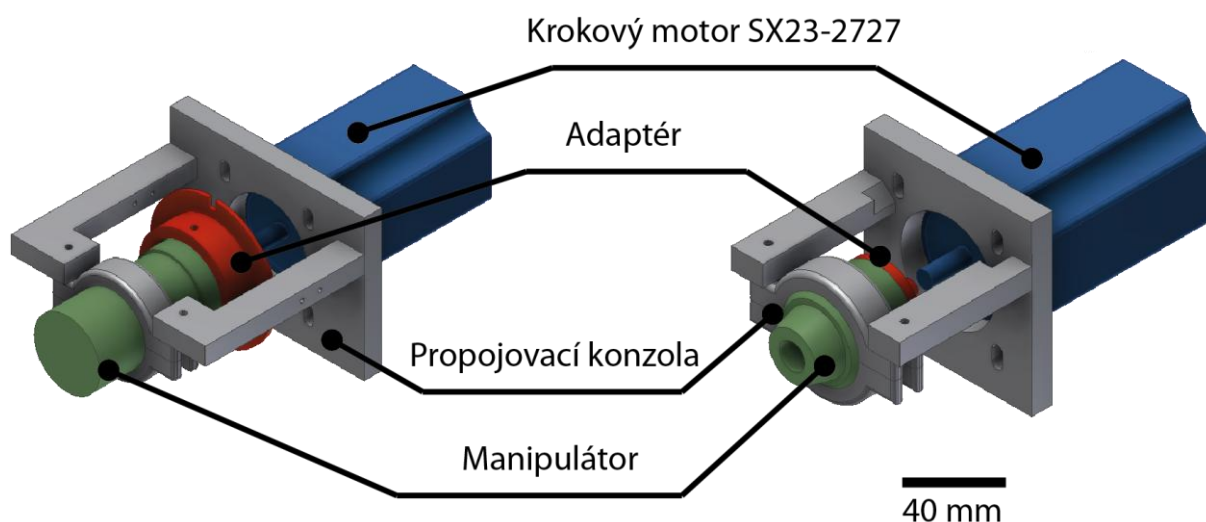
1. Napětí mezi anodou a katodou v komoře iontového zdroje se nastaví na hodnotu 80 V. Na zdrojích M2 a M3 (M5, M6) se nastaví maximální hodnota 40 V. Tyto zdroje jsou zapojeny v sérii a výsledkem bude požadovaná hodnota 80 V.
2. Proud tekoucí vláknem katody iontového zdroje zvyšujeme pomocí zdroje M1 (M4) z hodnoty 0 A tak dlouho, dokud nezačne téci proud mezi katodou a anodou (dojde k zapálení výboje). Proud ze zdroje M1 nastavíme na takovou hodnotu, aby byl výbojový proud mezi anodou a katodou roven 1,5 A (0,5 A). Tento proud je možné měřit na přiloženém ampérmetru, nebo je možné jej odečítat na M3, případně M2 (M5, nebo M6).
3. Hodnotu napětí na M2 (M5) snižujeme postupně z hodnoty 40 V na 0 V. Zároveň korigujeme na zdroji M1 (M4), který funguje jako proudový zdroj, hodnotu proudu tak, aby měřený proud mezi anodou a katodou byl stále 1,5 A (0,5 A).
4. Pokud je hodnota na M2 (M5) již nastavena na hodnotu 0 V a měřený proud je stále 1,5 A (0,5 A), dochází v iontovém zdroji ke stabilní ionizaci pracovního plynu.
5. Nyní do obvodu připojíme stabilizované zdroje G1, G2 (G3, G4), čímž nakonec docílíme extrakci iontů. Napětí na stínící mřížce G1 (G3) nastavíme postupně na hodnotu 600 V (50 – 400V). Toto napětí určuje také zdrojům M1 - M3 (M4 - M6), na jakou hodnotu bude položena jejich plovoucí zem. Říkáme, že zdroje Mesit „plavou“ na napětí zdrojů Glassman (viz Obrázek 3.1).
6. Na extrakční mřížce G2 (G4) nastavíme hodnotu napětí na  $-200$  V.
7. Pro zavedení stabilní extrakce je ještě nutné sledovat proud na extrakční mřížce, aby byla nastavena na 50 mA (30 mA). Tuto hodnotu lze odečítat na zdroji G1 (G3). Pokud není docíleno této hodnoty, modifikujeme proud na vlákně iontového zdroje M1 (M4), dokud cílenou hodnotu nenaměříme.
8. Docílili jsme stabilní extrakce iontů.



## 5 Konstrukční a elektrické úpravy

V rámci automatizace depozičního procesu je nezbytné ovládání držáku terčů a clony substrátu. Ovládání by mělo být realizováno pomocí dvou krokových motorů firmy Microcon SX23-2727.

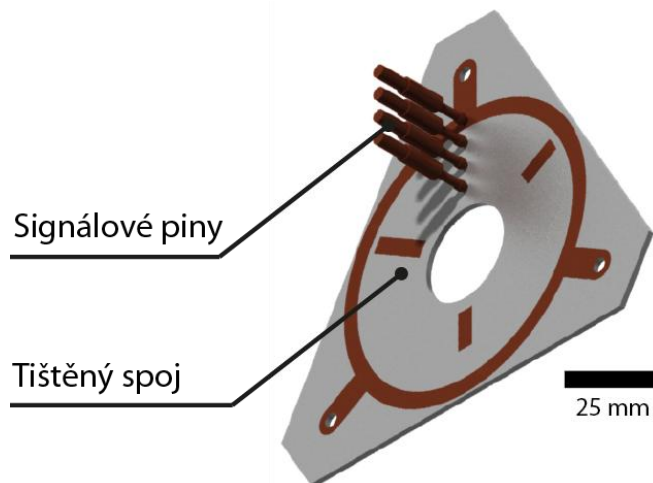
Pro přichycení krokových motorů k depoziční komoře byly vyrobeny dvě konzoly, které se upevní na stávající mechanické manipulátory. Pro pochopení funkce jsou na Obrázek 5.1: znázorněny kromě propojovacích konzol (šedě) i grafické modely krokových motorů (modře) a stávajících manipulátorů (zeleně). Osa rotoru krokového motoru se poté nachází v ose otáčení manipulátorů. Pro přenos rotačního pohybu mezi krokovým motorem a manipulátorem byly navrženy adaptéry (červeně), které lze na mechanické manipulátory upevnit.



**Obrázek 5.1:** Propojení krokových motorů s manipulátorem terčů prostřednictvím propojovací konzole a adaptéru (Autodesk Inventor)

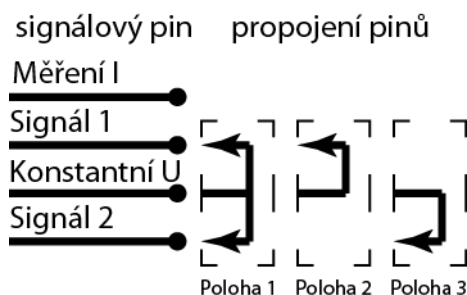
S nastavováním pozice terčů je úzce spojen problém vyčítání jejich polohy. Držák terčů se nachází na hřídeli, kterou je otáčeno pomocí manipulátorů z vnějšku depoziční komory. Tento držák má jistou axiální vůli vůči hřídeli na které je nasazen. Ta je způsobena mechanickým přenosem pohybu manipulátoru přes kardanovou hřídel a ozubené soukolí. Také pero hřídele je trochu menší než drážka a to kvůli snadné manipulaci s držákem při výměně jednotlivých terčů. Jisté vychýlení je patrné zvláště při nasazených terčích, jejichž hmotnosti se navíc navzájem značně liší.

Za účelem vyčítání polohy jednotlivých terčů byl navržen systém elektrických kontaktů mezi držákem a nepohyblivou částí ramene. Z jedné strany trojúhelníkového profilu byl k držáku připevněn tištěný spoj definované kruhové struktury. Tento tištěný spoj je v dotyku se čtyřmi signálovými piny, které jsou upevněny v patici na nepohyblivé části ramene (Obrázek 5.2). Tři z těchto pinů jsou určeny pro vyčítání poloh jednotlivých terčů a čtvrtý pin pro měření proudu generovaného na terčích při jejich bombardování ionty.



**Obrázek 5.2:** Tištěný spoj v dotyku se signálovými piny (Autodesk Inventor)

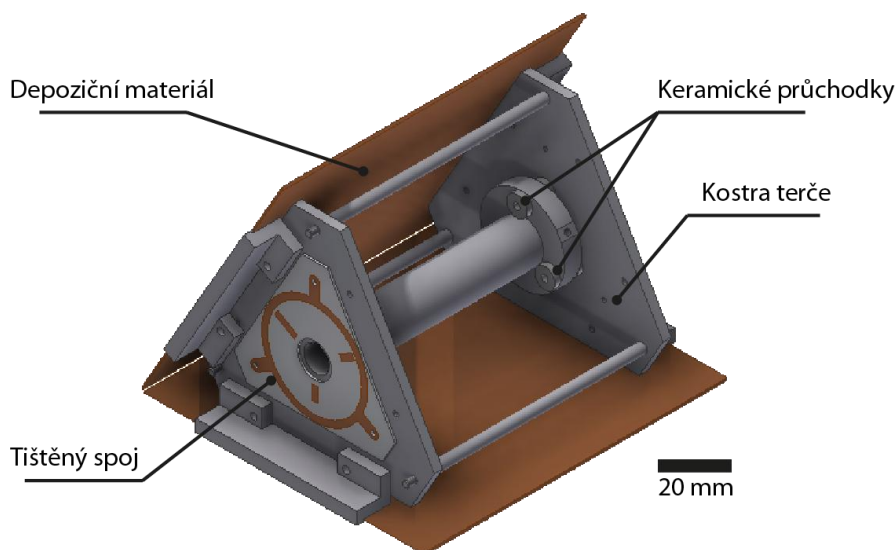
Vzájemné propojení pinů je na Obrázek 5.3. Pin, který se dotýká tištěného spoje nejdále od osy, je určen pro měření proudů. Tento pin je ve stálém vodivém kontaktu s držákem terčů. Na střední pin ze zbývajících tří je přivedeno napětí 16 V z adaptéru. Při otáčení terče postupně dochází prostřednictvím tištěného spoje k propojení tohoto středního pinu s dvěma bočními. Dojde k propojení s jedním, s druhým nebo oběma piny současně. Na výstupu těchto pinů je postupně detekováno napětí 0 nebo 16 V v závislosti na natočení držáku terčů. Všechny piny jsou užitím (captionem potažených) měděných drátů vyvedeny elektrickou průchodkou vně depoziční komory. Piny, na kterých se postupně generuje napětí, jsou připojeny do uživatelských vstupů na programové jednotce krokového motoru. Při otáčení držáku jsou na vstupech programové jednotky (B10 a B11, viz dodatek A.5) generovány logické jedničky (respektive logické nuly), na které motor podle povelového souboru příslušně reaguje (přestože je standardní hodnota logické nuly uživatelského vstupu 24 V, je 16 V hodnotou dostatečnou).



**Obrázek 5.3:** Propojení signálových pinů

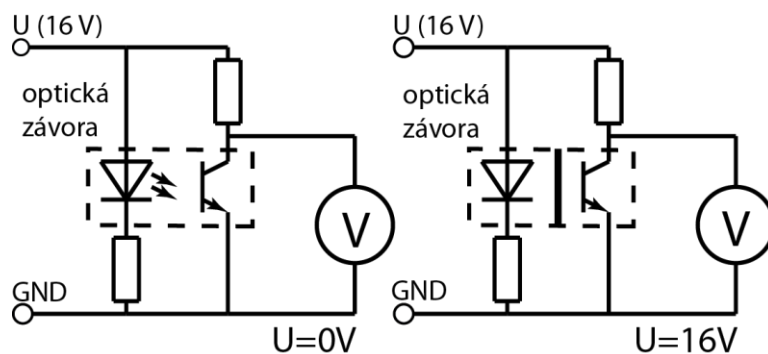
Kvůli nutnosti vyčítat z terčů i generovaný proud bylo nutné navrhnout zcela nový držák terčů (Obrázek 5.4). Původní držák byl vodivě spojen s kostrou depoziční komory a měření proudů nebylo možné. Nový držák je navržen tak, že jsou jednotlivé terče nevodivě odděleny od ramene pomocí keramických průchodek. Pin, na kterém je měřen generovaný proud, je vyveden vně depoziční komory. Sériovým zapojením ampérmetru mezi tento pin a kostru depoziční komory je možné přímo vyčítat hodnoty proudu. Další možností je vyčítání proudu pomocí analogových vstupů AD/DA převodníku NI USB-6229. Mezi vývod pinu a kostru se

zapojí rezistor, na kterém pomocí převodníku odečítáme napětí. Hodnoty proudů se pohybují okolo 30 mA, při použití rezistoru o hodnotě 100 Ω budeme měřit napětí 3 V.



**Obrázek 5.4:** Model nového držáku terčů vytvořený v programu Autodesk Inventor

Clona substrátu zaujímá dvě hlavní polohy: polohu, ve které je otevřena, tedy kdy na substrát může dopadat naprašovaný materiál, a polohu, ve které je clona zavřená. Otvírání a zavírání clony je možné uskutečnit přesnou rotací o zadaný počet mikrokroků v pozitivním či negativním směru. Z důvodu kontroly pozice byl však navržen systém pro určení její polohy. Polohu clony není nutné kontrolovat uvnitř depoziční komory, ale stačí měřit natočení manipulátoru. Toto natočení je měřeno pomocí elektrického obvodu s dvěma optickými závory (Obrázek 5.5). Na manipulátoru clony je umístěn kruhový plíšek se dvěma zářezy. V pozici, kdy není clona ani otevřená ani zavřená, je prostor mezi diodou optické závory a tranzistorem zacloněn. Tranzistor je na optické závoře uzavřen a na výstupu lze vyčítat hodnotu 16 V. V pozici, kdy je prostor mezi diodou a tranzistorem otevřen (pozice zářezu), dojde k otevření tranzistoru a na výstupu je hodnota 0 V.



**Obrázek 5.5:** Způsob určování polohy clony substrátu, optická závora otevřena (vlevo) a optická závora uzavřena (vpravo)

## 6 Automatizace přístrojů

Pro potřeby automatizace depozice bylo nutné vyřešit počítačové ovládání mnoha přístrojů. Z podpůrných přístrojů je nutné ovládat tloušťkoměr, průtokoměr a měrku tlaku. Ovládání iontových zdrojů je zajištěno prostřednictvím kaskády napěťových a proudových stabilizovaných zdrojů. Ovládání těchto zdrojů je pro proces depozice zcela nezbytné. V depoziční aparatuře se ve valné většině vytvářejí vícevrstvé struktury. Z tohoto důvodu bylo nutné vyřešit otáčení terčů pro změnu deponovaného materiálu a také ovládání clony substrátu.

**Měrka tlaku Blazers TPG 300** umožňuje dva způsoby komunikace. Prvním způsob je pomocí sběrnice typu RS-232 (sériový port), respektive pomocí sběrnice RS-422. Tento port se nachází na rozšiřitelném modulu IF 300A (respektive IF 300B, nebo IF 300C). Pomocí této sběrnice je možné zcela ovládat měrku tlaku a všechny ostatní přídavné moduly. Výhodou tohoto ovládání je i zcela přesné vyčítání měřeného tlaku, kdy data zobrazená na digitálním displeji odpovídají hodnotám obdrženým počítačem. Samotné ovládání je potom realizováno zasíláním jednoduchých ASCII povelů do zařízení a čtení obdržených hodnot. V našem případě měrka tlaku tento rozšiřitelný modul neobsahuje a z ekonomických důvodů není výhodné tento modul dokupovat.

Druhým způsobem, kterým je možné vyčítat měřená data, je použitím analogového signálu. Měrka tlaku Balzers 300TPG v depoziční komoře Kaufman je osazena moduly PI 300D a PE 300C9. Modul PI 300D (Pirani měrka) je vybaven dvěma konektory pro připojení dvou senzorů a dvěma analogovými výstupy. Proti tomu modul PE 300C9 (Cold cathode) obsahuje pouze jeden konektor pro připojení senzoru a jeden analogový výstup. Analogový výstup je v obou případech reprezentován jako dvoukolíková zdířka, na kterou je přivedeno elektrické napětí o velikosti 0 – 10 V. Tyto analogové zdířky není nutné nijak aktivovat. Měřené hodnoty jsou při zapnutém senzoru přímo převáděny na napětí na zdířkách (zapínání senzorů se provádí současným stisknutím dvou příslušných tlačítek na předním panelu). Toto napětí odpovídá hodnotám tlaků následujících rozmezí, pro modul PI 300D  $10^{-4} - 10^3$  mbar, pro modul PE 300C9 pak  $6 \cdot 10^{-3} - 10^{-9}$  Pa. Kalibrační křivky a popis propojení s převodníkem, který data vyčítá, jsou v dodatku A.1.

**Průtokoměr MKS 247** je čtyřkanálový kontroler, zabývající se měřením a nastavováním hodnot na snímačích toku.

Počítačové ovládání průtokoměru je umožněno kombinací digitálních a analogových napěťových signálů, které se připojí do portu na zadní straně kontroleru. Pro zapínání jednotlivých snímačů se používá TTL logiky, kdy napěťová úroveň 5 V odpovídá hodnotě logická 0 a snímač bude vypnut. Hodnota 0 V odpovídá logické 1 a snímač se zapne. Hodnoty toku jsou nastavovány analogovým signálem 0 – 5 V, které odpovídají 0 – 100 % rozsahu toku nastaveného na zařízení. Vyčítání hodnot je možné měřením napětí. Měřená napětí jsou v rozmezí 0 – 1 V, což odpovídá 0 – 100 % toku nastaveného na průtokoměru. Detaily počítačového ovládání průtokoměru jsou popsány v dodatku A.2.

Pro měření a nastavování hodnot na přístrojích Balzers TPG 300 a MKS 247 je využito AD/DA převodníku firmy National Instruments NI USB-6229. Toto zařízení disponuje dostatečným počtem analogových i digitálních vstupů a výstupů, jejichž přesnost nastavení převyšuje naše požadavky.

**Tloušťkoměr STM-100/MF** firmy Sycon Instruments je určen pro měření parametrů naprašované vrstvy (tloušťka, rychlost naprašování atd.). Jedná se o programovatelné zařízení, které je schopné, kromě měření, i ovládat clonou substrátu. V našem případě je tloušťkoměr využíván pouze pro měření tloušťky naprašované vrstvy a stability rychlosti naprašování.

Toto zařízení je vybaveno rozhraním pro přímou počítačovou komunikaci. V našem případě je využito sběrnice RS-232, navíc je zařízení možné ovládat také prostřednictvím sběrnice IEEE-488. Způsobu komunikace a přesnému nastavení parametrů tloušťkoměru je věnován dodatek A.3.

Ovládání clony substrátu a otáčení terčů je realizováno prostřednictvím krokových motorů firmy Microcon. Jedná se o dva **krokové motory** typu **SX23-2727**.

Statický moment tohoto motoru je 2,7 Nm, což je hodnota, která vyhovuje požadavkům pro ovládání terče i clony substrátu. Otočení rotoru o 360 ° odpovídá 200 krokům motoru a výrobcem udávaná tolerance jednoho kroku je  $\pm 0,1^\circ$ . Jeden krok lze dále zmenšovat pomocí přepínačů na programovatelné jednotce a programovatelným nastavením mikrokroků. Přesnost motoru při nastavování úhlu je dostatečná pro ovládání terče a nastavení jeho pozice vůči držáku substrátu.

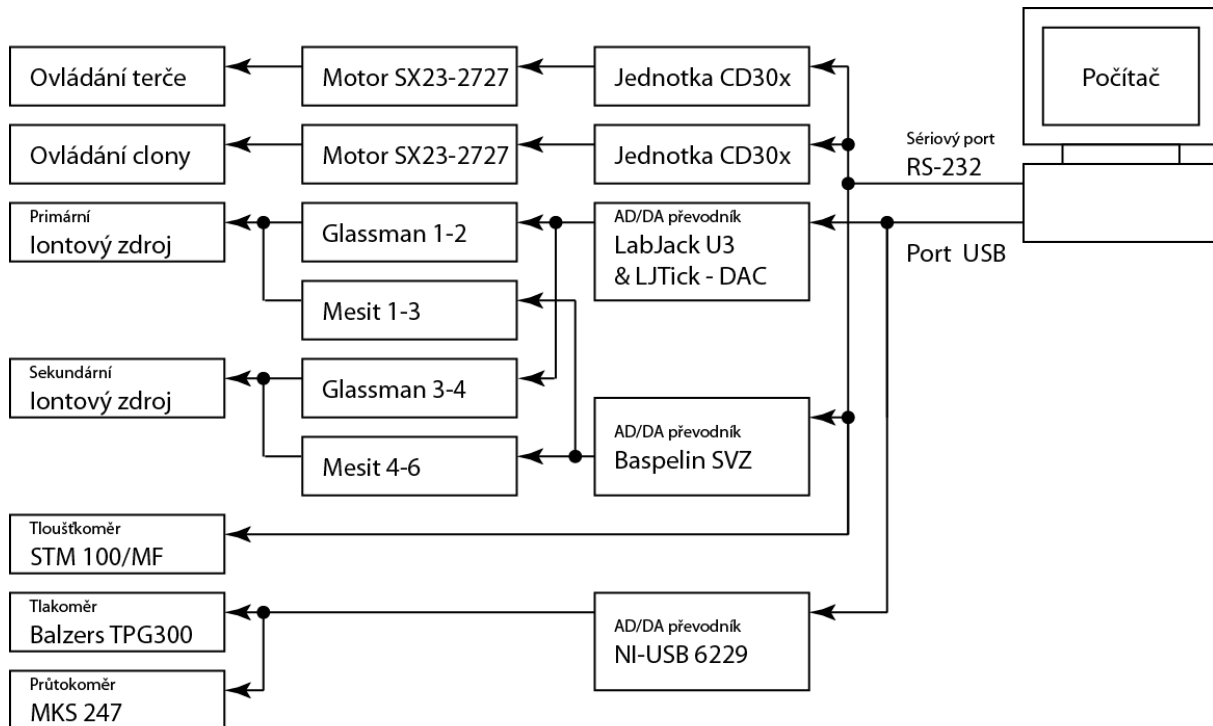
Komunikaci a programování krokového motoru, respektive kontroleru, který krokový motor ovládá, je možné prostřednictvím sériového rozhraní RS-232. Komunikace s krokovými motory a jejich programování detailně popsána v dodatku A.5.

Iontové zdroje jsou nastavovány kaskádou stabilizovaných zdrojů **Mesit** a **Glassman**. Přímé počítačové ovládání není možné, ale v obou případech lze parametry nastavovat použitím analogového signálu o úrovních napětí 0 – 10 V. Na zadním panelu obou typů přístrojů je nutné rozpojit příslušné kanály [13], které vyřadí z činnosti potenciometry na předním panelu a místo nich připojit externí zdroje napětí. Rozsah napětí 0 – 10 V odpovídá celkovému rozsahu napětí jednotlivých stabilizovaných zdrojů. To znamená, že při rozsahu zdroje Glassman 0 – 3 kV a nastavením 5 V na externím zařízení se na stabilizovaném zdroji nastaví 1,5 kV. Přesným popisem stabilizovaných zdrojů a jejich úpravou pro počítačové ovládání se zabývá dodatek A.4.

Pro ovládání stabilizovaných zdrojů Mesit je použito AD/DA převodníků Balzers SVZ a zdroje firmy Glassman jsou ovládány AD/DA převodníkem LabJack U3.

Komunikací převodníků Baspelin SVZ, LabJack U3 a NI USB 6229 s počítačem se věnuje dodatek A.6.

Komunikace zařízení s počítačem je realizována buď prostřednictvím sériového portu, nebo pomocí AD/DA převodníků. Celkové schéma propojení je naznačeno na Obrázek 6.1.



**Obrázek 6.1:** Schéma propojení ovládaných zařízení s počítačem

## 7 Ovládací program

Podstatou automatizace celého depozičního procesu je vytvoření aplikace, která se bude starat o ovládání všech potřebných přístrojů. Měla by se starat o nastavování hodnot dle uživatelem zadávaných parametrů a také zajistit provázání jednotlivých přístrojů, které se navzájem ovlivňují.

Pro vytvoření programu byl zvolen programovací nástroj LabVIEW [14]. Použití tohoto nástroje je podloženo jeho jednoduchým způsobem programování a dostatečnou přehledností i pro uživatele, kteří nejsou jinak v programování zkušení. Další výhodou je možnost následného vývoje aplikace i uživatelem, který původní program nevytvářel, bez nutnosti zdlouhavého pročítání obsažného textového kódu.

V rámci bakalářské práce [13] jsem vytvářel program, který již dokázal ovládat kaskádu stabilizovaných zdrojů. Program se jmenoval Kaufman v1.0 a jeho pomocí již bylo možné spuštění extrakce iontů v depoziční komoře. Program vytvářený pro účely této diplomové práce nevychází z původního programu. Všechna bloková schémata ovládající iontové zdroje byla vytvořena nově a program byl doplněn o bloky, které se zabývají ovládáním dalších přístrojů. V rámci správného číslování programu a odkazu na předešlou verzi je vytvořený program nazýván Kaufman v2.0.

### 7.1 LabVIEW

Název LabVIEW je odvozen z anglického Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench, neboli laboratorní pracoviště virtuálních přístrojů. Programovací nástroj LabVIEW byl vyvinut s myšlenkou vytvoření efektivního nástroje pro měření a analýzu dat, bez nutnosti znalosti vyšších programovacích jazyků. Byl vyvinut již roku 1986 na Texaské univerzitě ve skupině Jeffa Kodovského pro platformu počítačů Macintosh.

Oproti běžně používaným programovacím nástrojům, LabVIEW nepoužívá textový kód, ale takzvaný G jazyk (grafický jazyk) [14]. Samotné programy se v LabVIEW nazývají virtuální přístroje neboli VI (virtual instruments). Toto označení vychází ze samotného vzhledu výsledných aplikací, které napodobují reálné přístroje, jako jsou multimetry, nebo osciloskopy.

Programování probíhá na dvou úrovních. Programové rozhraní nám nabízí takzvaný front panel a block diagram. Front panel slouží k vytváření grafického rozhraní, na který se umísťují ovládací prvky a indikátory (například přepínače, otočné knoflíky, led diody a grafy). Programový kód, který řídí ovládací prvky a indikátory na předním panelu, se umísťuje do block diagramu. Do blokového diagramu se postupně umísťují komponenty, které vykonávají uživatelem požadovanou funkci (například sčítání hodnot) a jejich výstup propojují se zobrazovači na předním panelu. Propojování jednotlivých komponent se uskutečňuje pomocí vodičů. Základy programování jsou blíže rozebrány v dodatku B.1.

Zpracování samotného programu je řízeno tokem dat. Blok zahájí výpočet v okamžiku, kdy jsou na všech jeho vstupech data a po zpracování je posílá na výstupy. Zpracování tedy neběží sériově za sebou, ale v závislosti na použitém hardwaru se zpracovávají paralelně.

LabVIEW je navrženo tak, aby bylo dosaženo efektivní práce s externími přístroji pro sběr dat a jejich řízení. Za tímto účelem je LabVIEW vybaven mnoha komponentami pro komunikaci prostřednictvím sběrnice RS-232, RS-485, GPIB případně zařízení postavené na sběrnici VXI.

## 7.2 Program Kaufman v2.0

Skladba všech hlavních programů, myšleno kořenových programů, které přímo ovládají jednotlivá zařízení, je stejná. Všechny programy jsou navrženy tak, aby bylo možno ovládat zařízení zasláním speciálního textového příkazu. Takto zasláný povel provede akci a v závislosti na požadavku odešle na výstup textový řetězec s požadovanými parametry, nebo s informací o vykonávání příkazu.

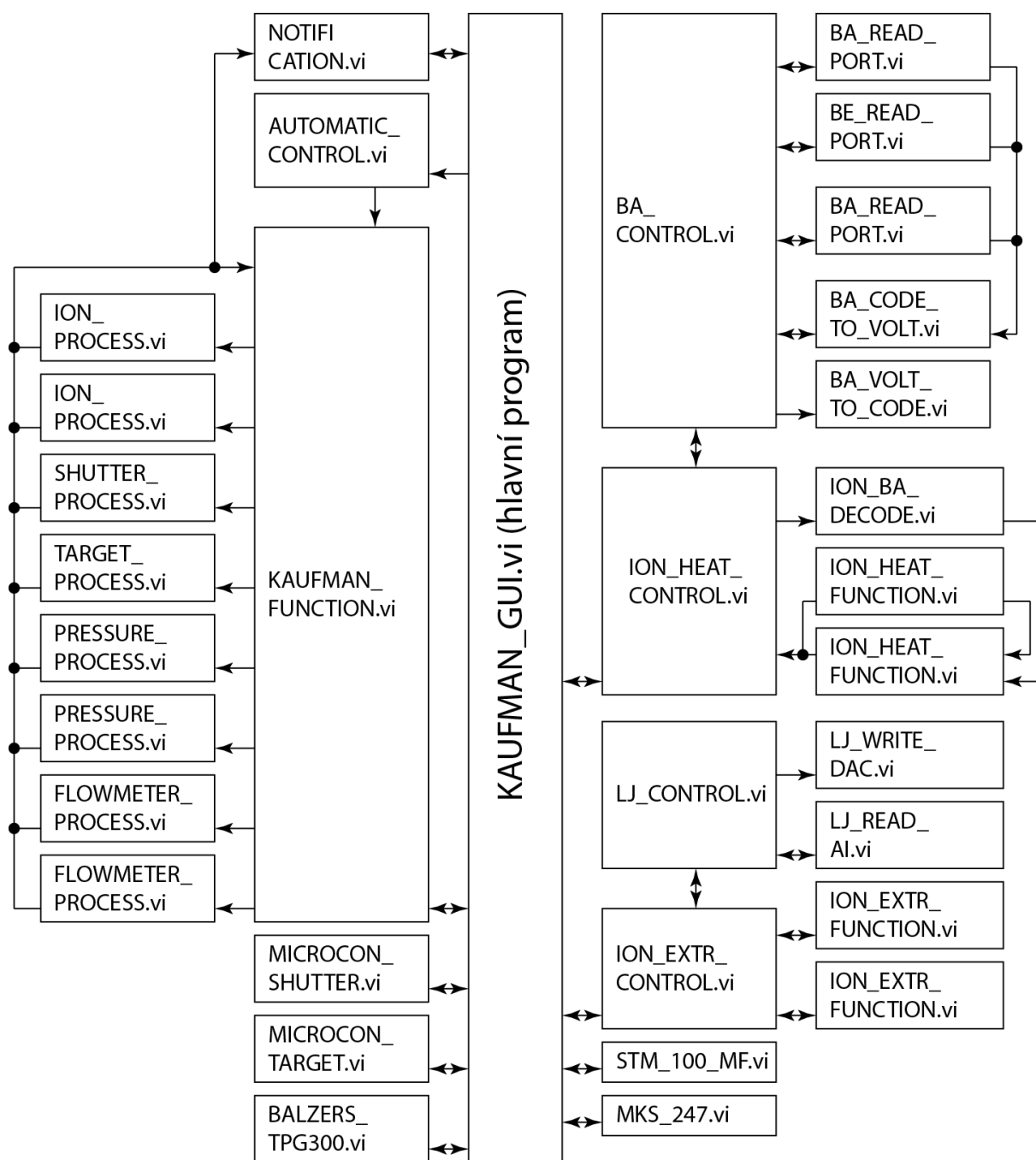
Pro každý z povolených textových příkazů je vytvořena záložka na case struktuře. Při odeslání daného příkazu se tedy vykonává pouze program, který je na dané záložce. Tento způsob byl zvolen kvůli možnosti dále program rozšiřovat, bez nutnosti přeprogramovávat celou strukturu, ale pouze přidáním nové záložky do case struktury pro vykonávání nového povelu.

Programy, které ovládají jednotlivá zřízení, jsou větveny paralelně. Tím je zajištěno dostatečně rychlé ovládání a zařízení se navzájem rychlostně neovlivňují. V hlavním programu jsou poté všechny podprogramy navzájem propojeny a pomocí příslušného programu jsou mezi nimi vyvolány zpětné vazby.

Každý kořenový program obsahuje sérii vstupů. Jedná se zpravidla o textové terminály, kterými jsou do podprogramu vkládány textové příkazy. Pokud je daný program navíc vnitřně ovládán prostřednictvím převodníků, nebo je při běhu programu nutno měnit nastavení sériového portu, jsou do programu zavedeny i příslušné vstupy. Programy také často obsahují vstupy pro monitorování správného běhu programu.

Celkové schéma a větvení do podprogramů je značně složité. Mnohdy je do sebe vnořeno více podprogramů, které komunikují mezi sebou. V následujícím schématu (Obrázek 7.1) jsou rozepsány všechny programy a vzájemná komunikace mezi nimi. Šipkou je naznačeno, jakým směrem je komunikace vedena. Oboustranná šipka znamená, že programy spolu komunikují navzájem. Pokud se ve schématu vyskytují dva stejné podprogramy vedle sebe, znamená to, že je daný podprogram použit dvakrát (např. ovládání primárního a sekundárního iontového zdroje je provedeno paralelně, přesto oba využívají stejných podprogramů). Jednotlivé bloky jsou ve schématu umístěny následovně. Pokud jsou programy na stejné úrovni zanořeny, znamená to, že jsou to podprogramy nadřazeného programu. Podprogramy, které byly převzaty od výrobců jednotlivých zařízení, zaneseny do schématu na Obrázek 7.1 nejsou.





**Obrázek 7.1:** Schéma propojení jednotlivých vytvořených podprogramů s hlavním programem KAUFMAN\_GUI.vi

Jednotlivé podprogramy a jejich funkce jsou detailně popsány v dodatcích B.2 až B.7.

### 7.3 Hlavní program

Hlavní program, ve kterém jsou rozmístěny všechny ovládací komponenty a přes který jsou všechny podprogramy provázány, se nazývá KAUFMAN\_GIU.vi.

Samotná struktura hlavního programu je postavena na paralelních procesech. Jednotlivé ovládací programy jsou uzavřeny do samostatných smyček, čímž je zajištěno plynulého chodu, kdy rychlejší zařízení nejsou zpomalovány těmi pomalejšími. Předávání informací

mezi jednotlivými strukturami je umožněno pomocí komponent událostí (notifier). Události jsou obnovovány každým cyklem jednotlivých programů. Rychlost smyčky, ve které se nachází řídicí struktura KAUFMAN\_FUNCTION.vi, je oproti ostatním mnohonásobně vyšší, proto je řídicí program schopen reagovat na všechny události s předstihem.

## 7.4 Uživatelské rozhraní

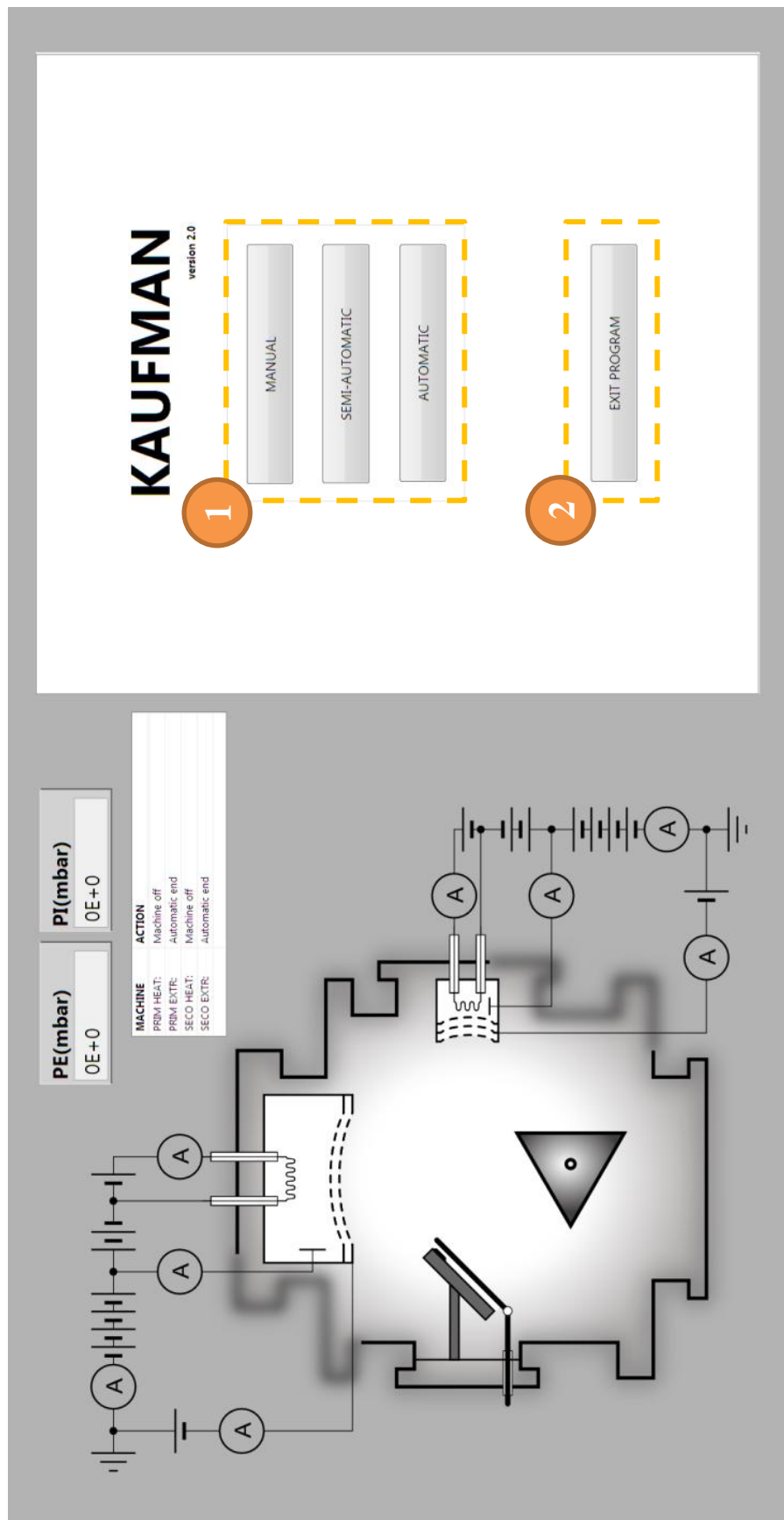
Uživatelské rozhraní je navrženo s ohledem na možnost jeho ovládní pomocí dotykového displeje. Všechny ovládací prvky jsou tedy dostatečně velké. Prostor na displeji je rozdělen na dvě části. Levá část uživatelského rozhraní je určena převážně pro vyčítání měřených hodnot. V této části je znázorněn model depoziční komory, elektrických zapojení iontových zdrojů, indikátory otáčení terče a clony substrátu. V pravé části se naopak nachází většina ovládacích prvků.

Při spuštění programu (Obrázek 7.2) jsou uživateli nabídnuty tři různé způsoby ovládní ❶.

- Manual.
- Semi-automatic.
- Automatic.

Kromě těchto tří tlačítek je na úvodním panelu ještě tlačítko pro ukončení programu ❷ (Exit program). Jde o jediné místo v celém programu, kde se toto tlačítko vyskytuje. Pro ukončení programu je tedy nutné vždy přejít do stavu úvodní obrazovky.

Mody Manual a Semi-automatic se liší pouze ve způsobu nastavování napětí a proudů na stabilizovaných zdrojích Mesit a Glassman. Oba tyto moduly jsou podřízeny spouštěcím povelům jednotlivých zařízení v záložce Settings. Na tuto záložku je možné se dostat následujícím způsobem. Na úvodní obrazovce je zvolen mód Manual, nebo Semi-automatic. Při přechodu do příslušného módu se v obou případech v pravém dolním rohu programu vyskytují dvě tlačítka tlačítko Exit pro opuštění zvoleného módu a tlačítko Settings. Pomocí tohoto tlačítka se dostaneme do inicializační části, ve kterém se nastavují ovládaná zařízení.



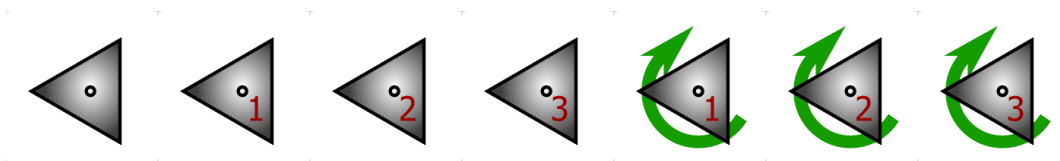
Obrázek 7.2: Úvodní obrazovka grafického rozhraní programu Kaufman v2.0

Ovládací panel záložky Settings je rozdělen do šesti bloků (Obrázek 7.5). V prvním bloku ❶ se zapínají přístroje nutné pro žhavení vlákna v iontovém zdroji. Vyskytují se zde dvě zatrhávací políčka, jedno se jmenuje Primary Heating, druhé Secondary Heating. Zatřením libovolného z těchto dvou tlačítek vyvolá na předním panelu řadu efektů. Ve výchozím nastavení jsou všechna zařízení „defaultně“ vypnuta. A na grafickém modelu v levé části displeje se nenacházejí žádné ukazatele. Zatřením tlačítka Primary Heating se na předním panelu objeví elektrické schéma zapojení a u příslušných zdrojů se zobrazí i displeje, na kterých se vyčítají reálné hodnoty nastavovaných a měřených veličin. Zatřením tlačítka Secondary Heating se v modelu objeví i elektrické schéma ovládní druhého iontového zdroje a příslušné displeje jednotlivých stabilizovaných zdrojů.

Obdobně fungují i tlačítka pro ovládní zdrojů Glassman. Jde o zatrhávací políčka Primary Extraction a Secondary Extraction ❷. Při zatření těchto políček se na grafickém modelu zobrazí příslušné elektrické zapojení s displejem reálných hodnot stabilizovaných zdrojů.

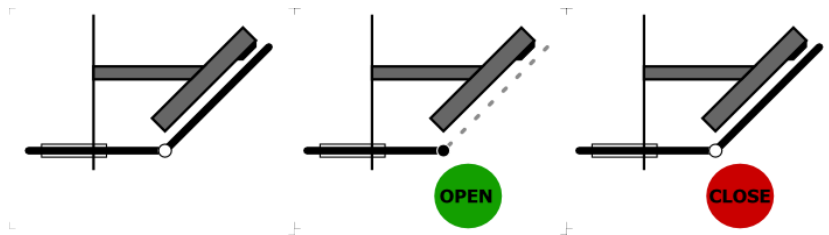
Zaškrtnutím těchto políček pouze docílíme spuštění jednotlivých AD/DA převodníků. Aby bylo možné přístroje reálně ovládat, je nutné přepnout příslušné tlačítkové přepínače na zadní straně zdrojů do polohy ovládní pomocí počítače (poloha PC).

Ve třetím bloku na záložce Settings ❸ se nachází ovládní krokových motorů. Zapnutí ovládní těchto motorů docílíme zaškrtnutím příslušného políčka. Pokud jsou motory napájeny a je zapojen sériový kabel mezi kontrolerem motoru a počítačem, dojde k okamžitému navázání komunikace a možnosti jeho ovládní. Ihned po zapnutí motorů dojde k vykonání jejich pohybu a přenastaví se naposledy použitá poloha (např. byl-li při minulém spuštění komunikace terč na poloze 3, dojde při zapnutí krokového motoru k jeho přenastavení). Aktuální poloha terče je znázorněna na spodním rohu modelu terče. Pokud je terč nastavován, je indikátorem pohybu zelená šipka ve směru otáčení terče a ve spodním rohu je zobrazeno číslo terče, který bude nastaven. Všechny indikátory pohybu a polohy jsou znázorněny na Obrázek 7.3.



**Obrázek 7.3:** Indikátory polohy a pohybu terče (zleva doprava: ovládní terče je vypnuto, terč nastaven do polohy 1, 2, 3, nastavování terče do polohy 1, 2, 3)

Obdobně je nastavována pozice clony substrátu. Indikátory polohy clony substrátu jsou na Obrázek 7.4.



**Obrázek 7.4:** Indikátory polohy clony substrátu (zleva: ovládání není povoleno, clona je otevřena, clona je zavřena)

V tomto bloku ovládání terčů a clony substrátu se na záložce Settings vyskytují ještě tři numerická políčka nazvaná Target 1, Target 2 a Target 3 a hodnota nastavovaných parametrů je Microstep. Jde o závěrečnou korekci polohy motorů. Motor najde polohu relativní polohy jednotlivých terčů a pomocí korekčních hodnot dojde k závěrečnému natočení do požadované polohy. Vedle zaškrťávacích políček pro zapínání a vypínání motorů se nachází ještě políčka reset. Zaškrtnutím těchto políček dojde k okamžitému zaslání resetovacího povelu do kontroleru a vypnutí pohybu motoru.

Pokud je v nastavení povoleno řízení motorů, jsou na panelu zobrazena dva tlačítka pro jejich ovládání. Pod grafickým modelem znázorňující clonu substrátu se objeví tlačítko pro její otevření (respektive zavření). Ve spodní části se zobrazí třípolohové tlačítko, kterým lze nastavit požadovaný terč.

Čtvrtým blokem **4** na záložce Settings je povolení ovládání tloušťkoměru. Povolení je opět uskutečněno zaškrtnutím příslušného políčka, a pokud je zařízení zapnuto a sériový kabel je propojen s počítačem, dojde k jeho inicializaci. Pod zaškrťávacím políčkem se nacházejí tři numerická políčka, do kterých je možné vložit hodnotu hustoty naprašovaného materiálu, z-faktoru a toolingu. Nahrání těchto hodnot do zařízení se uskuteční stisknutím tlačítka Set. Parametry naprašovaného materiálu je možné volit buď individuálně, nebo je možné je načíst z tabulky hodnot. Tuto tabulku si lze zobrazit stisknutím tlačítka load. Ze zobrazené tabulky si uživatel vybere požadovaný materiál a stisknutím dalšího tlačítka Load jsou hodnoty nahrány do panelu na záložce Settings. Nahrání těchto parametrů do zařízení lze uskutečnit opět stisknutím tlačítka Set. Po nahrání parametrů je nutné tlačítko Set odstavit.

Při zaškrtnutí políčka ovládání tloušťkoměru se na grafickém panelu v levém spodním rohu zobrazí čtyři indikátory, do kterých jsou načítány parametry hustoty, z-faktoru, toolingu a frekvence krystalu tloušťkoměru. V této oblasti lze zkontrolovat, zda byly parametry do zařízení zapsány či nikoli. Nad těmito hodnotami se ještě zobrazí ohraničená oblast s vyčítanými hodnotami tloušťky naprašovaného materiálu, rychlosti depozice a času depozice. Pod těmito indikátory je ještě tlačítko Reset, kterým lze hodnoty tloušťky a času vynulovat.

Na spodní části záložky Settings se ještě nachází zaškrťávací políčka pro měření tlaku příslušným senzorem **5**. Při jejich zaškrtnutí bude v panelu PE(mbar), respektive PI(mbar) zobrazena reálná hodnota měřených tlaků. Přesnost zobrazovaných hodnot tlaků zcela závisí

na přesnosti použitého kalibračního souboru. Nahrání kalibračního souboru do programu bylo popsáno v jedné z předešlých kapitol.

Posledními zaškrťovacími políčky jsou políčka pro zapínání měrek toku plynu ⑥. Po zaškrtnutí těchto tlačítek se v blízkosti grafického modelu primárního, respektive sekundárního zdroje zobrazí displej nastavené hodnoty na měrce tlaku. Dále jsou zobrazeny ovládací prvky na hlavních panelech ovládání pomocí manuálního, respektive semi-automatického, modu. Pro ovládání měrky toku plynu je nutné ji nejdříve uvést do stavu ovládání externím zařízením (popsáno výše).

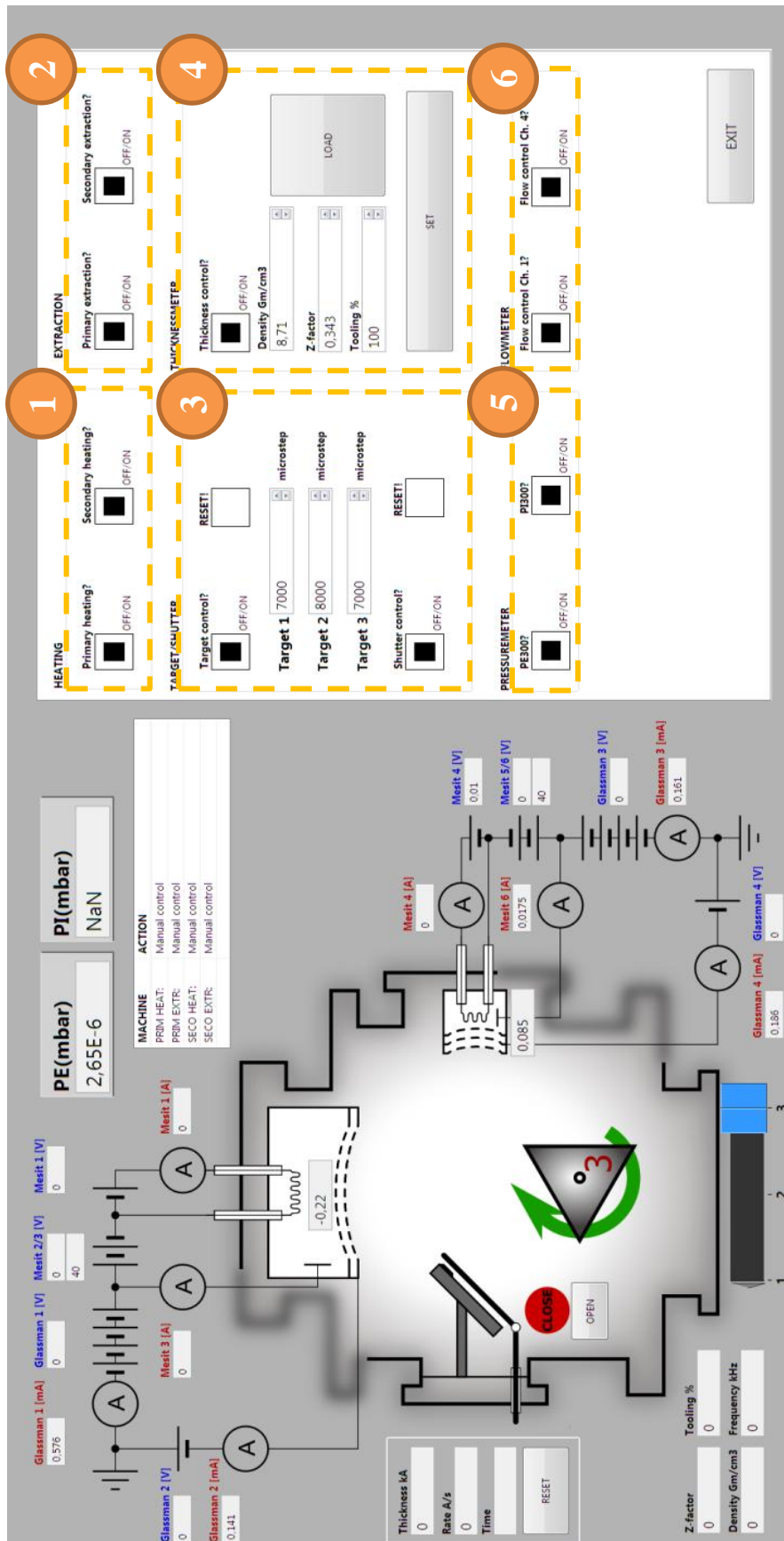
Při všech zaškrtnutých políčkách ovládání extrakce iontu a žhavení vlákna na primárním i sekundárním zdroji a zaškrtnutých políčkách pro nastavování hodnot na měrce toku se na panelu manuálního ovládání (Obrázek 7.6) zobrazí 10 ovládacích prvků. Pomocí prvků Ch. 1 Flow a Ch. 4 Flow je možné nastavovat požadovanou hodnotu toku plynu. Dalšími ovládacími prvky se nastavují hodnoty na stabilizovaných zdrojích. Pro účely žhavení vlákna je možné manuálně nastavovat hodnotu napětí na zařízení M2 (M5) a hodnotu proudu na M1 (M4). Pro účely extrakce iontů jsou zde ovládací prvky, kterými lze nastavovat hodnoty napětí na G1 (G3) a G2 (G4).

Pokud se nacházíme v panelu poloautomatického ovládání, je při všech nastavených zaškrtnutých políčkách a na panelu zobrazeno 16 ovládacích prvků (Obrázek 7.7). Ovládání měrky toku je totožné s ovládáním na panelu manuálním. Na ostatních ovládacích se nastavují pouze koncové hodnoty, kterých chceme při žhavení vlákna a extrakce iontů dosáhnout. Například při použití primárního iontového zdroje je nastaveno koncové napětí na M2 na hodnotu 0 V, koncový proud mezi katodou a anodou (proud na M3) na 1,5 A. Napětí na G1 600 V a napětí na G2 200 V. Stabilní extrakce navíc bude dosaženo, pokud na G1 bude při extrakci nastaven proud na 50 mA. Automatického žhavení vlákna je při nastavených parametrech spuštěno zaškrtnutím políčka Heat prim? (respektive Heat seco?). Pokud chceme současně dosáhnout i extrakce iontů, je zaškrtnuto také políčko Extr prim? (Extr seco?).

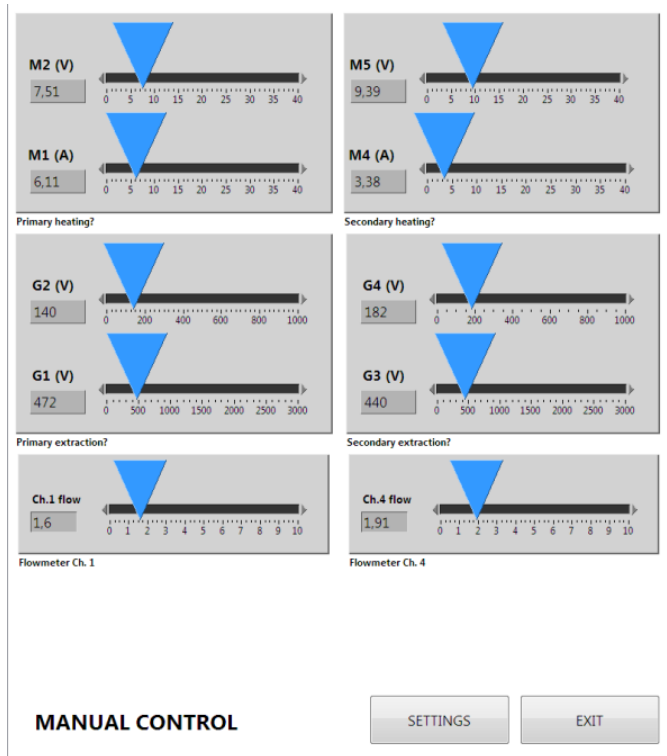
Pokud je již v depoziční komoře prováděna extrakce iontů a dojde k „odškrtnutí“ políčka extrakce, tak se program bude snažit vrátit na hodnoty koncových proudů mezi anodou a katodou v iontovém zdroji. Tedy návrat na hodnoty před provedením povelu extrakce iontů. Zaškrťovací políčko pro žhavení vlákna je nadřazeno funkci extrakce iontů. Pokud dochází v zařízení k extrakci iontů a políčko Heat prim? (Heat seco?) je odškrtnuto, dojde k vypnutí všech zdrojů a jejich uvedení do počátečního stavu.

Činnost jednotlivých stabilizovaných zdrojů (respektive zdrojů iontových) v poloautomatickém a automatickém modu lze vyčítat v informačním panelu, ve kterém jsou zobrazovány komentáře a funkce, které na zařízeních právě probíhají. V tomto panelu jsou také zobrazované chybové zprávy.

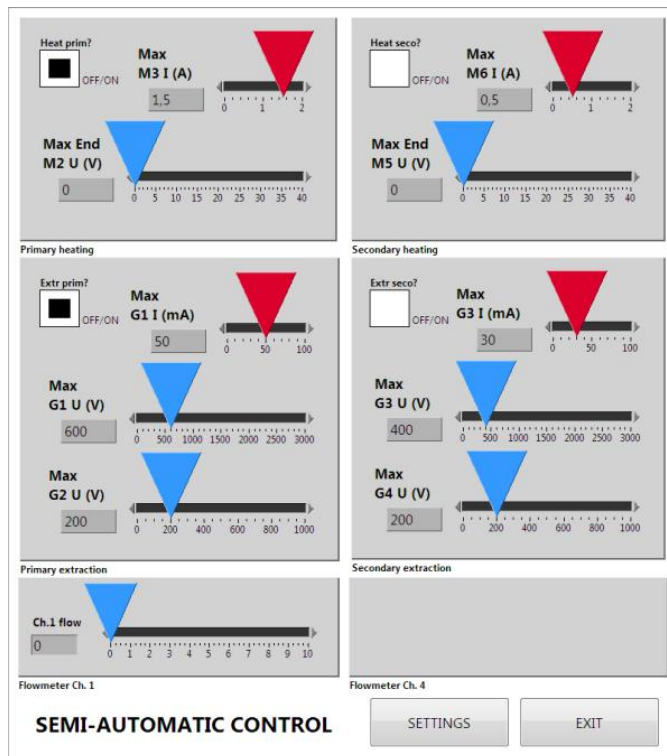
Činnost přístrojů je také možné určit z grafických indikátorů na modelu depoziční komory.



Obrázek 7.5: Záložka Settings programu Kaufman v2.0



Obrázek 7.6: Ovládací panel manuálního módu

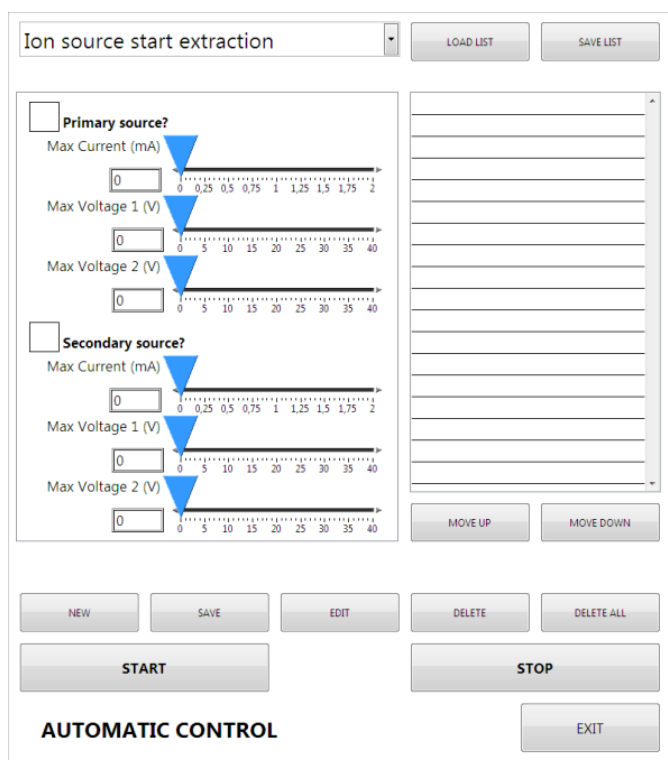


Obrázek 7.7: Ovládací panel poloautomatického módu

Panel automatického módu je na Obrázek 7.8. Na tomto panelu je možné vytvářet ovládací soubory. V rolovacím menu na horní straně si uživatel vybere zařízení, které chce ovládat, a nastaví na něm příslušné parametry. Příkaz se do řady povelů uloží následovně. Nejprve je



nutné do povelového souboru přidat nový příkaz tlačítkem New. V listu příkazů je zobrazen jako New command. Pokud je tento příkaz zabrán a stiskne se tlačítko Save, jsou do tohoto příkazu uloženy parametry nastavené pro dané zařízení. Tlačítkem Edit je možné příkazy zpětně editovat. Dalšími tlačítky Delete (Delete all) se příkazy z povelového souboru mažou. A tlačítka Move up, Move down je možné příkazy přeřazovat. Vytvořený povelový soubor je možné uložit pomocí tlačítka Save, případně zpětně nahrát tlačítkem Load. Vykonávání povelů se spustí tlačítkem Start.



**Obrázek 7.8:** Ovládací panel automatického modu

## 8 Testování automatické depozice

V rámci testování automatické depozice vzorku byla připravena multivrstva o struktuře Si/SiO<sub>2</sub>/CoO - 6 nm/Co - 5 nm/Cu - 3 nm/NiFe - 5 nm/Cu - 2 nm. Jde o multivrstvu vykazující vlastnosti obří magnetorezistence (GMR).

Tato vrstva byla vyrobena následujícím postupem

1. Zapnutí měřky toku a proplachování primárního iontového zdroje pracovním plynem.
  - Argonem (Ar) 5 minut při toku 4 sccm.
  - Kyslíkem (O<sub>2</sub>) 5 minut při toku 10 sccm.
2. Spuštění extrakce iontů na primárním iontovém zdroji a následné čištění terčů. Používaný pracovní plyn byl pouze argon s nastaveným tokem 4 sccm. Otáčení bylo řízeno prostřednictvím krokových motorů.
  - Čištění měděného terče (Cu) 5 minut.
  - Čištění kobaltového terče (Co) 5 minut.
  - Čištění permalloyového terče (NiFe) 5 minut.
3. Puštění O<sub>2</sub> do komory iontového zdroje s tokem 10 sccm. Otevření clony substrátu a následná depozice mědi po dobu 1 minuty 30 vteřin.
4. Uzavření plynu O<sub>2</sub> a čištění všech terčů po dobu 5 minut.
5. Depozice 2,9 nm kobaltu, následná depozice 1,8 nm mědi, 3,1 nm permalloye a 1,2 nm mědi. Deponované tloušťky materiálu jsou odečítány na tloušťkoměru a před depozicí každého materiálu byla otevřena clona substrátu. Na konci depozice došlo k uzavření clony a otočení držáku terčů krokovým motorem na příslušný materiál.
6. Ukončení extrakce iontů.

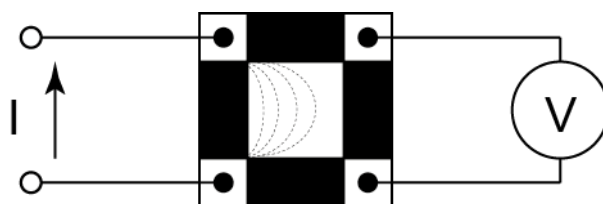
Obří magnetorezistivita je vlastnost speciálních multivrstev. Tyto vrstvy vykazují růst odporu ve vhodně orientovaném magnetickém poli. Jedná se zpravidla o multivrstvy tvořené dvěma feromagnetiky, které jsou odděleny diamagnetickými vrstvami.

Umístěním takových multivrstev do proměnlivého magnetického pole dochází k postupnému přemagnetování jednotlivých vrstev multivrstvy. Rozlišujeme dva stavy, antiparalelní magnetizaci ( $\uparrow\downarrow$ ) a magnetizaci paralelní ( $\uparrow\uparrow$ ). Antiparalelní je stav, ve kterém jsou jednotlivé vrstvy feromagnetického materiálu zmagnetizované proti sobě. Paralelní magnetizace znamená, že jsou obě vrstvy zmagnetizované ve shodném směru. Z těchto hodnot můžeme vypočítat hodnotu GMR následující rovnicí

$$GMR = \frac{R_{\uparrow\downarrow} - R_{\uparrow\uparrow}}{R_{\uparrow\uparrow}}. \quad (8.1)$$

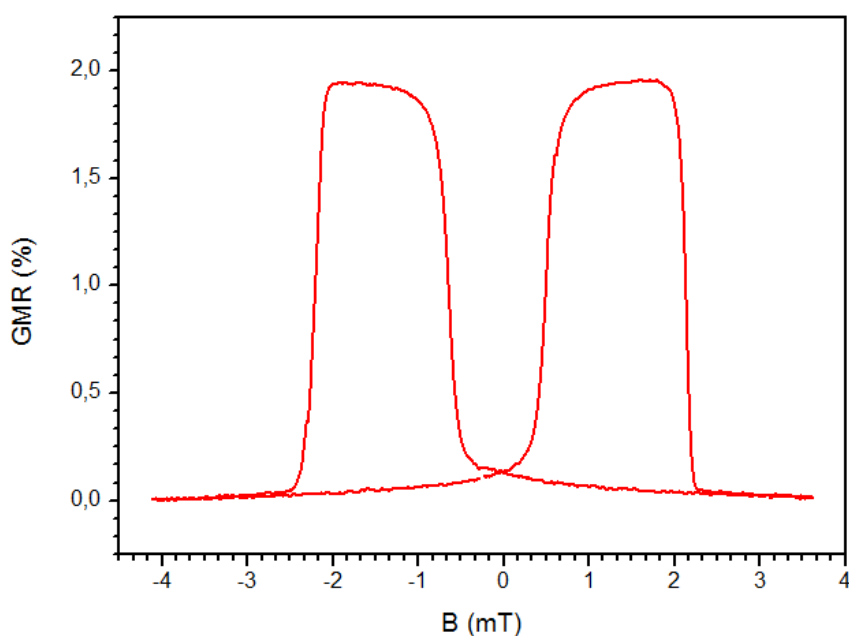
Vlastnosti připravené vrstvy byly charakterizovány pomocí měření elektrotransportních vlastností (magnetorezistivity). Pro měření rezistivity vrstev byla použita čtyřbodová metoda dle Van der Pauwa (Obrázek 8.1). Metoda spočívá v geometrickém omezení toku proudu materiálem a zároveň eliminuje vliv velikosti přírodních kontaktů. Na dva konektory proměřovaného materiálu je přiveden konstantní proud. Na zbylých dvou konektorech je měřeno napětí. Aplikací magnetického pole se mění rezistivita proměřovaného materiálu a na

konektorech je čtena rozdílná hodnota napětí. Podílem měřeného napětí a konstantní hodnoty proudu dostaneme odpor měřené multivrstvy.



**Obrázek 8.1:** Von der Pauw metoda měření rezistivity

Pro stanovení GMR se odečítá napěťová odezva na struktuře při konstantním proudu v závislosti na intenzitě vnějšího magnetického pole.



**Obrázek 8.2:** Proměřená charakteristika GMR nadeponované multivrstvy

Na Obrázek 8.2 je křivka námi deponované multivrstvy. Vrstva vykazuje očekávané vlastnosti, čímž byla úspěšně prokázána možnost depozice pomocí automatického modu.

## Závěr

Diplomová práce se zabývá automatizací procesu depozice. Pro účely automatizace bylo nutné vyřešit problémy počítačové komunikace se všemi používanými přístroji. Jmenovitě šlo o komunikaci s měrkou tlaku, tloušťkoměrem a průtokoměrem. Dále bylo nutné vyřešit počítačové ovládání všech stabilizovaných zdrojů napětí, které řídí iontové zdroje depoziční aparatury. Při tvorbě multivrstvých struktur je nezbytná výměna terčů deponovaných materiálů a ovládání clony substrátu. Ovládání těchto mechanických úkonů bylo nutné vyřešit.

Při zavádění automatizace je nutné detailní pochopení všech mechanických a elektrických procesů, které během depozice tenkých vrstev v zařízení nastávají. První kapitola této práce je proto věnována základním teoretickým poznatkům, které jsou nutné ke správnému pochopení základů fyzikálních dějů při tvorbě tenkých vrstev.

V dalších kapitolách je popsána celá depoziční komora, její mechanické části a je zde vysvětlena jejich funkce. Obdobně jsou popsány všechny přístroje, které se starají o správný chod aparatury a na kterých je samotný proces úspěšné depozice závislý.

Následuje výčet všech mechanických úkonů, které je potřeba při manuálním ovládání vykonat. V kapitole 4 je popsán způsob, kterým je depoziční aparatura uvedena do chodu. Zvláštní pozornost je věnována samotnému procesu depozice tenkých vrstev. Jsou zde naznačeny postupy, které lze zautomatizovat, a postupy, které pro svou značnou mechanickou náročnost bude i nadále nutné ovládat manuálně.

V hlavní části diplomové práce jsou řešeny problémy spojené s automatizací celé depoziční aparatury. Bylo vymyšleno vzájemné elektrické propojení všech zařízení s počítačem. Jsou zde tedy komentovány i způsoby jakými je s dílčími přístroji komunikováno. Také byly navrženy mechanické úpravy depoziční komory pro správné ovládání manipulátorů držáku terčů a clony substrátu. Pro tuto funkci bylo zavedeno ovládání pomocí krokových motorů.

Sedmá kapitola je věnována programování aplikace pro automatické řízení depozice. Pro svou přehlednost bylo použito programovacího nástroje LabVIEW, prostřednictvím kterého bylo naprogramováno celé uživatelské rozhraní. Program kromě automatického modu nabízí uživateli také mod, při kterém lze s jednotlivými přístroji komunikovat nezávisle.

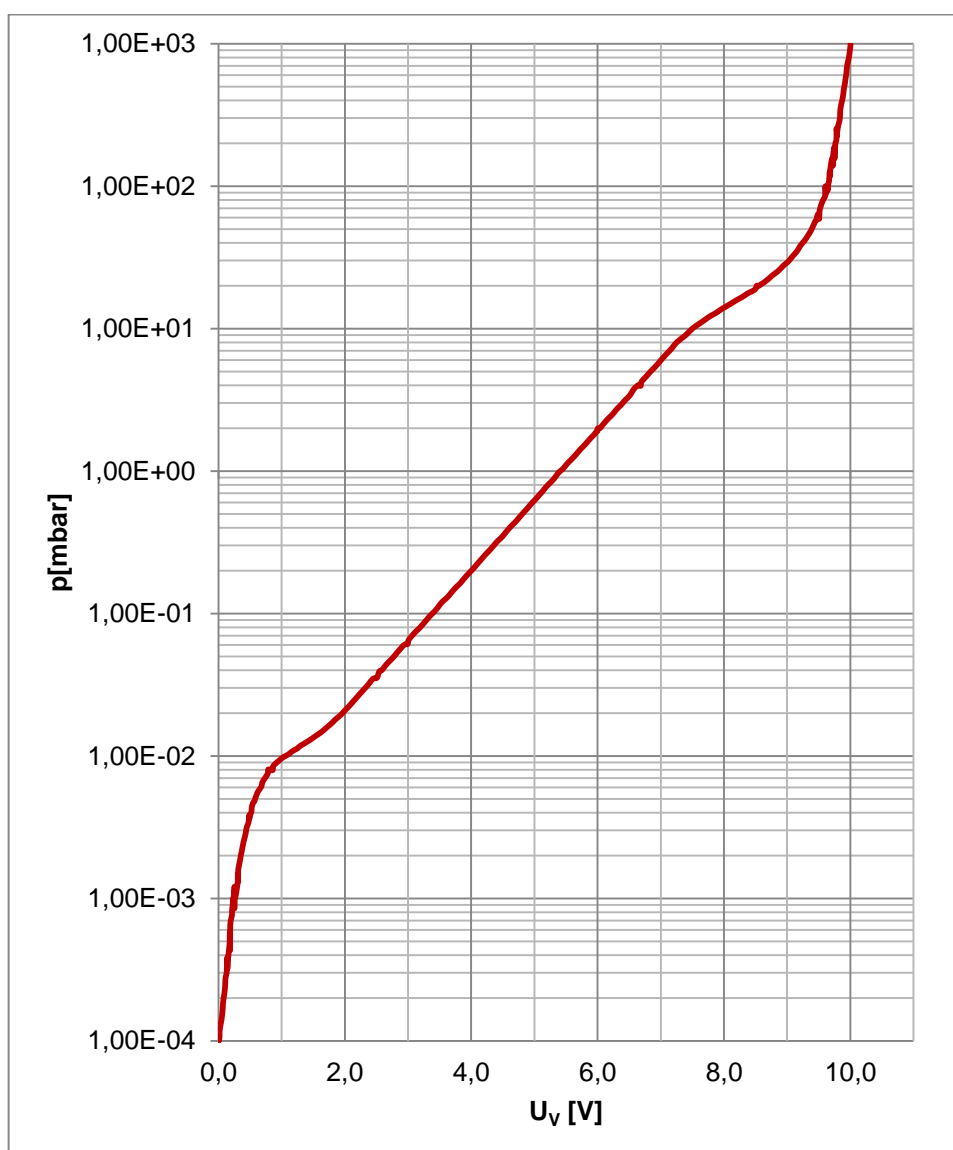
V závěru diplomové práce byla otestována správná funkčnost programu při depozici multivrstvé struktury. Ta byla následně proměřena z hlediska vlastnosti obří magnetorezistence a z výsledků, které odpovídaly předpokládaným hodnotám, bylo vyvozeno, že program pro automatickou kontrolu depozice je možno začít používat k přípravě multivrstvých struktur na Ústavu fyzikálního inženýrství.

## Dodatek A. Počítačová komunikace s přístroji

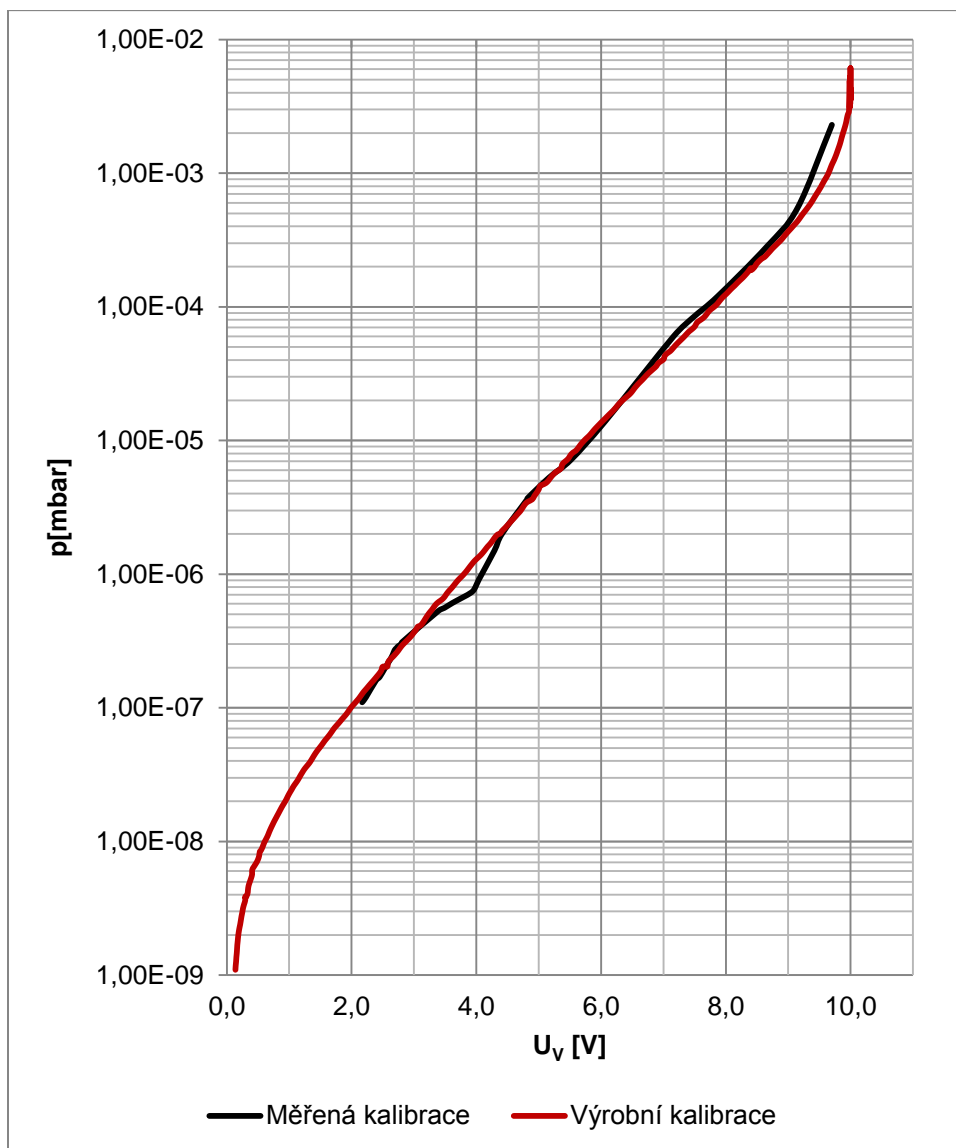
Dodatek je věnován detailům počítačového ovládání jednotlivých přístrojů a přímo tak navazuje na kapitolu 6. Bude popsáno jejich propojení s počítačem a způsoby, jakým lze nastavovat a vyčítat požadované hodnoty.

### A.1 Měrka tlaku Balzers TPG300

Na Obrázek 0.1 a Obrázek 0.2 jsou znázorněny kalibrační křivky udávané výrobcem. Pro měrku PE300C9 byly hodnoty i proměřeny použitím nezávislé měrky tlaku. Naměřené hodnoty lze s výrobními porovnat na Obrázek 0.2.



Obrázek 0.1: Kalibrační křivka měrky tlaku PI300D



**Obrázek 0.2:** Kalibrační křivka měrky tlaku PE300C9

Pro vyčítání dat je použit analogově digitální převodník firmy National Instruments NI USB-6229. Toto zařízení obsahuje analogové vstupy, na které je možné přivést napětí 0 – 10 V. Rozlišení vstupních kanálů je výrobcem udáváno 16 bitů. Toto rozlišení je pro vyčítání tlaku dostatečně přesné, přestože bylo měřením zjištěno, že jsou poslední 3 bity zašumělé.

## A.2 Průtokoměr 247

Ovládání průtokoměru pomocí počítače je spojeno s nastavením zařízení pomocí páčkových přepínačů na předním panelu přístroje. Nastavované hodnoty také podléhají nastavení na průtokoměru, proto bude přístroj popsán detailněji. Na předním panelu průtokoměru se kromě digitálního displeje nachází sada vypínačů a ovládacích prvků pro manuální nastavení. V levé části přístroje je hlavní páčkový vypínač (power on-off), kterým se zařízení uvede do provozu. V horní části se nachází čtyři třípolohové přepínače. Každý z těchto přepínačů ovládá jeden snímač. Polohy přepínače jsou, on, off a rem, které zapínají a vypínají jednotlivé snímače. Pokud je přepínač v poloze rem (remote) je možné jednotlivé snímače zapínat a

vypínat externě (tedy případně pomocí počítače). Nad těmito přepínači je umístěna led dioda, která indikuje zapnutí jednotlivých snímačů.

Ve spodní části předního panelu jsou čtyři skupiny ovládacích prvků (pro každý snímač jedna skupina). V každé skupině se nachází dva páčkové přepínače a dva seřizovací šrouby. Prvním přepínačem (set point source) se volí způsob, kterým jsou zadávány hodnoty do kontroleru. Jeho polohy jsou flow, ratio a ext. Je-li přepínač v poloze flow, nastavuje se tok plynu na předním panelu tohoto zařízení. Při poloze ratio je možné nastavovat hodnoty pomocí externího převodníku a v poloze ext je možné hodnoty zadávat přímo pomocí externího signálu. Druhým přepínačem (read / set point) se volí zobrazovaná hodnota na digitálním displeji. Je možné si zobrazit hodnotu na průtokoměru nastavovanou (pozice set pt.), nebo hodnotu čtenou snímačem (pozice read). Dalšími ovládacími prvky jsou justovací šrouby nulové hodnoty (zero), na které se zařízení kalibruje pro nulovou hladinu toku, a nastavovaného toku (set point), kde se nastavuje požadované množství plynu v procentech rozsahu na průtokoměru.

Posledním ovládacím prvkem na předním panelu je čtyřpolohový otočný přepínač, kterým se volí snímač, jehož hodnoty budou zobrazeny na digitálním displeji.

Na zadním panelu přístroje MKS 247 se nacházejí čtyři otočné potenciometry (scaling control potentiometers), kterými se nastavuje konstanta, jíž je každý signál ze snímačů násoben tak, aby na předním panelu byla zobrazena přímo hodnota v jednotkách sccm, nebo slm (sccm – standard cubic centimeters per minute, slm – standard liters per minute). Posledními ovládači na zadním panelu jsou justovací šrouby nastavující desetinnou čárku (decimal point selector) hodnot zobrazovaných na předním panelu. Na zadní straně se nacházejí ještě čtyři konektory pro připojení jednotlivých snímačů a dále dva konektory, jeden 9 pinový a jeden 25 pinový, pro ovládání pomocí externího zařízení.

Při ovládání pomocí externího zřízení je nutné přístroj manuálně spustit, přepínače pro ovládání jednotlivých snímačů nastavit do polohy rem a přepínač způsobu zadávání hodnot do polohy ext. Jak již bylo řečeno, je možné pro ovládání využít 9, nebo 25 pinový konektor. V našem případě jsme zvolili 25 pinový konektor, protože 9 pinovým lze ovládat pouze snímač na kanálu 1. Význam jednotlivých pinů 25 pinového konektoru je rozepsán v Tabulka 0.1.

Pin	Úkol	Pin	Úkol
1	signálová zem	14	výstup snímače kanálu 2
2	výstup snímače kanálu 1	15	měřený výstup kanálu 2
3	měřený výstup kanálu 1	16	výstup snímače kanálu 3
4	nastavovaný vstup kanálu 1	17	měřený výstup kanálu 3
5	nastavovaný vstup kanálu 2	18	výstup snímače kanálu 4
6	nastavovaný vstup kanálu 3	19	měřený výstup kanálu 4
7	nastavovaný vstup kanálu 4	20	nepřiřazeno
8	digitální zem	21	nepřiřazeno
9	napájecí zem	22	nepřiřazeno
10	zap/vyp snímače kanálu 2	23	nepřiřazeno
11	zap/vyp snímače kanálu 3	24	nepřiřazeno
12	zap/vyp snímače kanálu 1	25	uzemnění šasi
13	zap/vyp snímače kanálu 4		

**Tabulka 0.1:** rozpis funkce jednotlivých pinů 25 pinového konektoru

Depoziční aparatura využívá dvou snímačů, pro každý iontový zdroj jeden. Snímače jsou na kanálech 1 a 4, proto je na konektoru nutné zapojit pouze vodiče ovládající tyto kanály.

Pro zapínání a vypínání těchto kanálů jsou využity piny 8, 12 a 13. Zapínání se uskutečňuje pomocí TTL signálu, kdy napěťová úroveň 5 V odpovídá hodnotě logická 0 a snímač bude vypnut. Hodnota 0 V odpovídá logické 1 a snímač se zapne. Zapnutí a vypnutí jednotlivých snímačů, stejně jako při manuálním ovládnání, indikuje led dioda na předním panelu. Pro nastavování hodnot jsou zapojeny piny 1, 4 a 7. Hodnoty jsou nastavovány analogovým signálem 0 – 5 V, které odpovídají 0 – 100 % rozsahu toku nastaveného na zařízení (nastavením hodnoty 2,5 V mezi piny 1 a 4 bude zařízení nastaveno na 50 % toku). Vyčítání hodnot je možné měřením napětí mezi piny 1 a 3 pro kanál 1 a mezi piny 1 a 19 pro kanál číslo 4. Pro měření je využito těchto pinů, protože se jedná o hodnoty, které jsou přímo zobrazeny na displeji průtokoměru. Kdybychom využili místo pinů 3 a 19 piny 2 a 18, měřili bychom napětí, které vysílá samotný snímač. Měřená napětí jsou v rozmezí 0 – 1 V, což odpovídá 0 – 100 % toku nastaveného na průtokoměru.

Ovládnání průtokoměru je realizováno pomocí AD/DA převodníku NI USB-6229. Tento převodník obsahuje digitální výstupy, na kterých lze generovat TTL signál (0 a 5 V), nastavovat analogový signál 0 – 10 V a měřit vstupní signál 0 – 10 V. Rozsahy tohoto zařízení tedy zcela pokrývají nastavované a měřené hodnoty na průtokoměru.

### A.3 Tloušťkoměr STM 100/MF

V případě zařízení STM 100/MF dochází k přepočtu mezi frekvencí kmitání krystalu a tloušťkou deponované vrstvy dle vztahu

$$A_f = \left[ \frac{N_q \cdot D_q}{\pi \cdot D_f \cdot z \cdot F_c} \right] \cdot \arctan \left\{ z \cdot \tan \left[ \frac{\pi \cdot (F_q - F_c)}{F_q} \right] \right\}, \quad (6.1)$$

kde  $A_f$  tloušťka deponované vrstvy v angströmech,  $N_q$  konstanta frekvence nabroušeného krystalu,  $1,668 \cdot 10^{16} \text{ Hz} \cdot \text{Å}$ ,  $D_q$  hustota křemene,  $2,648 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $D_f$  hustota naprašovaného



materiálu v  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $z$ -faktor naprašovaného materiálu,  $F_c$  frekvence čistého krystalu (tato hodnota je konstantní a udávaná výrobcem) a  $F_q$  frekvence krystalu při naprašování materiál.

Z předešlého vztahu je patrné, že je nutné pro měření různých materiálů vždy zařízení přenastavit. Nastavovanými parametry jsou hustota naprašovaného materiálu a  $z$ -faktor.  $Z$ -faktor lze vypočítat dle rovnice

$$z - faktor = \sqrt{\frac{D_q \cdot U_q}{\frac{D_f}{U_f}}}, \quad (6.2)$$

kde  $U_q$  je modul pružnosti ve smyku křemene a  $U_f$  modul pružnosti ve smyku naprašovaného materiálu.

Všechny ostatní parametry jsou známy a hodnota frekvence krystalu je měřena. Hodnoty hustot a  $z$ -faktorů nejběžněji používaných materiálů při depozici metodou IBAD/IBS jsou v Tabulka 0.2. Další hodnoty hustot a  $z$ -faktorů (respektive parametrů, ze kterých se vypočítají) lze nalézt v technických tabulkách.

Materiál	Značka	Hustota ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Z-faktor
Zlato	Au	19,3	0,381
Stříbro	Ag	10,5	0,529
Kobalt	Co	8,71	0,343
Měď	Cu	8,93	0,437
Titan	Ti	4,5	0,628

**Tabulka 0.2:** Hodnoty hustot materiálů a příslušných  $z$ -faktorů

Posledním parametrem, který je při každé depozici nutné nastavovat, je tzv. tooling. Tooling je konstanta, kterou je naměřená hodnota tloušťky materiálu vynásobena. Jde o geometrickou korekci, kterou se eliminuje rozdílná pozice substrátu, na kterou se materiál deponuje, a pozice tloušťkoměru, na které se tloušťka vyčítá.

Ovládání zařízení STM 100/MF je prostřednictvím sériového rozhraní a sběrnice RS-232, nebo pomocí sběrnice IEEE-488. Nastavení komunikace se provádí přepínačem na zadní straně zařízení. Jednotlivé přepínače jsou označeny jako SW1 - SW12 a o komunikaci se starají SW5 – SW12. Přepínač SW5 určuje způsob zadávání příkazů do zařízení. Jedná se o protokoly SECS-II nebo Sycon protocol. Pomocí přepínačů SW6 a SW7 se nastavuje přenosová rychlost a zbylé přepínače SW8 – SW12 udávají adresu zařízení (nutná pro komunikaci přes IEEE-488). V našem případě komunikujeme se zařízením prostřednictvím sériového portu. Všechny přepínače jsou nastaveny na hodnotu OFF, pouze SW6 a SW7 na hodnotu ON, což znamená nastavení přenosové rychlosti na  $9600 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Přestože je komunikace závislá na použitém komunikačním protokolu, samotné hlavní příkazy jsou stejné. Protokoly se liší pouze rozdílnými prefixy před příkazy a sufixy za příkazy. Příkazy jsou tvořeny jednoduchými ASCII znaky s nastavenými parametry.

Při zavedení automatizace je nutné na zařízení nastavovat parametry hustoty materiálu, z-faktoru a tooling. Hodnoty, které chceme vyčítat, jsou doba depozice a frekvence krystalu. Dále budeme vyčítat hodnotu rychlosti depozice a tloušťky naprašovaného materiálu, přestože je lze z frekvence krystalu a doby depozice vypočítat. Nakonec bude nutné hodnoty času a tloušťky depozice vynulovat. V Tabulka 0.3 jsou vypsány všechny příkazy a jejich funkce, které budou použity při programování. Pro další příkazy je možné nahlédnout do manuálu.

Příkaz	Parametr	Příklad	Funkce
B	-	B	Vynuluje čas a naměřenou tloušťku
C	-	C	Vynuluje tloušťku
D	-	D	Vynuluje čas
E	0.500-99.99	E=12.34	Nastaví hustotu materiálu na $12,34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$
	?	E?	Pošle hodnotu nastavení hustoty
F	0.100-9.999	F=1.234	Nastaví z-faktor na 1,234
	?	F?	Pošle hodnotu nastaveného z-faktoru
J	10.0-399	G=12.34	Nastaví tooling na 12,34 %
	?	G?	Pošle hodnotu nastaveného toolingu
S	-	S	Pošle hodnotu naměřené tloušťky v Å
T	-	T	Pošle hodnotu naměřené rychlosti depozice v Ås <sup>-1</sup>
U	-	U	Pošle hodnotu frekvence krystalu v Hz
W	-	W	Pošle hodnotu doby depozice ve formátu minut:sekund

**Tabulka 0.3:** Povelové příkazy tloušťkoměru STM 100/MF

## A.4 Iontové zdroje

Depoziční aparatura Kaufman je osazena dvěma iontovými zdroji. Každý z nich je ovládán pomocí kaskády stabilizovaných zdrojů firmy Glassman a Mesit.

Přestože je depoziční aparatura napájena třemi různými typy zdrojů Glassman (WX, ER, EH), jejich ovládání je vždy stejné. Na přední straně těchto zdrojů se nacházejí dva potenciometry, kterými se dají manuálně nastavovat hodnoty na výstupu. Jeden potenciometr se používá při zapojení přístroje jako zdroje napětí, druhý při zapojení jako zdroje proudu. Na přední straně se dále nachází analogové ukazatele napětí a proudu a přepínač pro zapnutí přístroje. Zdroje typu WX a ER mají navíc tlačítko pro spuštění vysokého napětí.

Na zadní straně těchto přístrojů se nachází konektor pro připojení vysokonapěťového kabelu a port, jehož modifikací lze zařízení ovládat externě. Portem je myšlena série šroubovacích svorek, kdy každá ze svorek má předem určenou vlastnost. Výčet vlastností je v Tabulka 0.4.

Glassman EH		Glassman ER		Glassman WX	
Č. portu	Vlastnost	Č. portu	Vlastnost	Č. portu	Vlastnost
1	Ground	1	Ground	1 (TB1)	X1
2	Common	2	Common	2 (TB1)	I-Monitor
3	Interlock	3	Interlock	3 (TB1)	V-Monitor
4	V-Monitor	4	V-Monitor	4 (TB1)	Interlock
5	V-Program	5	V-Program	5 (TB1)	Common
6	Local V-Control	6	Local V-Control	6 (TB1)	Ground
7	I-Monitor	7	I-Monitor	1 (TB2)	HV Enable
8	I-Program	8	I-Program	2 (TB2)	Reference
9	Local I-Control	9	Local I-Control	3 (TB2)	Local I-Control
10	Reference	10	Reference	4 (TB2)	I-Program
11	HV Enable	11	HV Enable	5 (TB2)	Local V-Control
12	X1	12	X1	6 (TB2)	V-Program

**Tabulka 0.4:** Vlastnosti svorek stabilizovaných zdrojů Glassman

Při manuálním ovládní jsou ve všech případech propojeny navzájem svorky Ground, Common a Interlock, dále jsou navzájem propojeny Local I-Control a I-Program, Local V-Control a V-Program a také Reference a HV Enable.

Při ovládní pomocí počítače je nutné rozpojit svorky mezi Local I-Control a I-Program a také mezi Local V-Control a V-Program. Tímto způsobem dojde k vyřazení potenciometrů na předních stranách stabilizovaných zdrojů. Přivedeme-li napětí v rozmezí 0 – 10 V mezi svorky Ground a V-Program (respektive I-Program), bude tato hodnota přepočítaná na celý rozsah napětí (respektive proud), který je možné na zařízení nastavit. Poté bude tato hodnota na zdroji nastavena (př. Glassman WX má rozsah 0 – 3000 V, mezi svorky Ground a V-Program přivedu napětí 2,5 V, na výstupu zdroje se nastaví 750 V).

Obdobně jsou hodnoty z těchto stabilizovaných zdrojů vyčítány. Mezi svorky Ground a V-Monitor (I-Monitor) nastavuje stabilizovaný zdroj napětí v rozmezí 0 – 10 V. Toto napětí odpovídá hodnotám celkového rozsahu stabilizovaného zdroje.

Pro účely automatizace je nutné na těchto zařízeních nastavovat hodnoty napětí a vyčítat hodnoty generovaných proudů. Přesněji řečeno na všech zařízeních G1 – G4 je nutné nastavovat napětí a na zdrojích G1 a G3 vyčítat hodnoty proudů. K tomuto účelu je využito AD/DA převodníku firmy LabJack. Jedná se o převodník LabJack U3-HV, který mimo jiné disponuje čtyřmi analogovými vstupy rozsahu 0 – 10 V. Dále je možné toto zařízení osadit rozšiřujícími moduly LJTick-DAC, díky kterým je zařízení rozšířeno o čtyři analogové výstupy rozsahu 0 – 10 V. Je tedy možné vyčítat na všech zařízeních generovaný proud a zároveň na všech nastavovat požadované napětí.

Stabilizované zdroje firmy Mesit (oba používané typy) jsou ovládný obdobným způsobem. Na přední straně těchto zařízení se opět vyskytují dva potenciometry, dva analogové ukazatele a jeden prepínač pro zapnutí přístroje. Na zadní straně se nacházejí dva kolíky, mezi kterými je nastavováno požadované napětí (proud), a dvě řídicí zásuvky. Zásuvkou je v tomto případě myšlena série 20 zdířek, do kterých jsou vkládány piny. Obě řídicí zásuvky jsou stejné a navzájem propojené, stačí se tedy zabývat pouze jednou. Obdobně jako u stabilizovaného

zdroje Glassman jsou i v této zásuvce při manuálním ovládní propojeny piny mezi potenciometrem a zbytkem zařízení. Rozpojením pinů mezi zdíčkou 9 a 10 (respektive 5 a 6) dojde k odpojení potenciometru nastavující napětí (respektive proud) na zdroji. Přivedeme-li mezi zdíčku 6 a 18 (uzemnění) napětí v rozmezí 0 – 10 V, je toto napětí přepočítáno na nastavovaný rozsah stabilizovaného zdroje. Vyčítání nastavovaných hodnot napětí je možné mezi zdíčkami 20 a 18 (respektive proud mezi 2 a 18). Tyto hodnoty jsou opět převedeny na rozsah 0 – 10 V.

Elektrická zapojení stabilizovaných zdrojů, jejich ovládní, návrhů mezičlenů a galvanických oddělovačů jsem řešil v rámci bakalářské práce [13]. V následujícím textu budou tedy pouze stručně popsány principy zapojení, jejichž detaily je možné dohledat v příslušné bakalářské práci.

Mezi kaskádou stabilizovaných zdrojů Mesit a zdrojů Glassman jsou připojeny galvanické oddělovače firmy Smaris. Ty jsou určeny k vzájemnému galvanickému oddělení stabilizovaných zdrojů Mesit a oddělení všech Mesitů od zdrojů Glassman, na jejichž napětí „plavou“, čímž je myšleno, že zem zdrojů Mesit je položena na napětí, která jsou nastavovány na zdrojích Glassman.

Pro žhavení vlákna v iontových zdrojích je nutné nastavovat na zařízení M1 (M4) hodnoty proudu, na M2 (M5) hodnoty napětí a na zdrojích M3 (M6) vyčítat hodnoty proudů, jako kontrolní hodnoty ještě vyčítáme napětí na M1 (M4). Zdíčky řídicích zásuvek, na kterých se tyto hodnoty nastavují, případně měří, jsou připojeny na galvanické oddělovače. Z galvanických oddělovačů poté vedou vodiči do AD/DA převodníku Baspelin SVZ.

## **A.5 Clona substrátu a otáčení terčem**

Ovládní clony substrátu a otáčení terčů je realizováno prostřednictvím krokových motorů SX23-2727 firmy Microcon. Krokové motory typu SX23-2727 byly zakoupeny jako součást kompletní vývojové sady SCD30x3. Kromě těchto motorů obsahuje sada ještě programovatelnou jednotku CD30x, napájecí zdroj PS 35 a originální software Imotion PC Utilities.

Krokový motor je ovládn programovatelnou jednotkou CD30x. Deska je vybavena kontrolerem řady M1486E1 a výkonovým zesilovačem umožňující mikrokrokování. Komunikaci s nadřazeným systémem je možné realizovat pomocí sériového rozhraní RS-232.

Na desce jednotky CD30x se nachází osm spínačů SIPA a osm spínačů SIPB. První čtyři přepínače SIPA slouží jako adresové vstupy ADDR3 – ADDR0. Tyto vstupy je nutné zapnout při paralelním ovládní řídicích jednotek většího počtu motorů. Touto adresou jsou jednotlivé motory rozlišeny a povelový soubor je nahrán pouze do příslušné programovatelné jednotky. Zapnutím adresových vstupů je také docíleno uchovávání povelového souboru v paměti kontroleru. Pokud jsou všechny adresové vstupy v poloze OFF, je povelový soubor po vypnutí napájení z kontroleru vymazán. Zbylé přepínače SIPA nejsou využity. Přepínače SIPB slouží k nastavení proudu motoru (SIPB 1 – SIPB 4) a mikrokrokování (SIPB 6 – SIPB 8). Mikrokrokování je standardně nastaveno na čtyři mikrokroky na celokrok.

Řídicí jednotka je dále vybavena čtyřmi uživatelskými výstupy (B1 – B4) a osmi vstupy (B10 – B17). Pomocí uživatelských vstupů je možné řídicí jednotku ovládat. Standardní napěťové úrovně uživatelských vstupů jsou 0 V = HIGH (logická jedna) a 24 V = LOW (logická nula).

Napájení krokového motoru a programovatelné jednotky zajišťuje zdroj napětí PS 35. Ten systému dodává napětí 48 V.

Programování řídicí jednotky CD30x, respektive kontroleru M1486E1, je umožněno pomocí sériového rozhraní RS-232. Přenosová rychlost je standardně nastavena na  $4800 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$  a formát dat je 8 data bitů, bez paritního bitu a jeden stop bit. Při navázání komunikace jsou do kontroleru zaslány jednoduché ASCII povely. Struktura je následující: povel, argument, oddělovací znak. Oddělovacím znakem je myšleno „carriage return“, tedy odřádkování klávesou Enter. Kontroler M1486E1 disponuje taky interní paměti. Paměti jsou dvě, jedná se o vstupní paměť (o velikosti 256 bitů) kontroleru a paměť povelů (o velikosti 2000 bitů). Základním zadáváním jsou příkazy ukládány do vstupní paměti a zpracovávány již při jejich nahrávání. Pokud je zdrojový kód uzavřen do hranatých závorek, povely budou zpracovány až po jejich nahrání do kontroleru. V tomto případě se program bude ukládat o paměti povelů.

Povely a jejich funkce, které budou použity při programování, jsou zobrazeny v Tabulka 0.5. Zbylé příkazy je možné dohledat v manuálu.

Příkaz	Parametr	Příklad	Funkce
\	-	\	Reset kontroleru
@	(číslo)	@1	Programová řádka je označena jako příslušné návěští (1)
B	(číslo)	B51200	Pohyb motoru v negativním směru o zadaný počet mikrokroků (51200)
C	(číslo)	C7	Nastaví zadaný vstup do hodnoty logická nula
E	-	E	Konec smyčky
F	(číslo)	F51200	Pohyb motoru v pozitivním směru o zadaný počet mikrokroků (51200)
I	(číslo) (hodnota) (číslo)	I10H1	Příkaz „if“, když zadaný uživatelský vstup (10) bude mít hodnotu logická nula (L) (logická jedna - H), potom bude proveden skok na zadané návěští (1)
J	(číslo)	J1	Skok na zadané návěští (1)
K	-	K	Přechod do brzdného režimu a ukončení povelového souboru
L	(číslo)	L256	Začátek smyčky, opakuj (256 ×) následující příkaz
R	-	R	Vykonej pohyb se zadanými parametry
U	(číslo)	U1	Pošli požadovanou hodnotu zpět do počítače
[	-	[	Odklad provádění následujících příkazů
]	-	]	Provedení předchozích příkazů
(	(číslo)	(10	Pohyb v negativním směru dokud na uživatelském vstupu nebude logická jedna (logická nula)
)	(číslo)	)10	Pohyb v pozitivním směru dokud na uživatelském vstupu nebude logická jedna (logická nula)

**Tabulka 0.5:** Povelové příkazy krokového motoru

Před vysláním povelového souboru do kontroleru je vždy nutné zapnout koncový stupeň povelom C7 (Clear 7).

Zadané příkazy se zpracovávají postupně za sebou a přeskokování v kódu je možné pouze prostřednictvím příkazu skok J, nebo příkazu „if“ I. Na následujícím jednoduchém příkladu budu demonstrovat funkci jednotlivých příkazů:

```
\           ; Reset kontroleru, uvedení kontroleru do výchozího stavu
[           ; Odložení vykonání následujících příkazů
C7          ; Zapnutí koncového stupně
@1         ; Definice návěští číslo 1
B256       ; Pohyb v negativním směru o 256 mikrokroků
R          ; Vykonej pohyb
I10L2      ; Když bude mít uživatelská vstup 10 hodnotu logická nula, skoč na návěští 2
I11H3      ; Když bude mít uživatelská vstup 11 hodnotu logická jedna, skoč na návěští 2
J1         ; Jinak skoč na návěští 1
@2         ; Definice návěští číslo 2
B51200     ; Pohyb v negativním směru o 51200 mikrokroků
R          ; Vykonej pohyb
J4         ; Skoč na návěští číslo 4
@3         ; Definice návěští číslo 3
F51200     ; Pohyb v pozitivním směru o 51200 mikrokroků
R          ; Vykonej pohyb
J4         ; Skoč na návěští číslo 4
@4         ; Definice návěští číslo 4
U1         ; Vyšli hodnotu čítače absolutní polohy
]          ; Provedení předchozích povelů
```

Motor se bude opakovaně otáčet o 256 mikrokroků v negativním směru tak dlouho, dokud na vstupu B10 nebude hodnota logické nuly, nebo na vstupu B11 logické jedné. Podle příslušného nastavení vstupů dojde ke skoku na návěští číslo 2 (nebo 3) kde dojde k dodatečnému otočení o 51200 mikrokroků v negativním (pozitivním) směru a následného skoku na návěští 4. Návěští 4 ještě vyše hodnotu čítače absolutní polohy a program bude ukončen. Samotný program je uzavřen v hranatých závorkách a začne se vykonávat až v momentě, kdy je zcela nahrán do kontroleru.

Protože je ukládání povelů do kontroleru pomalé, je nutné mezi odesílanými příkazy mít prodlevu 1 s. Mnohem rychlejší způsob ovládání krokových motorů je prostřednictvím uživatelských vstupů. Při tomto ovládání nejsou do motoru odesílány stále nové příkazy přes sériové rozhraní, ale program je do kontroleru nahrán pouze jednou. Vykonávání je poté řízeno externím přerušením, tedy přívodem logických hodnot na uživatelské vstupy. V našem případě využíváme metody odesílání vždy nového povelového souboru. Přestože je toto ovládání pomalé, otáčení terčů kvůli nutnosti rozdílných korekcí při použití různých terčů nelze jinak realizovat. Vysoká reakční rychlost je ale nutná při otáčení clony substrátu. Do kontroleru clony substrátu je odesílán vždy povelový soubor stejné délky a doba otáčení je vždy stejná (zhruba 2 s). Uvážením této konstantní hodnoty lze čas pro uzavření clony substrátu dostatečně korigovat.

## A.6 Propojení s počítačem

Propojení ovládání jednotlivých přístrojů a jejich propojení s nadřazeným počítačem je využito třech AD/DA převodníků a sériových rozhraní.

Přístroje, které pro komunikaci s počítačem využívají sériového portu, byly podrobně popsány výše. Dále bude popsáno pouze propojení s AD/DA převodníky a jejich komunikace s počítačem.

Nastavování hodnot na stabilizovaných zdrojích Mesit je prostřednictvím převodníku Baspelin SVZ. Tento převodník se skládá ze dvou částí. První část je svorkovnice s analogovými vstupy a výstupy, která je oddělen od konvertoru dvěma optickými vlákny. Tím je dosaženo galvanického oddělení konvertoru od převodníku (respektive převodníku od počítače). Do konvertoru je tímto způsobem možné připojit až tři svorkovnice. V našem případě je využito pouze dvou, jedna pro kaskádu stabilizovaných zdrojů ovládající primární iontový zdroj a jedna pro kaskádu ovládající sekundární iontový zdroj.

Svorkovnice jsou tvořeny 24 analogovými vstupy a 24 analogovými výstupy, ke každému vstupu i výstupu připadá jedna zemnicí svorka. Na vstupech je možné měřit úroveň napětí 0 – 10 V a na výstupech je možné toto napětí nastavovat.

Konvertor je připojen k počítači pomocí sériového rozhraní RS-232. Komunikace je nastavena s následujícími parametry: přenosová rychlost  $9600 \text{ bit} \cdot \text{s}^{-1}$ , 8 datových bitů, žádný paritní bit a jeden stop bit.

Nastavení parametrů na jednotlivých výstupech se provádí odesláním série osmi ASCII znaků. První dva znaky odpovídají číslu svorky na svorkovnici analogových výstupů, další čtyři znaky odpovídají hodnotě nastavovaného napětí a poslední dva znaky jsou znaky řídicí. Řídicími znaky jsou myšleny příkazy `\r` a `\n`, tedy znaky ukončení řádku a jejich zalomení (pomocí klávesy Enter).

Převodník Baspelin SVZ je 12 bitový převodník, kdy jeden bit odpovídá hodnotě napětí 0,0025 V. Při nastavovaném rozsahu 0 – 10 V je hodnota 10 V reprezentována jako číslo 4000. Pokud bychom chtěli nastavit 1 V na výstupu číslo 3, museli bychom po sériové lince odeslat příkaz `020400\r\n`. Navíc pokud bychom chtěli nastavit hodnotu na druhé (respektive třetí) svorkovnici, čísla svorek se navyšují o předešlé svorkovnice. Nastavením stejné hodnoty napětí na výstupu 3 druhé svorkovnice je nutné odeslat příkaz `260400\r\n` a pro nastavení na třetí svorkovnici `500400\r\n`.

Hodnoty, které jsou měřeny na analogových vstupech, vysílá konvertor bez vyžádání trvale po sériovém portu. Způsob kódování jednotlivých vstupů je analogický s odesláním dat na výstupy. Obdržíme-li příkaz `581000\r\n` zjistíme, že na svorkovnici číslo 3 na svorce 11 je naměřeno napětí 2,5 V. Pro příjem dat je také nutné přepínat mezi úrovněmi RTS a DRT sériového rozhraní (při odesílání není nutné RTS a DRT nastavovat). Tyto hodnoty fungují jako přepínače mezi příjmem signálu ze svorkovnice 1,2, nebo 3. Nastavení RTS a DTR v závislosti na signálu přijímané svorkovnice je v Tabulka 0.6.

RTS	DTR	Svorkovnice	Vstupy
0	0	1	00-23
1	0	2	24-47
0	1	3	48-71

**Tabulka 0.6:** Nastavení signálu RTS a DTR převodníku Baspelin SVZ

Převodník firmy LabJack je použit pro nastavená hodnot na stabilizovaných zdrojích Glassman. Pro tento účel byl zvolen typ Laback U3-HV. Ten obsahuje 4 analogové vstupy rozsahu  $\pm 10$  V (nebo  $-10 - 20$  V), 12 volitelných portů (analogové výstupy rozsahu  $\pm 2,4$  V, digitálních vstupů či výstupů TTL signálu 0 a 3,3 V) a 4 analogové výstupy 0 – 5 V. Rozlišení analogových vstupů je 12 bitů a analogových výstupů 10 bitů.

Pro nastavování hodnot na stabilizovaném zdroji je nutné napětí na analogových výstupech v rozsahu 0 – 10 V. Z toho důvodu byly k tomuto převodníku dokoupeny dva moduly LJTick-DAC. Tyto moduly se připojují do svorkovnice digitálních výstupů (volitelných výstupů) na převodníku LabJack U3. Každým z těchto modulů je převodník rozšířen o sérii dvou analogových výstupů s rozsahem nastavovaných hodnot  $\pm 10$  V a rozlišením 14 bitů.

Připojení k počítači je umožněno pomocí sběrnice USB. Firma LabJack dodává ke svým zařízením ovládací software a také vzorové příklady pro ovládání pomocí různých programovacích jazyků. Knihovny funkcí a ovládání přes LabView bude popsáno níže.

Třetím převodníkem, který se stará o ovládání zbylých zařízení, je NI USB-6229. Jedná se o převodník firmy National Instruments. Tento převodník obsahuje 16 diferenciálních analogových vstupů rozsahu  $\pm 10$  V (32 jednoduchých), 4 analogové výstupy s rozsahem  $\pm 10$  V a 48 digitálních kanálů (vstupy i výstupy) TTL signálu 0 a 5 V. Analogové vstupy i výstupy mají rozlišení 16 bitů. Propojení s počítačem je prostřednictvím sběrnice USB. Firma National Instruments vyvinula i programovací prostředí LabView, ve kterém byl celý ovládací software naprogramován. Pro ovládání převodníku obsahuje LabView celou řadu komponent a není nutné se zabývat přesnou komunikací.

## **Dodatek B. Programy a podprogramy**

Dodatek je věnován základům programování v LabVIEW a také přesnému popisu jednotlivých podprogramů, které jsou znázorněné ve schématu na Obrázek 7.1. Tento dodatek tak přímo navazuje na kapitulu 7.

### **B.1 Základy programování v LabVIEW**

Základním principem programování v LabVIEW je umisťování grafických komponent do blokového schématu. Vykonávání programu se řídí několika pravidly. Kvůli přehlednosti jsou jednotlivé komponenty orientovány tak, aby jejich výstupy mířily zleva doprava a vstupy zprava doleva. Proto je vhodné komponenty, které generují signál umisťovat v blokovém schématu co nejvíce nalevo, komponenty které signál zpracovávají, na střed a vyčítací komponenty a indikátory napravo.

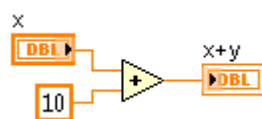


Jednotlivé komponenty, které se umisťují do blokového diagramu, se nacházejí v panelu Functions. Tento panel je možné vyvolat klikem pravého tlačítka na plochu blokového diagramu případně pomocí menu View→Function Palette. Jednotlivé komponenty se z panelu funkcí umisťují do blokového diagramu stylem Drag & Drop (táhni a pusť), tedy jednoduchým přetahováním.

Dalším důležitým nástrojem je tools palette. Tuto nabídku lze vyvolat buď z menu View→Tools Palette, nebo ji lze dočasně zobrazit stiskem tlačítka shift a kliknutím pravého tlačítka myši do blokového diagramu nebo předního panelu. V této nabídce nástrojů se nachází nástroje pro propojování jednotlivých komponent (wiring tool), vkládání komentářů a textu (labeling tool), nástroj pro přerušování programu v zadaném místě (breakpoint) a další.














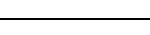

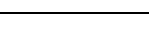



Propojování komponent se provádí pomocí wiring tool. Každá z komponent má konektor pro vstup případně výstup (Obrázek 0.3). Propojování jednotlivých komponent je značně variabilní. Některé komponenty umožňují automatické přetypování vstupních parametrů (například komponenta pro sčítání umožňuje sčítání reálného a celého čísla). Jiné komponenty vyžadují striktně požadovaný typ dat.

Prvek na předním panelu je v blokovém schématu nahrazen terminálem. Terminál je možné zobrazit jako ikonu (zmenšeninu reálného vzhledu prvku na předním panelu), případně pouze jako značku. Obdobně jako terminály se chovají konstanty. Konstanty jsou pevně nastavená čísla, která se zobrazují pouze v blokovém diagramu.



**Obrázek 0.3:** Příklad jednoduchého programu

Barva terminálů a vodičů mezi terminály a komponentami, které je zpracovávají, naznačují jejich datový typ. Ve stručnosti lze říci, že oranžově jsou vedena reálná čísla (i komplexní), modře čísla celá (záporná i kladná), zeleně logické hodnoty (pravda/nepravda) a růžově znakové řetězce. Dalšími typy jsou pole a vektory, což jsou vícerozměrné soubory definovaných dat. Datových typů obsahuje LabVIEW celou řadu a jejich přesný výčet a grafická reprezentace je v Tabulka 0.7.

	Reálná čísla		Celá čísla
	Rozšířená přesnost		64 bit znaménkové
	Dvojitá přesnost		32 bit znaménkové
	Jednoduchá přesnost		16 bit znaménkové
	Komplexní rozšířená přesnost		8 bit znaménkové
	Komplexní dvojitá přesnost		64 bit bezznaménkové
	Komplexní jednoduchá přesnost		32 bit bezznaménkové
	Pevná řádová čárka		16 bit bezznaménkové
			8 bit bezznaménkové
	Logické hodnoty pravda / nepravda		
	Cesta k souboru		Klastr
			Struktura číselných hodnot
			Struktura různých datových hodnot

**Tabulka 0.7:** Datové typy v prostředí LabVIEW

## B.2 Měrka tlaku Balzers TPG

Vstupní t.	Funkce	Výstupní t.	Funkce
PE300 function in	Zasílání textových příkazů pro měrku PE300C9	PE300 function out	Vyčítání prováděné funkce měrky PE300C9
PI300 function in	Zasílání textových příkazů pro měrku PI300D	PI300 function out	Vyčítání prováděné funkce měrky PI300D
Error in	Vstup kontroly chyby	Error out	Výstup kontroly chyby
Pressuremeter task	Nastavení výstupů na NI USB-6229 kterých jsou hodnoty vyčítány	PE300 (mbar)	Reálná měřená hodnota tlaku na měrce PE300C9 (indikátor vyveden na přední panel hlavního program)
		PI300 (mbar)	Reálná měřená hodnota tlaku na měrce PI300C9 (indikátor vyveden na přední panel hlavního program)

**Tabulka 0.8:** Vstupní a výstupní terminály programu BALZERS\_TPG300.vi

Měřením hodnot napětí, které jsou generovány na AD/DA převodníku NI USB-6229 a dále jeho převodem na hodnoty reálných měřených tlaků, se zabývá program BALZERS\_TPG300.vi. V Tabulka 0.8 jsou rozepsány všechny vstupní a výstupní terminály tohoto programu. Blokové schéma tohoto programu je znázorněno na Obrázek 0.4.

Vysláním příslušného příkazu do programu pomocí terminálu ❶ je vyhodnoceno, zda se bude dané zařízení používat. Pokud jde o příkaz měření, je zapnut vstup na analogovém převodníku ❷. Zároveň je vyhodnocena funkce first call a do vnitřní paměti počítače jsou načteny hodnoty kalibračních souborů (PE300.txt a PI300.txt) jednotlivých tlakových senzorů

③ ④. Kalibrační soubor má následující strukturu: V prvním sloupci jsou hodnoty napětí měřené na převodníku a v druhém příslušné hodnoty reálných tlaků, sloupce jsou od sebe odděleny tabelátorem. Příklad dat v kalibračním souboru tvoří pole, jak je zobrazeno níže.

```
1,20000E+01 6,00000E-03
9,70000E+00 2,30000E-03
9,15000E+00 5,50000E-04
8,65000E+00 2,80000E-04
7,87000E+00 1,20000E-04
```

Bloky ⑤ a ⑥ se dále zabývají paralelním zpracováním jednotlivých textových příkazů pro oba použité tlakové senzory.

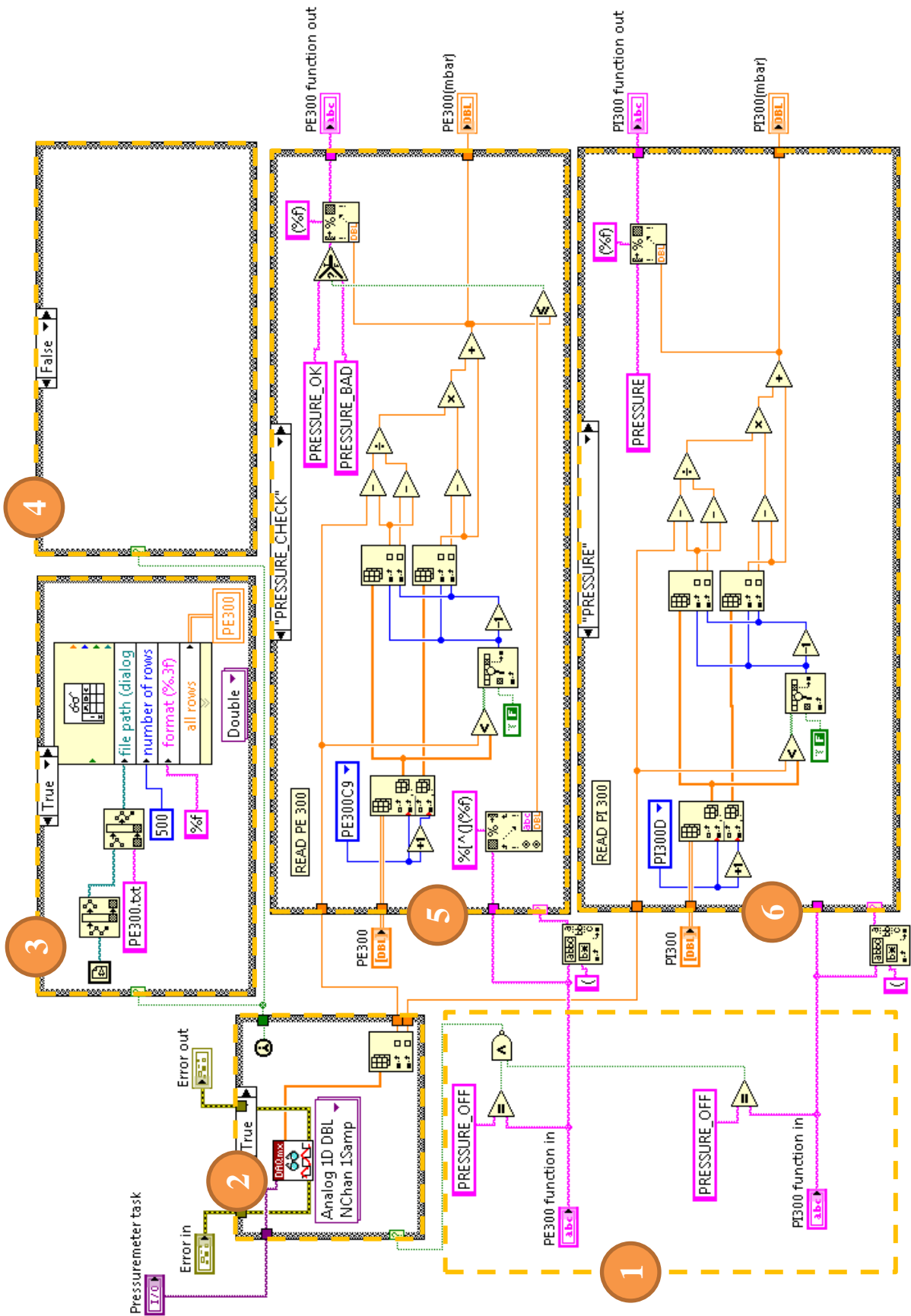
V programu jsou zatím k dispozici následující textové příkazy:

- PRESSURE\_OFF,
- PRESSURE,
- PRESSURE\_CHECK.

Příkaz PRESSURE\_OFF znamená, že je dané zařízení vypnuté. Pokud je ovšem alespoň do jednoho z terminálů odeslán příkaz pro měření, převodník se zapne a začne vyčítat hodnoty z obou analogových vstupů. Přístroj, na který je současně odesílán příkaz PRESSURE\_OFF, pouze odesílá do terminálu konstantní hodnotu nula, přestože jsou hodnoty převodníkem měřeny.

Příkaz PRESSURE ⑥ zapne příslušnou měрку a hodnoty vyčítané převodníkem jsou dále zpracovávány. V kalibračním souboru, načteném do paměti, je nalezena první vyšší hodnota napětí a první nižší hodnota. Pomocí trojčlenky je dopočítaná přesná pozice mezi úrovněmi a ze sloupce reálných hodnot je dopočítaná hodnota tlaku. Výstupem tohoto příkazu je řetězec PRESSURE(hodnota), kde hodnota je vypočítaný tlak.

Příkaz PRESSURE\_CHECK ⑤ se zabývá měřením požadované hodnoty tlaku. Přesněji řečeno nám tento příkaz řekne, zda hodnota tlaku v komoře je nižší než hodnota zadaná v parametru. Určení tlaku je stejné jako v případě příkazu PRESSURE. Parametr se zadává následovně PRESSURE\_CHECK(5E-7). V tomto případě, pokud bude v komoře tlak nižší nežli  $5 \cdot 10^{-7}$  mbar, obdržíme na výstupu řetězec PRESSURE\_OK, v opačném případě PRESSURE\_BAD.



Obrázek 0.4: Blokové schéma ovládní měry tlaku Balzers TPG

### B.3 Průtokoměr MKS 247

Blokové schéma měřky toku plynu MKS 247 je znázorněno na Obrázek 0.5 (MKS\_247.vi). Vstupní a výstupní terminály programu MKS\_247.vi jsou v Tabulka 0.9.

Vstupní t.	Funkce	Výstupní t.	Funkce
Ch. 1 function in	Zasílání textových příkazů pro snímač na kanálu 1	PE300 function out	Vyčítání prováděné funkce snímače na kanálu 1
Ch. 4 function in	Zasílání textových příkazů pro snímač na kanálu 4	PI300 function out	Vyčítání prováděné funkce snímače na kanálu 4
Error in	Vstup kontroly chyby	Error out	Výstup kontroly chyby
		Ch. 1 Flow	Reálná hodnota toku snímače na kanálu 1 (indikátor vyveden na přední panel hlavního program)
		Ch. 4 Flow	Reálná hodnota toku snímače na kanálu 4 (indikátor vyveden na přední panel hlavního program)

**Tabulka 0.9:** Vstupní a výstupní terminály programu MKS\_247.vi

Tento podprogram se zabývá nastavováním napětí na analogových výstupech převodníku USB NI-6229, kterými je nastavováno množství toku na snímačích. Dále jsou na převodníku nastavovány hodnoty na digitálních výstupech, kterými se jednotlivé snímače zapínají, a na dvou analogových vstupech jsou hodnoty měřené.

Do bloku ❶ přijde textový příkaz. Pokud jde o příkaz měření či nastavování hodnot alespoň jednoho ze snímačů, je centrální blok ❷ vyhodnocen jako pravdivý. V bloku ❷ se nachází komponenta, která čte hodnoty z analogových vstupů. V tomto momentě dojde také k zapnutí příslušného snímače ❸. Pokud je ovšem přijat příkaz pro vypnutí měřky, dojde k vyhodnocení bloku ❷ jako nepravdivého a snímače budou vypnuty ❸. Blok ❸, který se stará o zapínání a vypínání jednotlivých kanálů a o nastavování dat na měřce toku, je nastavován i při příkazu vypnutí. V tomto momentě je na digitální výstup odeslán povel pro vypnutí a hodnota toku nastavena na 0.

Bloky ❸ a ❹ se zabývají paralelním ovládáním jednotlivých kanálů. Použité textové příkazy jsou:

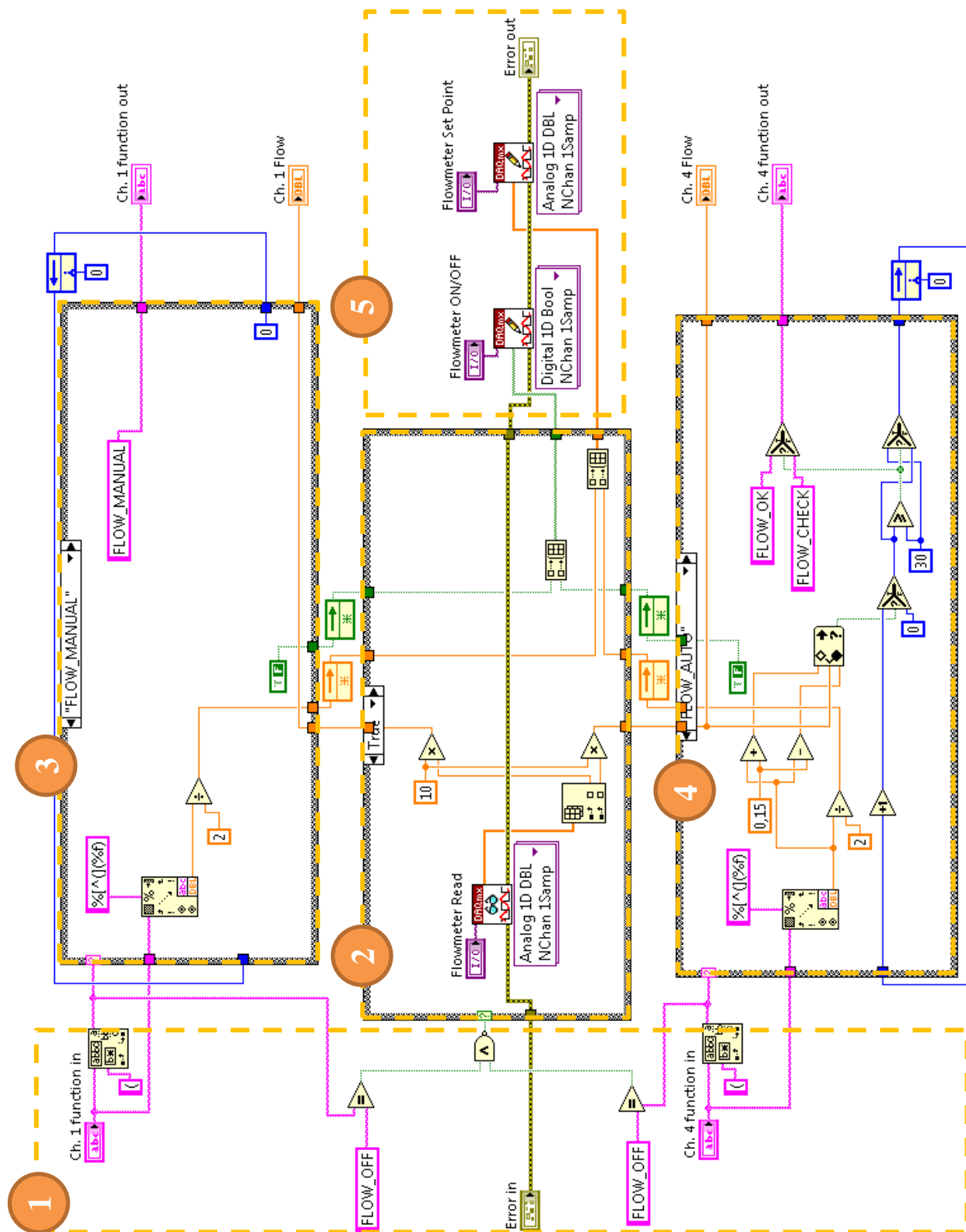
- FLOW\_OFF,
- FLOW\_MANUAL,
- FLOW\_AUTO.

Příkaz FLOW\_OFF vypíná příslušný kanál měřky toku. Digitální výstup na převodníku nastaví do hodnoty logická nula a na analogových výstupech je nastavena hodnota 0.

Příkaz FLOW\_MANUAL ❸ se stará o ovládání příslušného snímače. Parametrem tohoto příkazu je reálná hodnota, kterou chceme na měřce toku nastavit. Tato hodnota je přepočtena a ve formě napětí nastavena na analogovém výstupu převodníku. Zadávání tohoto příkazu je

například následující FLOW\_MANUAL(4,0) na textovém výstupním terminálu bude řetězec FLOW\_MANUAL.

Příkaz FLOW\_AUTO ④ nastavuje hodnoty na snímači stejným způsobem jako příkaz FLOW\_MANUAL. I tento příkaz má jeden parametr a zadává se analogicky. Oproti předchozímu příkazu je navíc testována nastavovaná hodnota. Pokud je měřená hodnota na snímačích v rozmezí  $\pm 0,15$  hodnoty nastavované, začne se vykonávat kontrolní smyčka. Pokud je tok po dobu třiceti cyklů v zadaném rozmezí, je na výstup poslán textový řetězec FLOW\_OK. V opačném případě řetězec FLOW\_CHECK.



Obrázek 0.5: Blokové schéma ovládání měřky toku plynu MKS 247

## B.4 Tloušťkoměr STM 100/MF

Na Obrázek 0.6 je znázorněno blokové schéma programu pro ovládání tloušťkoměru (STM\_100.vi) STM 100/MF. Vstupní a výstupní terminály tohoto programu jsou v Tabulka 0.10.

Vstupní t.	Funkce	Výstupní t.	Funkce
Thick function in	Zasílání textových příkazů pro snímač do tloušťkoměru	Thick function out	Vyčítání prováděné funkce tloušťkoměru
COM Port	Nastavení sériového portu tloušťkoměru	Thickness kA	Hodnota měřené tloušťky deponovaného materiálu v kÅ
		Rate A/s	Rychlost depozice v Ås <sup>-1</sup>
		Frequency Hz	Frekvence kmitání krystalu v Hz
		Time	Čas depozice
		Density Gm/cm <sup>3</sup>	Nastavená hustota materiálu
		Z-factor	Nastavený Z-faktor
		Tooling %	Nastavená tooling

**Tabulka 0.10:** Vstupní a výstupní terminály programu STM\_100.vi

Firma Sycon instruments, která je výrobcem tloušťkoměru STM 100/MF, zveřejnila knihovny, pomocí kterých je možné tloušťkoměr ovládat prostřednictvím LabVIEW. Jedna z komponent je určena primárně ke komunikaci s tloušťkoměrem. Tato komponenta se nachází v blokovém schématu v oblasti ③. Přesnějším popisem této komponenty se nebudu zabývat bez ztráty na obecnosti lze říci, že pomocí této komponenty dochází k přeložení příkazů do správného tvaru a jejich odeslání do zařízení.

Ovládání přístroje pomocí tohoto podprogramu je následující: Pokud je na textový terminál ① přiveden příkaz pro měření, je spuštěn blok ②, tím se uvede do chodu komponenta, která se zařízením přímo komunikuje. V tomto bloku jsou také v každém cyklu podprogramu stále vyčítány hodnoty tloušťky deponovaného materiálu, rychlosti depozice, času, frekvence krystalu, hustoty, z-faktoru a toolingu. Příkazy jsou do zařízení posílány za sebou a prodleva mezi nimi je nastavena na pevnou hodnotu 100 ms. V bloku ④ jsou zpracovávány uživatelem zadané příkazy a v bloku ⑤ jsou výstupní terminály, které jsou z tohoto podprogramu vyvedeny do hlavního programu.

Příkazy, které je možné na toto zařízení posílat, jsou:

- THICK\_OFF,
- THICK,
- THICK\_RESET,
- THICK\_SET,
- THICK\_MEASURE,
- THICK\_STABLE.



Příkaz THICK\_OFF vypne celý blok ② a komunikace se zařízením není navázaná. Na výstupních terminálech je nastavena hodnota 0. Na textovém výstupním terminálu je hodnota THICK\_OFF.

Všechny ostatní příkazy zapříčiní spuštění bloku ② a tím jsou v každém cyklu vyčítány všechny výše uvedené hodnoty, které jsou zobrazeny na výstupních terminálech.

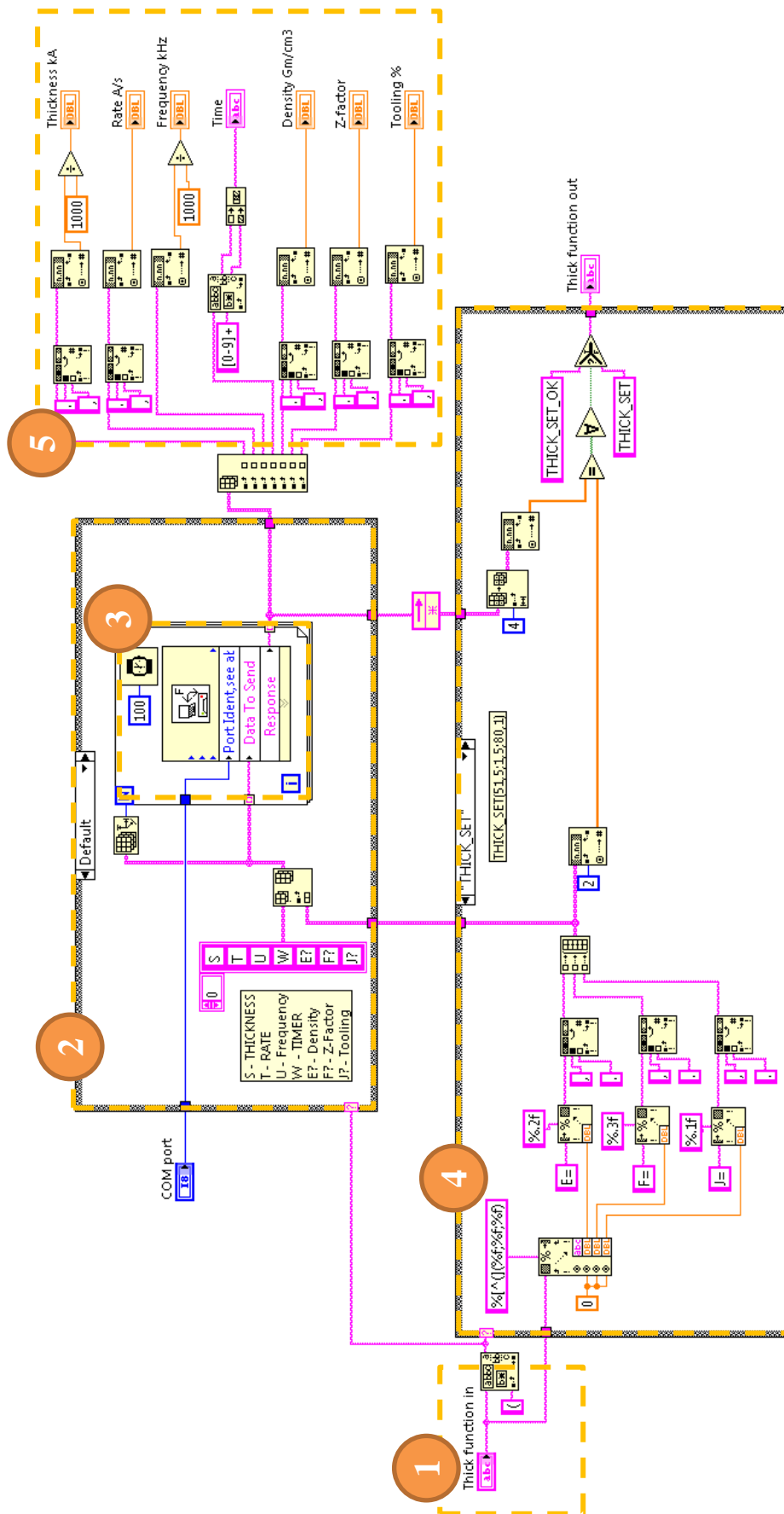
Příkaz THICK je univerzální příkaz, který pouze spouští měření na tloušťkoměru.

Příkaz THICK\_RESET odesílá do tloušťkoměru (kromě stálých příkazů) jako poslední příkaz znak B. Tento znak provede vyresetování hodnot naměřené tloušťky a času. Hodnoty na výstupních terminálech se nastaví na nulu. Na textovém terminálu se při vyresetování objeví řetězec THICK\_RESET\_OK, v opačném případě THICK\_RESET.

TICK\_SET ④. Pomocí tohoto příkazu lze nastavovat hodnoty hustoty materiálu z-faktoru a toolingu na tloušťkoměru. Tento příkaz má tři parametry, jedná se postupně o parametr hustoty, z-faktoru a tooligu. Příklad zadávání je následující THICK\_SET(51,5;1,5;80,1), nastav hustotu na  $51,5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , z-faktor na 1,5 a tooling na 80,1 %. Při nastavení hodnot bude na textovém terminálu THICK\_SET\_OK, v opačném případě THICK\_SET.

Příkazem THICK\_MEASURE dochází k měření uživatelem zadané hodnoty tloušťky materiálu. Tento příkaz má tedy jeden parametr odpovídající požadované tloušťce v jednotkách Å (THICK\_MEASURE(1000)). Při dosažení této hodnoty je na výstupu textový řetězec THICK\_MEASURE\_OK, v opačném případě je odeslána dosažná tloušťka materiálu THICK\_SET(hodnota).

Příkaz THICK\_STABLE měří stabilitu rychlosti naprašování. Je zaznamenávána časová změna frekvence krystalu a pokud je směrnice vynášené křivky po dostatečně dlouhou dobu stabilní, je vrácená hodnota THICK\_STABLE\_OK. V opačném případě je na textovém terminálu hodnota THICK\_STABLE.



Obrázek 0.6: Blokové schéma ovládání tloušťkoměru STM 100/MF

## B.5 Krokové motory Microcon SX23-2727

Pro ovládání krokových motorů SX23-2727 je využito stejných kontrolerů a jednotlivá bloková schémata (MICROCON\_SHUTTER.vi, MICROCON\_TARGET.vi) jsou do značné míry podobná (Obrázek 0.7 a Obrázek 0.8). Z praktického hlediska se liší hlavně odesílaný povelový soubor.

Bloková schémata jsou rozdělena na pět bloků. Ty si rozdělme následovně. Blok ① je zadávací a kontrolovací, ② realizuje odesílání povelů prostřednictvím sériového portu, ③ obsahuje odesílané povelové soubory, ④ vyčítá data, které jsou kontrolerem motoru odeslány zpět do počítače a blok ⑤ je notifikační, který upozorňuje na změnu polohy motoru.

Terminály programu MICROCON\_TARGET.vi jsou v Tabulka 0.11.

Vstupní t.	Funkce	Výstupní t.	Funkce
Reference in	Nastavované parametry sériového rozraní	Reference out	Předávané parametry sériového rozraní
Error in	Vstup kontroly chyby	Error out	Výstup kontroly chyby
Target function in	Zasílání textových příkazů programu ovládání pohybu terče	Target function out	Notifikační textový řetězec informující o vykonaném pohybu
Target correction 1	Korekce polohy prvního terče na poloze substrátu		
Target correction 2	Korekce polohy druhého terče na poloze substrátu		
Target correction 3	Korekce polohy třetího terče na poloze substrátu		

**Tabulka 0.11:** Terminály programu MICROCON\_TARGET.vi

Na terminál target function in je přiveden povelový příkaz. V bloku ① programu nejdříve dojde ke kontrole, zda zadaný povel již nebyl dříve vykonáván. Dojde k porovnání s příkazem, který byl vykonán v předešlém cyklu. Pokud je zjištěno, že byl příkaz už jednou vykonán, program neprovede žádnou změnu a na výstup je nastavena hodnota dříve vykonaného příkazu.

Pokud je na povelový terminál přiveden nový příkaz, vyhodnotí se dle bloku ③ a do bloku ② je odeslán povelový soubor. Pokud je ovládání vypnuto, je velikost povelového souboru nulová. V případě vykonávání pohybu je odesílán soubor jisté délky větší než jedna. Tím je povolen blok ② a na sériový port jsou odesílány ASCII znaky, kterými je prostřednictvím kontrolerů možné ovládat krokové motory. Posledním znakem každého povelového souboru je příkaz pro upload (U20). Při vykonávání pohybu motoru je při dosažené pozici tento příkaz zpracován až jako poslední. Tímto příkazem je na sériový post odeslán jistý počet bajtů. Tyto bajty jsou počítačem vyčítány a pokud mají požadovanou hodnotu, je možné říct, že došlo k ukončení pohybu a k nastavení požadované polohy. V našem případě je odesílán příkaz U20, který by měl vrátit ASCII kód typu kontrolerů. Pro kontrolér CD30x jde o hodnotu 45. Pokud je tato hodnota počítačem obdržena, byl pohyb motoru ukončen. V bloku ⑤ se

nastaví hodnota odpovídající správnému dokončení pohybu, která je odeslána na výstupní terminál a buffer sériového portu je vynulován. Ovládání terčů i ovládání clony substrátu je řešeno odesláním vždy nového povelového souboru do kontroleru. Povelové soubory se tedy na řídicí desku neukládají.

Povelové soubory, které je možné do programu pro ovládání terčů poslat, jsou:

- TARGET\_OFF,
- TARGET\_KILL,
- TARGET\_RESET,
- TARGET\_1\_SET, TARGET\_2\_SET a TARGET\_3\_SET,
- TARGET\_MANUAL.

Příkazy TARGET\_OFF a TARGET\_RESET jsou totožné. Oba vyšlou do kontroleru resetovací znak. Jsou zavedeny zvlášť pro odlišení důvodu jejich použití.

Příkaz TARGET\_KILL vyšle do kontroleru znak K, což znamená uvedení motoru do brzděného režimu.

TARGET\_MANUAL je příkaz pro manuální ovládání terčů. Tím je myšleno rotace terče o uživatelem zadaný počet mikrokroků v negativním směru. Tento příkaz má jeden celočíselný parametr. TARGET\_MANUAL(3600) znamená otočení krokového motoru o hodnotu 3600 mikrokroků v negativním směru.

Příkazy TARGET\_1\_SET **3**, TARGET\_2\_SET a TARGET\_3\_SET nastavují polohu terče do požadované hodnoty. Povelové soubory jednotlivých příkazů se neliší. Povelové soubory jsou v Tabulce 0.12.

TARGET_1_SET:	TARGET_2_SET:	TARGET_3_SET:
\	\	\
[	[	[
C7	C7	C7
@1	@1	@1
B2048	B2048	B2048
R	R	R
I10L2	I10L2	I11L2
J1	J1	J1
@2	@2	@2
I11L3	I11H3	I10L3
J4	J4	J4
@3	@3	@3
B10240	B10240	B10240
R	R	R
J1	J1	J1
@4	@4	@4
R	R	R
U20	U20	U20
]	]	]

**Tabulka 0.12:** Povelové soubory ovládání terčů

Ve stručnosti lze říci, že první příkaz pohybuje terčem tak dlouho, dokud na portu číslo 10 nezaznamená hodnotu log 0. Pokud bude současně na portu 11 hodnota log 0, motor se pootočí a bude hledat dál. Při nalezení pozice z cyklu vyskočí na návěští číslo 4, kde vykoná dotočení o zadaný počet mikrokrků (tento příkaz se v povelovém souboru uvedeném výše nevyskytuje, je do tohoto souboru vkládán dodatečně kvůli rozdílným hodnotám při různých terčích, vkládá se mezi znak návěští @4 a R), které je zadané na terminálu pro korekci prvního terče a nakonec vykoná příkaz U20 (popsaný výše). Příkaz TARGET\_3\_SET je analogický, pouze hledá polohu, kdy bude log 0 pouze na vstupu číslo 11. TARGET\_2\_SET hledá polohu, kdy bude log 0 na obou vstupech zároveň. Při dotočení na požadovanou hodnotu je na terminálový výstup odeslán řetězec TARGET\_1\_SET\_OK, respektive TARGET\_2\_SET\_OK, nebo TARGET\_3\_SET\_OK.

Způsob ovládání clony substrátu je naprosto analogický. Pouze kvůli zapojení obvodu s optickými závory se místo úrovní log 0 hledají úrovně log 1 na uživatelských vstupech 12 a 13.

Terminály programu MICROCON\_SHUTTER.vi jsou v Tabulka 0.13.

Vstupní t.	Funkce	Výstupní t.	Funkce
Reference in	Nastavované parametry sériového rozraní	Reference out	Předávané parametry sériového rozraní
Error in	Vstup kontroly chyby	Error out	Výstup kontroly chyby
Shutter function in	Zasílání textových příkazů programu ovládání pohybu clony substrátu	Shutter function out	Notifikační textový řetězec informující o vykonaném pohybu

**Tabulka 0.13:** Terminály programu MICROCON\_SHUTTER.vi

Povely, které je možné do programu poslat, jsou:

- SHUTTER\_OFF,
- SHUTTER\_KILL,
- SHUTTER\_RESET,
- SHUTTER\_OPEN,
- SHUTTER\_CLOSE,
- SHUTTER\_MANUAL.

První tři povely jsou zcela analogické s povely pro ovládání terčů.

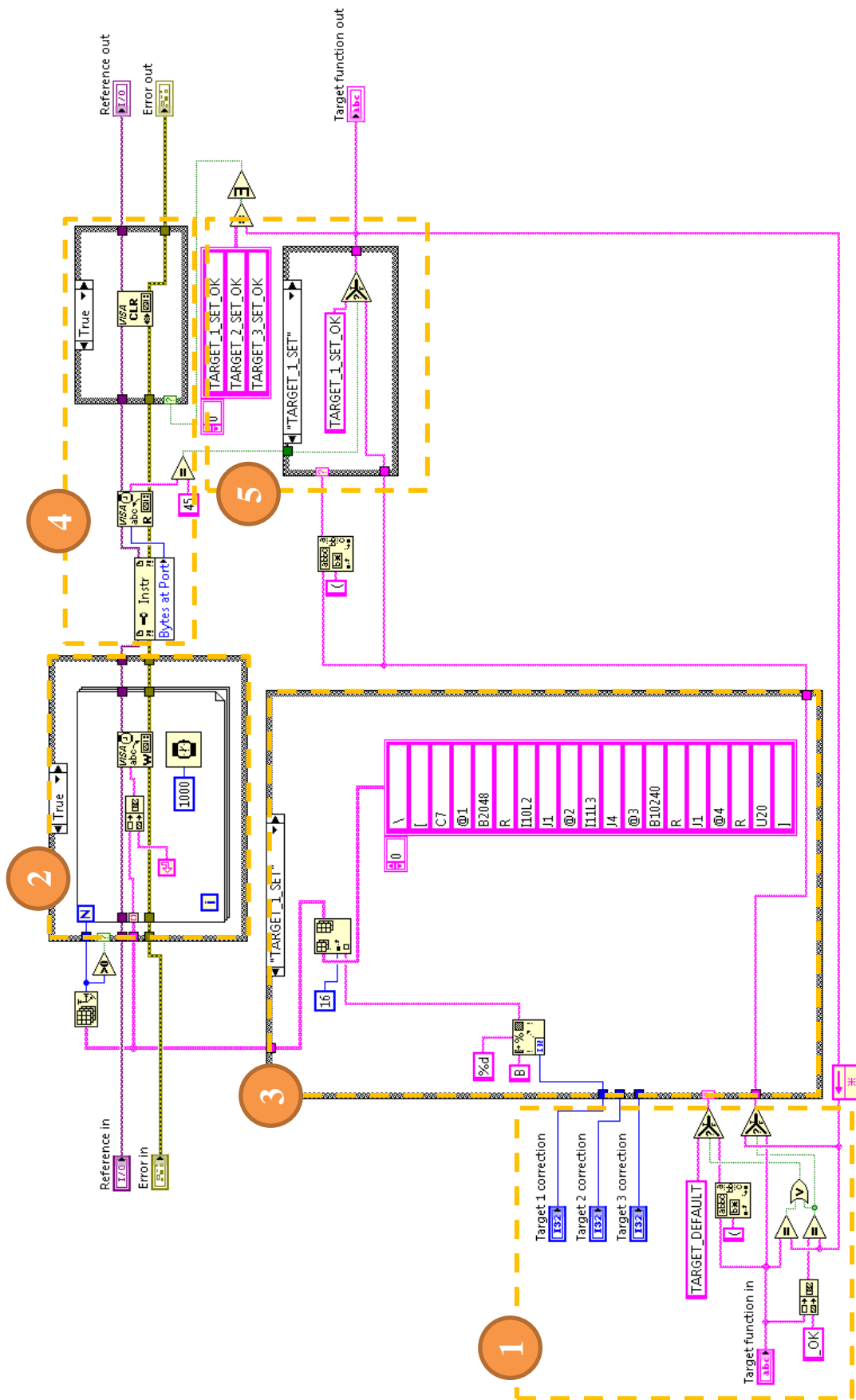
Povelem SHUTTER\_MANUAL je možné motorem otáčet o předem zadaný počet kroků. Tento povel má jeden parametr, který je navíc znaménkový. Při zadání povelu SHUTTER\_MANUAL(1000) bude proveden pohyb motoru v pozitivním směru o 1000 mikrokroků. Při zadání SHUTTER\_MANUAL(-1000) bude pohyb o stejné délce ve směru negativním.

Povely SHUTTER\_CLOSE a SHUTTER\_OPEN **3** jsou zcela totožné, liší se pouze jedním povel. Povelové soubory jsou v Tabulka 0.14.

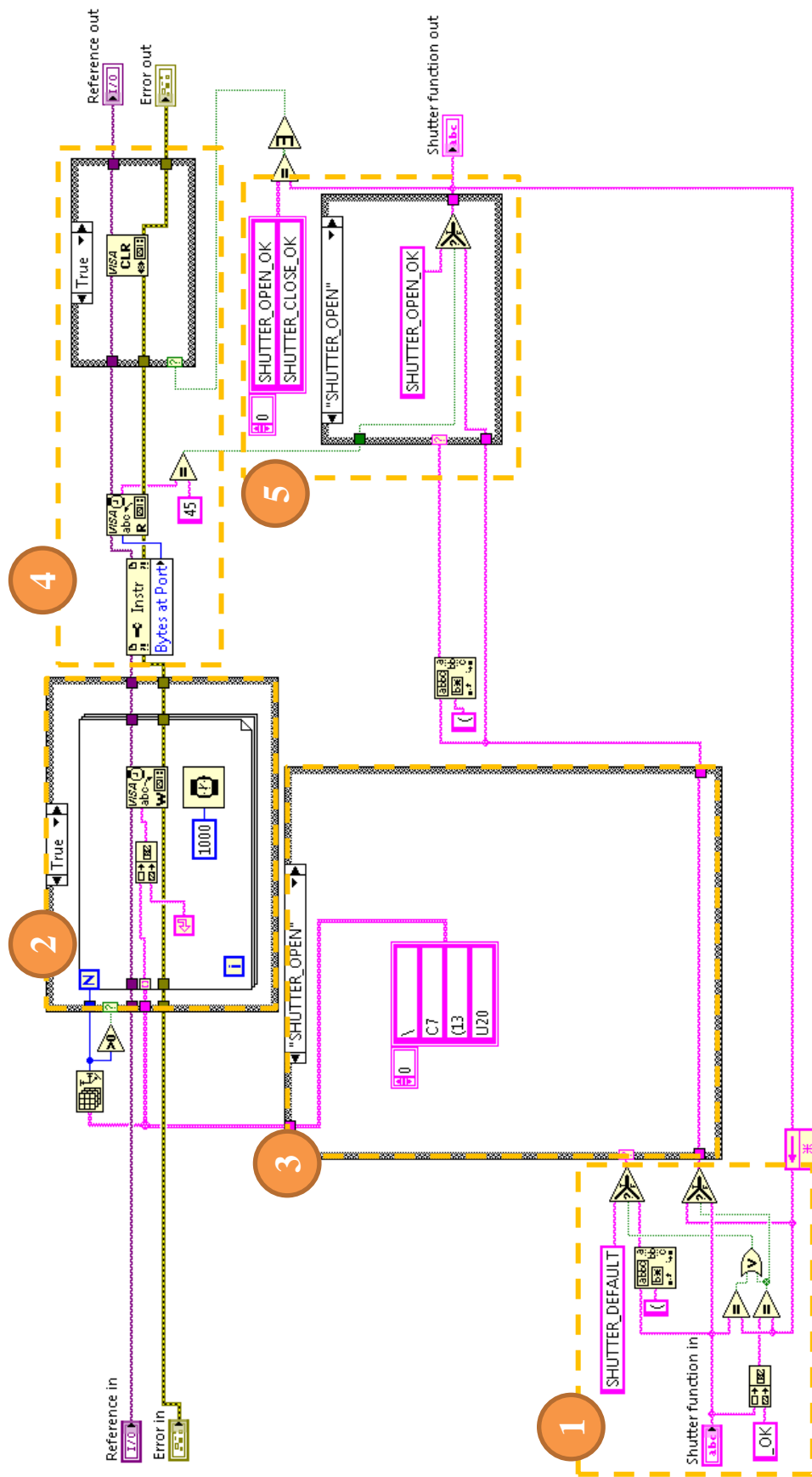
SHUTTER_OPEN	SHUTTER_CLOSE
\	\
C7	C7
(13	)12
U20	U20

**Tabulka 0.14:** Povelové soubory ovládání clony substrátu.

Pro příkaz Open se bude rotor otáčet tak dlouho v negativním směru, dokud na vstupu 13 nebude hodnota log 1. Close bude při ohybu v pozitivním směru hledat log 0 na vstupu číslo 12. Při nalezení takové polohy bude na terminálový výstup odeslán příkaz SHUTTER\_OPEN\_OK, respektive SHUTER\_CLOSE\_OK.



Obrázek 0.7: Blokové schéma ovládání terčů



Obrázek 0.8: Blokové schéma ovládání clony substrátu



## B.6 Iontové zdroje

Ovládání iontových zdrojů je realizováno pomocí kaskády stabilizovaných zdrojů, které jsou počítačem ovládány prostřednictvím dvou AD/DA převodníků. Před popisem samotného programu, který se stará o spuštění výboje a následné extrakce, budou popsány podprogramy, které se starají o komunikaci s jednotlivými převodníky.

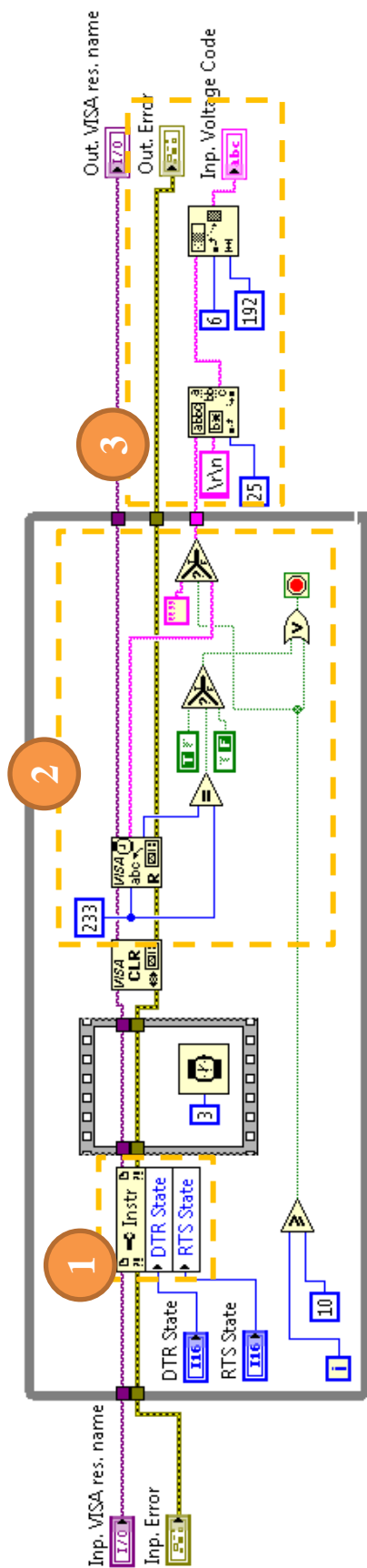
Způsob komunikace s daným převodníkem byl popsán výše a není tedy nutné zde zacházet do detailů.

Vyčítáním hodnot z AD/DA převodníku se zabývá podprogram BA\_READ\_PORT.vi (Obrázek 0.9). Vstupními terminály jsou parametry sériového portu a funkce error in. Výstupními předávané hodnoty nastavení sériového rozhraní, error out a terminál s textovým řetězcem Inp. Voltage Code.

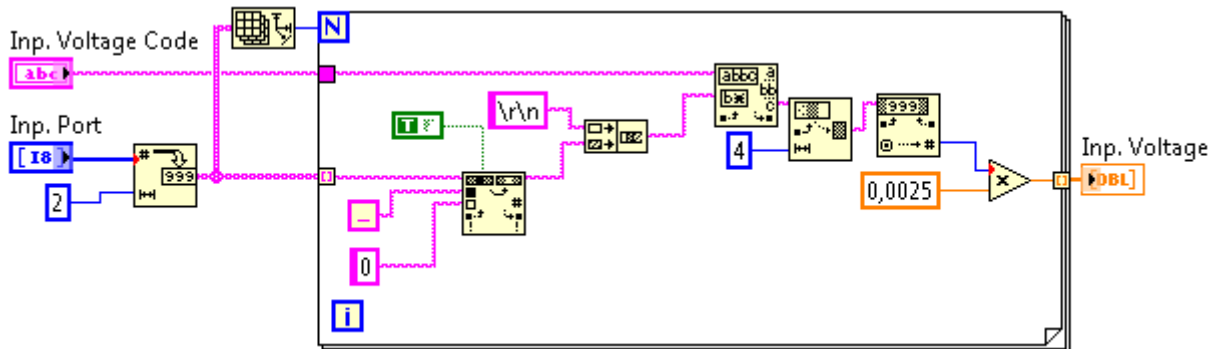
Před samotným vyčítáním hodnot se nastavuje úroveň DTR a RTS ❶. Tím dochází k výběru svorkovnice, ze které budeme hodnoty vyčítat. Následně dochází k vykonání příkazů pro vyčištění bufferu a pro příjem 233 bajtů ze sériového portu ❷. Pokud není požadovaný počet bajtů obdrženo, celý cyklus se od nastavování úrovní DTR a RTS opakuje. Po obdržení balíku hodnot jsou první byty s offsetem 25 do nalezení příkazu \r\n zahozeny. Tím jsou zahozeny všechny špatně interpretované znaky. Následně je zahozena ještě celá první sekvence šesti ASCII znaků (tak aby prvními znaky v sérii byly právě znaky \r\n) a zbylých 192 je vysláno na terminálový výstup ❸.

Tento terminálový výstup je přiveden do podprogramu BA\_CODE\_TO\_VOLT.vi (Obrázek 0.10). V tomto podprogramu jsou v sérii znaků nalezeny pouze ty porty, které chceme číst (jsou vyhledány první dva znaky v každé sérii, odpovídající hledaným portům zadaným na terminálovém vstupu Inp. Port) a zbylé čtyři znaky jsou převedeny na reálnou hodnotu napětí čtených na analogových vstupech, tedy hodnoty v rozsahu 0 – 10 V. Výstupem je pole čtených hodnot napěťových úrovní, kde pozice v poli měřených hodnot odpovídá pozici v poli na terminálovém vstupu čtených portů. To znamená, že pokud bude na druhé pozici terminálového vstupu Inp. Port nastaven port 10, bude na 2. pozici pole čtených hodnot uložena měřená hodnota portu číslo 10.

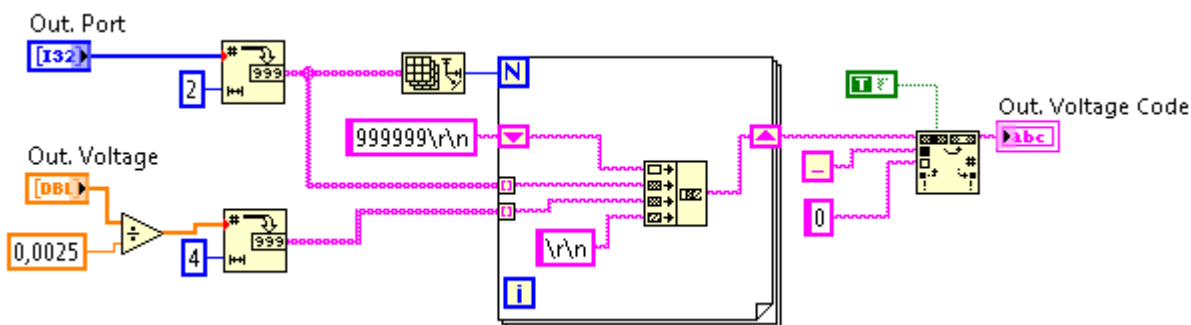
Obdobně je řešeno kódování hodnot, které chceme na zařízení nastavovat. Tímto úkolem se zabývá podprogram BA\_VOLT\_TO\_CODE.vi (Obrázek 0.11). Vstupem jsou dva terminály 1D pole. Na jednom terminálu jsou nastaveny porty, na kterých chceme hodnoty nastavovat. Na druhém terminálu jsou potom samotné hodnoty. Pozice v obou polích si navzájem odpovídají. Prostřednictvím for cyklu je cyklicky tvořen řetězec šesti ASCII znaků a nakonec vždy připojeny znaky \r\n. Postupně je tak vygenerován řetězec, který se vcelku odešle do AD/DA převodníku. Před samotný řetězec ještě přidávám kód 999999\r\n. Tento povel není převodníkem zpracován, je nutné jej však odesílat společně se zbytkem řetězce, z toho důvodu, že převodník při obdržení povelového řetězce první bajty zahazuje.



Obrázek 0.9: Podprogram BA\_READ\_PORT.vi

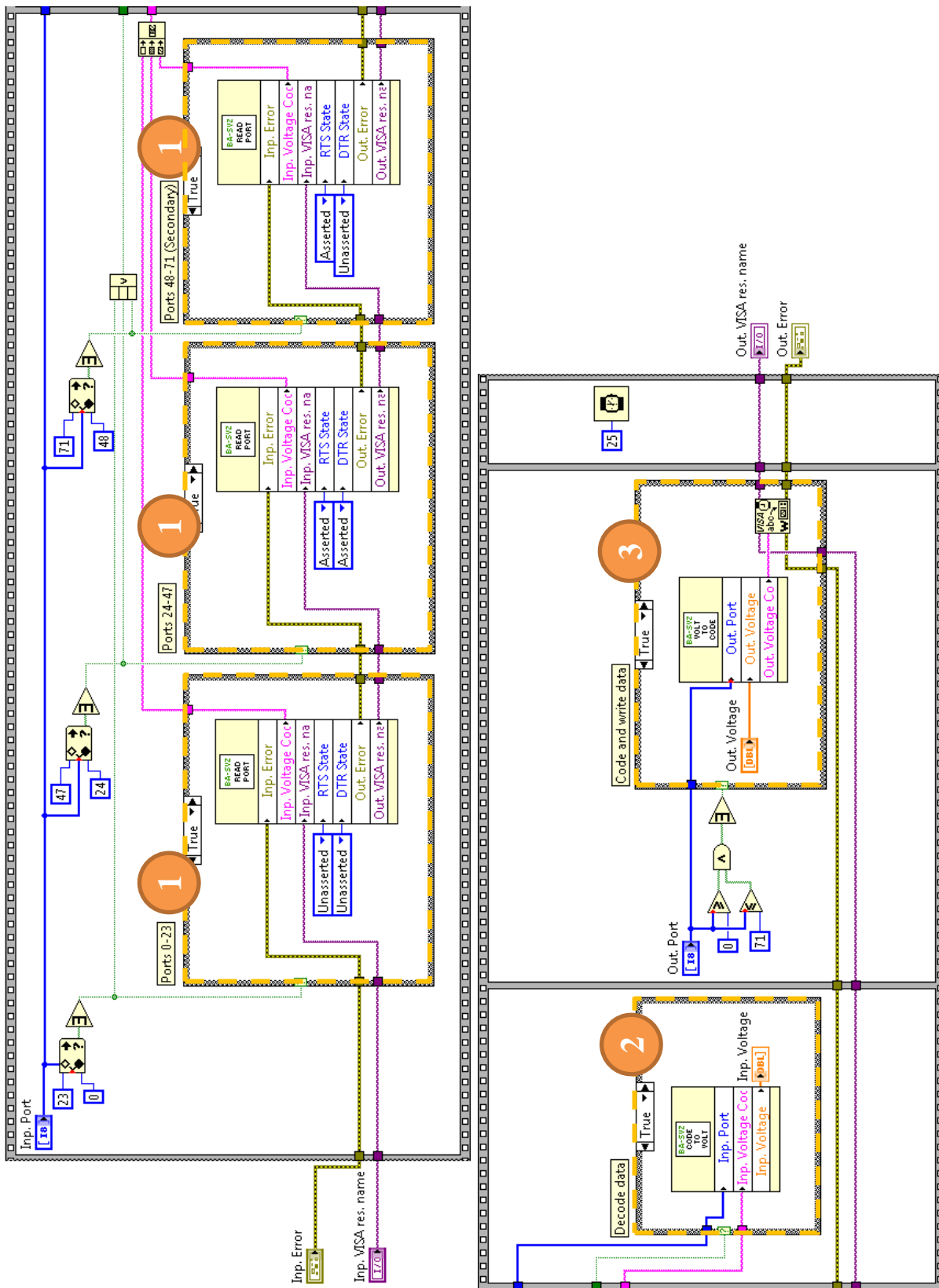


Obrázek 0.10: Podprogram BA\_CODE\_TO\_VOLT.vi



Obrázek 0.11: Podprogram BA\_VOLT\_TO\_CODE.vi

Všechny tři předešlé podprogramy jsou navzájem propojeny v programu BA\_CONTROL.vi (Obrázek 0.12). V tomto programu je třikrát obsažen podprogram BA\_READ\_PORT.vi ①. Je to z důvodu rozdílného nastavení signálů RTS a DTR pro jednotlivé svorkovnice. BA\_CONTROL.vi kontroluje porty uživatelem vyčítané a podle něj spouští podprogramy pro čtení ze svorkovnic. Přepínání úrovní RTS a DTR je velice pomalé a často vyvolává chybu. Kontrolou čtených portů je zaručeno, že k přepínání bude docházet pouze v případě, kdy si uživatel vyžádá čtení z příslušné svorkovnice. Jak bylo naznačeno výše, signály z těchto podprogramů jsou spojeny a poslány k přeložení ② do podprogramu BA\_CODE\_TO\_VOLT.vi. Nakonec jsou odeslány data z BA\_VOLT\_TO\_CODE.vi do sériového rozhraní příslušnou komponentou pro zápis na sériové rozhraní ③. Terminálové vstupy na tomto programu jsou Inp. Error, Inp. VISA res. Name (nastavení sériové komunikace), Inp. Port (porty na kterých je vyžadováno čtení dat), Out. Port (porty na kterých je vyžadován zápis dat) a Out. Voltage (hodnoty napětí nastavované na portech). Terminálové výstupy jsou tři, prvním je Inp. Voltage (na kterém jsou čteny hodnoty z požadovaných portů), Out VISA res. Name a Out. Error



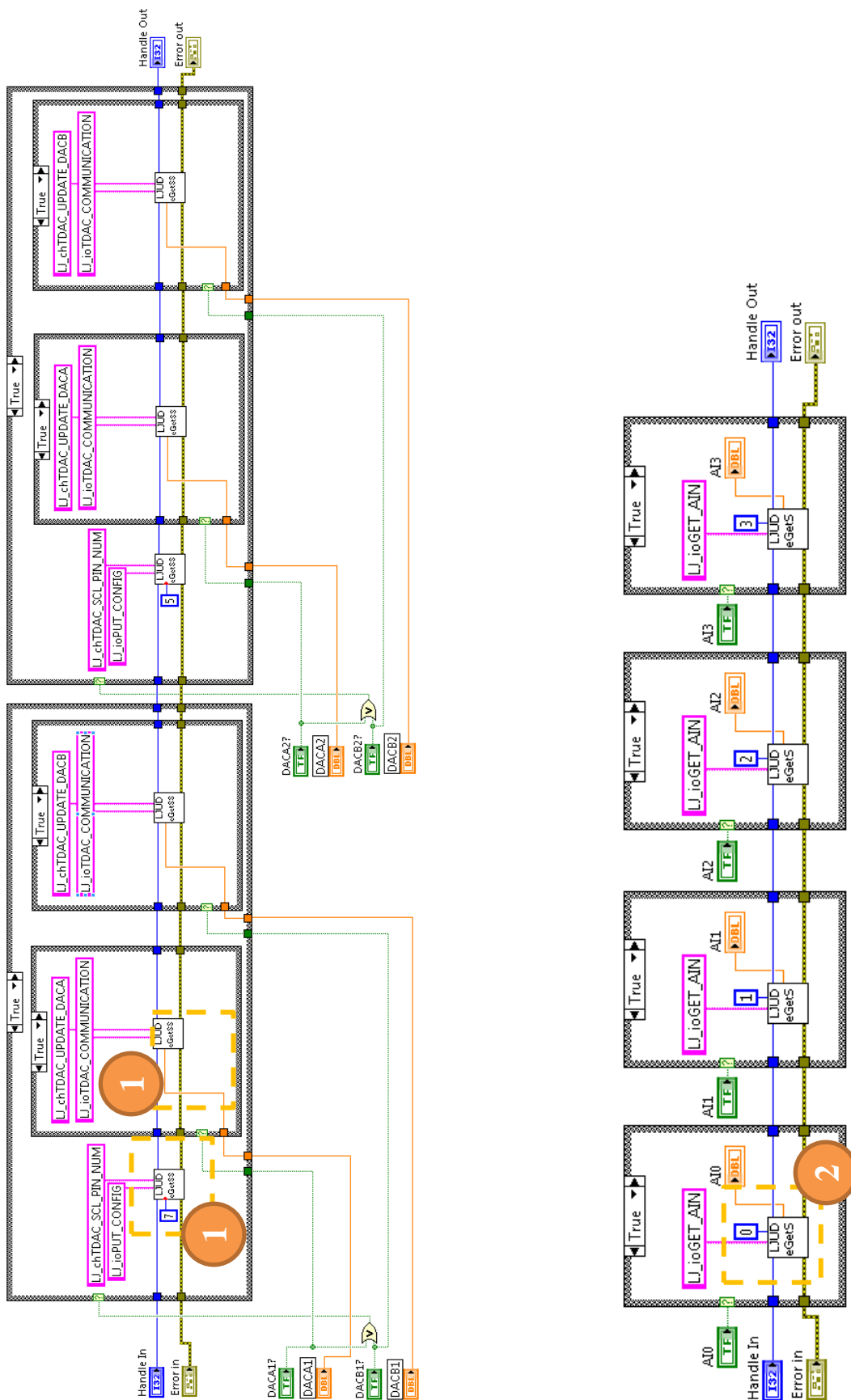
Obrázek 0.12: Podprogram BA\_CONTROL.vi

Nastavování a čtení hodnot na převodníku LabJack U3 není nutné příliš dopodrobna popisovat. Vnoření podprogramů je hlavně kvůli celkové přehlednosti. Převodním LabJack disponuje ovládacími programy dodávanými výrobcem, kterými lze tyto převodníky

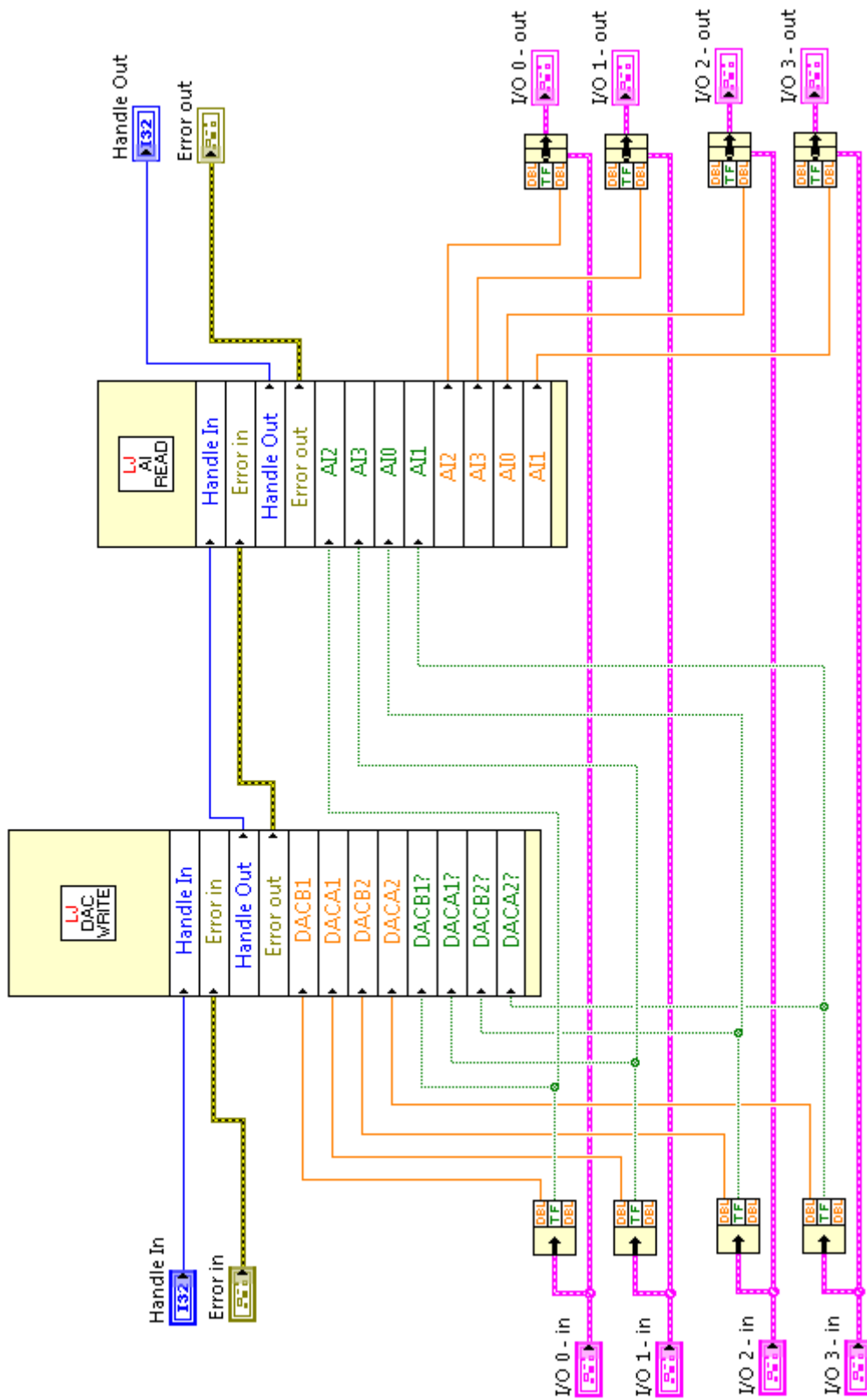
v prostředí LabVIEW nastavovat. Jde o programy LJUD\_eGetSS.vi ①, na které se pošlou funkční příkazy pro komunikaci s moduly LJTick-DAC a na vstup se přivedou hodnoty, které chceme na těchto modulech nastavovat. O zápis hodnot na převodník se stará podprogram LJ\_WRITE\_DAC.vi (Obrázek 0.13), který je kromě terminálu určených k nastavování vlastních hodnot vybaven ještě sérií logických přepínačů, které zapínají jednotlivé výstupy. Tím je zajištěno, že se vypnou výstupy, které nebude nutné ovládat.

O čtení hodnot z převodníku LabJack se stará program LJ\_READ\_AI.vi (Obrázek 0.13). Pro vyčítání hodnot je využita výrobcem dodávaná komponenta LJUD\_eGetSS.vi ②. Ta se nastaví příslušným textovým parametrem a přiřadí se jí číslo snímaného portu. Poté je na výstupu těchto portů již měřená hodnota z analogových vstupů.

Propojení těchto dvou podprogramů je v programu LJ\_CONTROL.vi (Obrázek 0.14), kde jsou všechny nastavované a vyčítané hodnoty kvůli přehlednosti provázány do clusterů.



Obrazek 0.13: Podprogram LJ\_WRITE\_DAC.vi (vlevo) a LJ\_READ\_AI.vi (vpravo)



Obrázek 0.14: Podprogram LJ\_CONTROL.vi

Podprogramy ION\_EXTR\_CONTROL.vi, ION\_HEAT\_CONTROL.vi a ION\_BA\_DECODE\_PORT.vi se nebudu příliš podrobně zabývat. Rovněž jejich schémata nebudou prezentována. V případě programů ION\_EXTR\_CONTROL.vi a

ION\_HEAT\_CONTROL.vi se jedná o programy podobné prezentovanému LJ\_CONTROL.vi. V těchto programech se nevyskytuje žádný funkční blok, jen jsou propojeny vstupy a výstupy vnořených podprogramů. Tyto programy jsou zavedeny pro zpřehlednění celkového kódu. Program ION\_BA\_DECODE\_PORT.vi sice funkční bloky obsahuje, ale nemá na celkovou funkčnost vliv. Pomocí tohoto programu jsou pouze dekódována pole hodnot přicházející z programů ovládající převodníky. Dekódováním je myšleno jejich rozřídění na hodnoty a porty, které ovládají primární iontový zdroj, a na ty, které ovládají sekundární iontový zdroj.

Dále budou popsány dva kořenové programy, které mají za úkol žhavení vlákna v iontovém zdroji a extrakci iontů na mřížce.

První program (ION\_HEAT\_FUNCTION.vi) (viz Obrázek 0.15) se stará o řízení kaskády stabilizovaných zdrojů Mesit. Do tohoto programu vedou všechny terminály, kterými lze Mesity prostřednictvím převodníku nastavovat a na kterých lze vyčítat požadované hodnoty.

Terminály programu ION\_HEAT\_FUNCTION.vi jsou v Tabulka 0.15.

Vstupní t.	Funkce	Výstupní t.	Funkce
Function in	Textový terminál nastavující jednotlivé funkce	Function Out	Notifikátor prováděných funkcí
Read port (U)	Port na kterém je čteno napětí zdroje M1 (M4)	Read ports	Porty, jejichž hodnoty chci číst (1D pole)
Read value (U)	Číselná hodnota napětí čtená na příslušném portu	Write Ports	Porty, které chci nastavovat (1D pole)
Read port (I)	Port na kterém je čten proud zdroje M3 (M6)	Write value	Hodnoty napětí, které chci na portech nastavit (1D pole)
Read value (I)	Číselná hodnota proudu čtená na příslušném portu	Check out	Výstup kontrolního parametru
Write port (I)	Port na kterém je nastavován proud zdroje M1 (M4)		
Write value (I)	Číselná hodnota nastavovaného proudu v minulém cyklu		
Write port (U)	Port, na kterém je nastavováno napětí zdroje M2 (M5)		
Write value (U)	Číselná hodnota nastavovaného napětí v minulém cyklu		
Control both?	Logický hodnota, která říká, zda jsou ovládány oba iontové zdroje současně		
Check in	Stup kontrolního parametru		

**Tabulka 0.15:** Terminály programu ION\_HEAT\_FUNCTION.vi

V blokovém schématu je naprogramována celá řada řídicích povelů. Na obrázku je znázorněna pouze nejsložitější funkce ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_I\_START, při jejím popisu



budu na obrázek odkazovat. Všechny ostatní funkce jsou poměrně jednoduché a bude stačit pouze jejich slovní komentář.

Výčet naprogramovaných funkcí je následující:

- ION\_HEAT\_OFF,
- ION\_HEAT\_MANUAL,
- ION\_HEAT\_AUTO\_START,
- ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_V\_START,
- ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_I\_START,
- ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_I\_END,
- ION\_HEAT\_AUTO\_SET\_I\_END.

Příkaz ION\_HEAT\_OFF je základní příkaz. Při přijetí tohoto příkazu nejsou čteny žádné vstupy a nejsou nastavovány žádné výstupy.

ION\_HEAT\_MANUAL je příkaz určený k manuálnímu ovládní kaskády Mesitů (respektive manuální nastavování napětí na M2, M5 a proudů na M1, M4). Tento příkaz má šest parametrů. Prvním parametrem se zadává hodnota nastavovaného proudu, druhý povoluje zápis na příslušný port, třetí je hodnota nastavovaného napětí, čtvrtým se opět povoluje příslušný port, poslední dva parametry povolují čtení hodnot z portu, na kterých jsou vyčítány hodnoty proudů na M3 (M6) a hodnoty napětí na M1 (M4). Příklad odeslaného povelu je následující ION\_HEAT\_MESIT(5,0;1;10,0;0;1;0). Uvažujeme-li ovládní pouze primárního iontového zdroje, pak tento příkaz znamená, nastav hodnotu 5 A na zdroji M1 a čti hodnotu proudu na M3. Přestože je na čtvrtém místě povel k nastavení 10 V na M2, příkaz nebude vykonán, protože čtvrtý parametr má hodnotu nula, tady zákaz nastavování. Poslední dva parametry mají hodnotu 1 a 0. To znamená, že bude čtená hodnota proudu na M3, ale napětí na M1 ne.

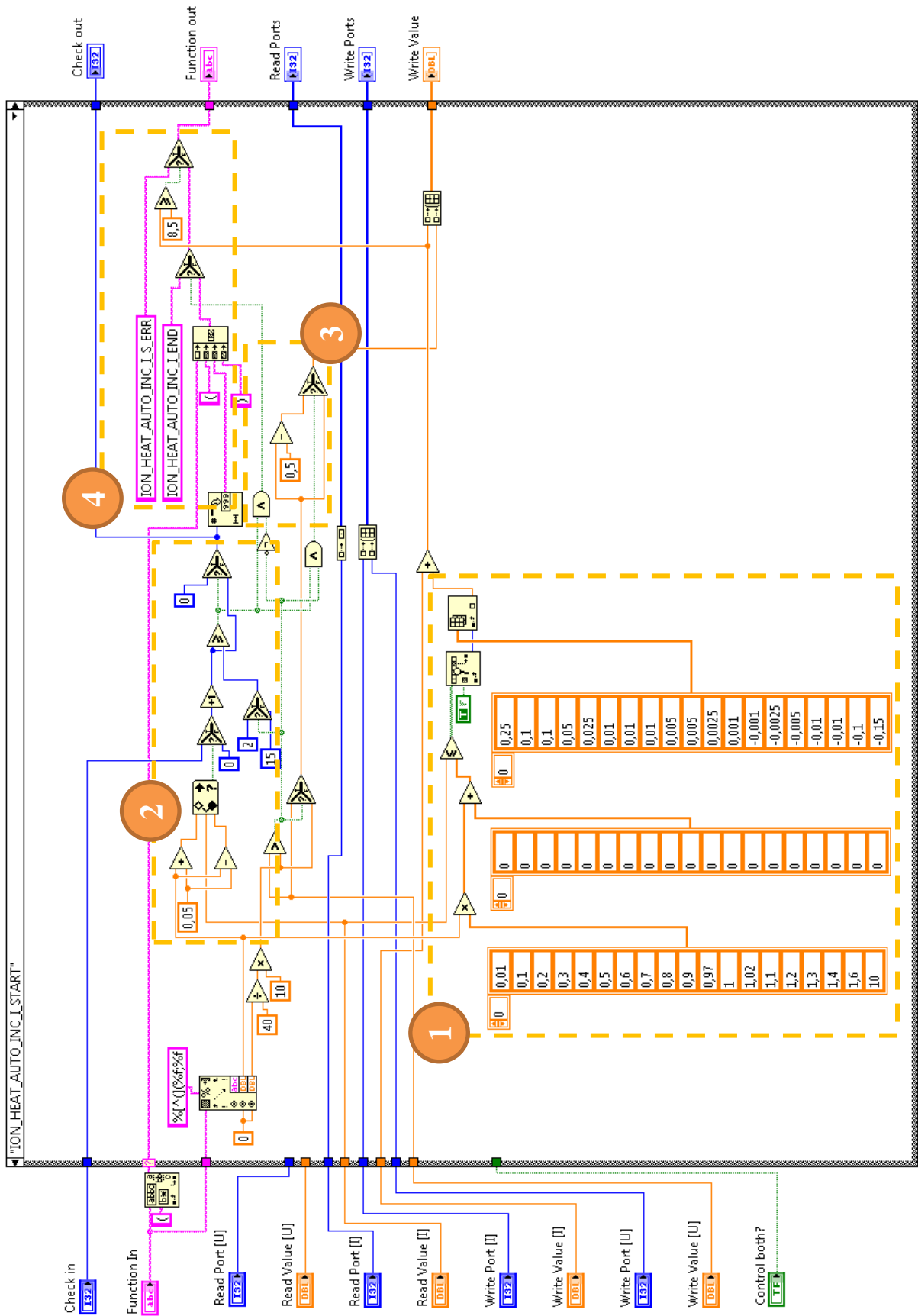
Příkaz ION\_HEAT\_AUTO\_START lze považovat za zaváděcí příkaz při automatickém ovládní. Stejnou funkci mají i další příkazy, které se ve výčtu nevyskytují. Jeho jedinou funkcí je ukončení všech předešlých činností a nastavení všech hodnot na nulu. Úplně stejnou funkci mají i další příkazy jako například ION\_HEAT\_FINISH\_START, ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_I\_S\_ERR a další. Funkce tohoto příkazu jsou totiž využívány také k ukončení programu, případně při vyhodnocení chyby a nastavení přístroje do počátečního stavu. Pád programu do těchto funkcí je programován automaticky a rozdílné názvy jedné funkce jsou výhodné při hledání problémů na zařízení. Například, je-li vyhodnocena chyba ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_I\_S\_ERR, znamená to, že chyba byla vyvolána během procesu inicializace proudu, to může znamenat spadnutí výbojového napětí, nebo nedostatečného množství reakčního plynu v iontovém zdroj. Obdobně ION\_HEAT\_AUTO\_SET\_I\_ERR1 se začne vykonávat v momentě, kdy dojde k chybě při zavádění extrakce. Výstupy jsou při různých funkcích různé. Pro původní příkaz je ukončení funkce notifikováno řetězcem ION\_HEAT\_AUTO\_END.

ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_V\_START: tento příkaz si lze přeložit jako začátek inicializace napětí. To znamená, že napětí na zdroji M2 (M5) bude postupně zvednuto z hodnoty nula na hodnotu 40 V. O ukončení této funkce informuje výstupní řetězec, na kterém se nastaví hodnota ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_V\_END.

ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_I\_START je nejsložitějším příkazem, který je v tomto programu zpracováván. Stručně řečeno, tento příkaz zvyšuje proud na M1 (M4) tak dlouho, dokud na zdroji M3 (M6) není detekována požadovaná hodnota proudu, tedy proud mezi katodou a anodou iontového zdroje ①. V momentě, kdy je tato hodnota nastavena, respektive se nachází v dostatečně blízkém intervalu od požadované hodnoty, dojde k načítání kontroly. Kontrola vyhodnotí, zda je měření stabilní. Poté se postupně snižuje napětí na M2 (M5) až na hodnotu zadanou uživatelem ③. Pokud je již nastavena konečná hodnota napětí, dojde k počítání kontroly, a pokud je proud po dobu 15 cyklů ② v dostatečně blízkém intervalu je funkce vyhodnocena jako ukončená. Ukončení této funkce je reprezentováno řetězcem ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_I\_END. Pokud dojde při vykonávání k chybě (nastavovaný proud na M1 (M4) přesáhne hodnotu 34 A, a nebo dojde k pádu výbojového proudu, příkaz se vyhodnotí chybovou notifikací ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_I\_S\_ERR ④. Tento příkaz má dva parametry, prvním je hodnota proudu, který má být detekován na M3 (M6), druhým parametrem je konečná hodnota napětí na M2 (M5).

Obdobou předešlého příkazu je příkaz ION\_HEAT\_AUTO\_INC\_I\_END. Tento příkaz pouze stabilizuje hodnotu napětí na M1 (M4) tak, aby byl na M3 (M6) detekovaný požadovaný proud. Pomocí tohoto příkazu nedochází ke snižování napětí na M2 (M5).

Příkaz ION\_HEAT\_AUTO\_SET\_I\_START se uplatňuje až při extrakci iontů. Tento příkaz má za úkol korigovat proud na M1 (M4) tak, aby na G1 byla požadovaná hodnota proudu. Tento příkaz má pouze jeden parametr, který je navíc nutné předávat z převodníku LabJack. Parametrem je rozdíl naměřené hodnoty napětí na G1 a požadované hodnoty v mA. Pokud je tato hodnota kladná bude tato funkce hodnotu proudu na M1 (M4) zmenšovat, naopak bude-li hodnota záporná, funkce bude proud zvyšovat. Výstupem při dosažení dostatečné přesnosti je textový řetězec ION\_HEAT\_AUTO\_SET\_I\_END.



Obrázek 0.15: Program ION\_HEAT\_FUNCTION.vi

Program, který se stará o ovládání zdrojů firmy Glassma je ION\_EXTR\_FUNCTION.vi (Obrázek 0.16). Mnohé funkce tohoto programu jsou analogii funkcí, kterými jsou ovládány zdroje Mesit.

Terminály programu ION\_EXTR\_FUNCTION.vi jsou v Tabulka 0.16.

Vstupní t.	Funkce	Výstupní t.	Funkce
Function in	Textový terminál nastavující jednotlivé funkce	Function Out	Notifikátor prováděných funkcí
Read port down	Proud čtený na zdroji G1 (G3)	Write port down	Zapisované napětí na G1 (G3)
Read port up	Proud čtený na zdroji G2 (G4)	Write port up	Zapisované napětí na G2 (G4)
Write port down	Nastavené napětí na G1 (G3) v minulém cyklu	Port down	Logická jednotka, nastavuje zda se mají číst proudy na G1 (G3)
Write port up	Nastavení napětí na G2 (G4) v minulém cyklu	Port up	Logická jednotka, nastavuje zda se mají číst proudy na G2 (G4)
Read port down	Logická jednotka, která značí, zda se v minulém cyklu četla hodnota proudu na G1 (G3)		
Read port up	Logická jednotka, která značí, zda se v minulém cyklu četla hodnota proudu na G1 (G3)		
Prim/Seco	Logický přepínač určující zda je programem ovládan primární nebo sekundární iontový zdroj		

**Tabulka 0.16:** Terminály programu ION\_EXTR\_FUNCTION.vi

Výčet podporovaných funkcí je následující

- ION\_EXTR\_OFF,
- ION\_EXTR\_MAN,
- ION\_EXTR\_AUTO\_START,
- ION\_EXTR\_INC\_V\_START,
- ION\_EXTR\_AUTO\_CHECK\_I.

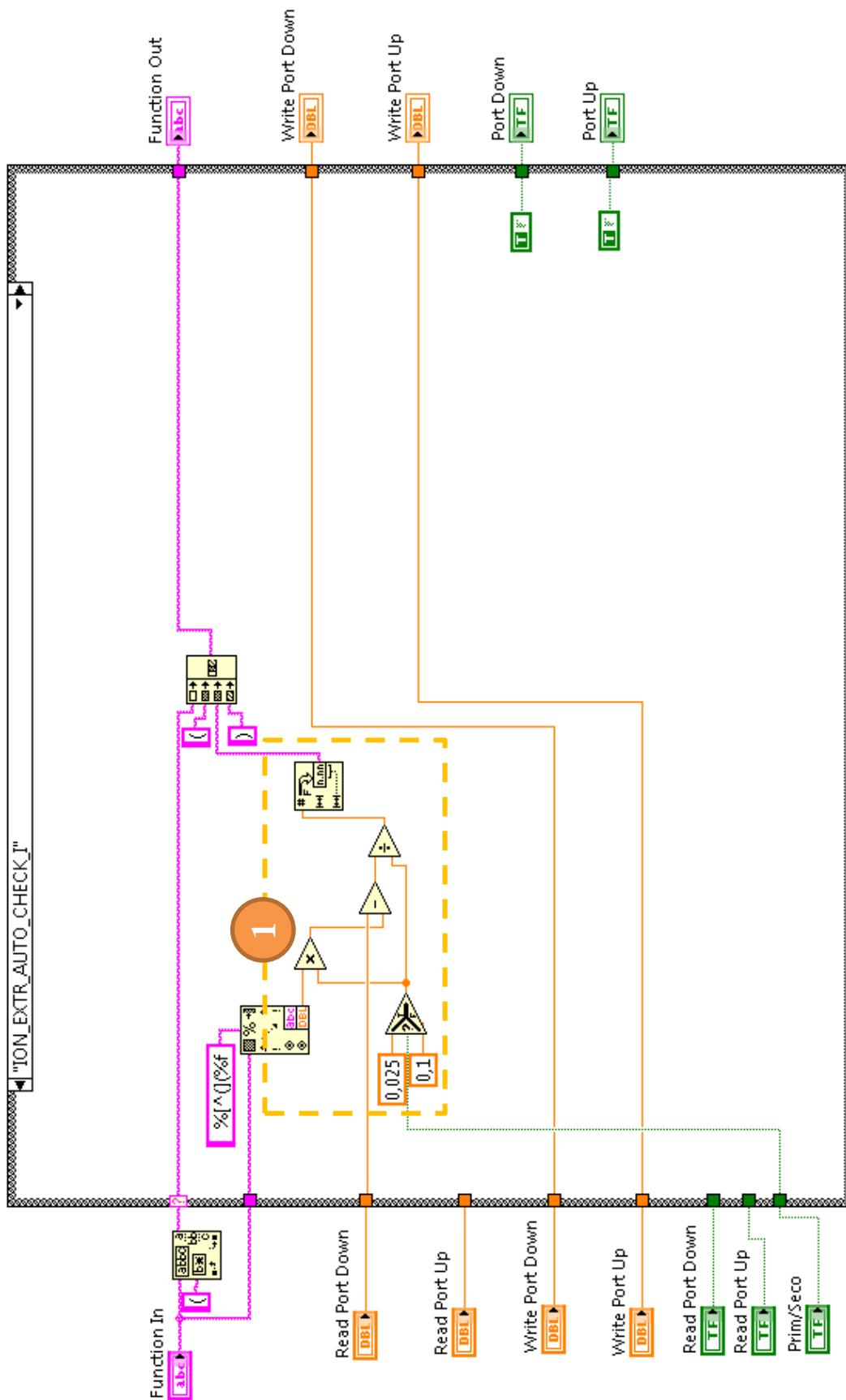
Příkaz ION\_EXTR\_OFF vypne všechny výstupy a vstupy nejsou vyčítány.

Příkazem ION\_EXTR\_MAN je stabilizované zdroje možné ovládat manuálně. Tento příkaz má šest parametrů. První udává hodnotu nastavovaného napětí na G1 (G3), druhý povoluje zápis pomocí převodníku, třetí nastavuje napětí na G2 (G4), čtvrtý povoluje zápis. Poslední dva parametry povolují čtení proudů na G1 (G3) a G2 (G4).

ION\_EXTR\_AUTO\_START je inicializační příkaz při zavedení automatického ovládání. Tento příkaz uvede všechny vstupy do hodnoty 0. Stejnou funkci má i příkaz ION\_EXTR\_FINISH\_START, který se používá pro ukončování procesu extrakce.

Příkaz ION\_EXTR\_INC\_V\_START zvýší postupně napětí na G1 a G2 (respektive G3 a G4) na požadovanou hodnotu. Tento příkaz má dva parametry, první je konečná hodnota napětí na G1 (G3) druhý je konečná hodnota napětí na G2 (G4). Po úspěšném vykonání příkazu je na výstupní terminál odeslán řetězec ION\_EXTR\_AUTO\_INC\_V\_END.

Posledním příkazem je ION\_EXTR\_AUTO\_CHECK\_I. Tento příkaz má jeden parametr a tím je požadovaná hodnota proudu na G1 (G3). Tato hodnota je odečtena od měřené hodnoty ① a předávána nadřazenému programu. Pomocí této funkce jsou následně odesílány hodnoty do smyčky, která ovládá zdroje Mesit. A pokud je při automatickém ovládání dosaženo příkazu ION\_HEAT\_AUTO\_SET\_I\_START, je korigována hodnota která je příkazem ION\_EXTR\_AUTO\_CHECK\_I vyčítána.



Obrázek 0.16: Program ION\_EXTR\_FUNCTION.vi

## B.7 Vzájemné propojení

Jednou z nejdůležitějších součástí programu je blok, kterým se navzájem propojují jednotlivé přístroje. O toto propojení se stará program KAUFMAN\_FUNCTION.vi. Prostřednictvím hlavního programu jsou zde přivedeny funkční výstupní terminály všech používaných zařízení. Tím je zajištěno, že má program přehled o všech procesech, které probíhají. Blokový diagram je kromě terminálových vstupů (funkční terminálové výstupy dílčích zařízení) tvořen jednou case strukturou, která je ovládána pomocí textového příkazu na terminálu mode. Celý program je dále tvořen jedním terminálovým výstupem. Tímto výstupem jsou všechny používané zařízení nastavovány.

Terminál mode, přepíná strukturu do třech možných stavů

- END\_OK,
- MANUAL\_OK,
- AUTO\_OK (SEMI\_AUTO\_OK).

Ve stavu END\_OK jsou všechny přístroje uvedeny do počátečního stavu. Do všech zařízení jsou odeslány příkazy se sufixem \_OFF (např. ION\_HEAT\_OFF, TARGET\_OFF, FLOW\_OFF atd.)

V modu MANUAL\_OK jsou do obvodu přivedeny všechny řídicí tlačítka a posuvníky, které se nachází na předním panelu hlavního programu. Pomocí terminálového výstupu jsou všechny nastavované přístroje uvedeny do modu manual (např. ION\_HEAT\_MAN, FLOW\_MANUAL atd.). V tomto modu jsou signály z ovládačů na předním panelu formátovány tak, aby odpovídaly příkazům pro manuální ovládání. Např. ovládání stabilizovaných zdrojů v manuálním módu je dáno pomocí příkazu ION\_HEAT\_MAN a jeho šesti parametrů. Na předním panelu hlavního programu se tedy nachází ovládače a tlačítka, které odpovídají parametrům vkládaných do textového příkazu. V programu KAUFMAN\_FUNCTION jsou hodnoty z ovládacích prvků převedeny na textové příkazy, které se následně posílají do jednotlivých programů, které ovládají dílčí zařízení.

Mód AUTO\_OK (respektive SEMI\_AUTO\_OK) funguje totožně jako mód manuální. Pomocí tohoto módu je však možné využívat i vyšších funkcí jednotlivých programů. Například je možné kontrolovat tloušťky vrstvy deponované vrstvy, příkazem THICK\_MEASURE. Do tohoto módu jsou zařazeny podprogramy, které reagují na události generované na výstupu dílčích zařízení.

V tomto modu jsou aktivovány podprogramy ION\_PROCESS.vi, SHUTTER\_PROCESS.vi, PRESSURE\_PROCESS.vi a FLOWMETER\_PROCESS.vi. Přesný popis těchto podprogramů není nutný. Všechny jsou ve větší, či menší míře postaveny na principu zpětné vazby. V praxi to vypadá tak, že jsou v těchto podprogramech definovány tabulky hodnot a odezev při různých vstupních událostech.

Jako příklad je možné si znázornit proces extrakce iontů. Jde o nejsložitější zpětnovazební smyčku, ve které jsou nastaveny reakce na velké množství vstupních parametrů. Při zavádění extrakce probíhá komunikace mezi podprogramem ION\_PROCESS.vi a programy ION\_EXTR\_FUNCTION.vi. a ION\_HEAT\_FUNCTION.vi. V následující tabulce budou

odesílány příkazy a jako reakce budou zobrazovány pouze konečné hodnoty po vykonání funkce na příslušných přístrojích. Program ION\_PROCESS.vi vždy vydá nový příkaz jako odezvu na příkaz přichozí. První příkaz při zavádění extrakce je ION\_HEAT\_AUTO\_START a ten se spouští pomocí tlačítka na předním panelu hlavního programu, respektive spuštěním automatizovaného cyklu. Dále uvažujme pouze primární iontový zdroj, kde konečná hodnota proudu při žhavení vlákna bude 1,5 A a konečná hodnota napětí na M2 0 V. Při extrakci bude na G1 nastaveno napětí 600 V a na G2 200 V. Konečný proud vyčítaný na G1 je požadován 50 mA.

Konečné reakce vstupní příkaz	Příkaz odeslaný programem ION_PROCESS.vi
	ION_HEAT_AUTO_START
ION_HEAT_AUTO_END	ION_HEAT_AUTO_INC_V_START
ION_HEAT_AUTO_INC_V_END	ION_HEAT_AUTO_INC_I_START(0;1,5)
ION_HEAT_AUTO_INC_I_END	ION_HEAT_AUTO_INC_I_END(1,5)
	ION_EXTR_AUTO_START
ION_EXTR_AUTO_END	ION_EXTR_AUTO_INC_V_START(600;200)
ION_EXTR_AUTO_INC_V_END	ION_EXTR_AUTO_CHECK_I(50)
ION_EXTR_AUTO_CHECK_I(5)	ION_EXTR_AUTO_CHECK_I(50)
	ION_HEAT_AUTO_SET_I_START(5)
ION_HEAT_AUTO_SET_I_END	ION_HEAT_AUTO_SET_I_END(0)

Proces extrakce iontů je v tabulce rozdělen do tří částí, ty přesně odpovídají povelů, jak jsou za sebou nastavovány jednotlivé stabilizované zdroje. Nejdřív je vyvoláno žhavení vlákna. Po vykonání tohoto procesu, se uvedou v chod zdroje, pomocí kterých se vybudí extrakce iontů. Nakonec je vyčítán rozdíl mezi měřenou a požadovanou hodnotou proudu na G1. Tento rozdíl je předán programu ovládání Mesitů, který začne korigovat hodnotu proudu na M1 dokud rozdíl nebude dostatečně malý.

Podobné tabulky větších, či menších rozsahů obsahují všechny procesní programy v modu AUTO\_OK (SEMI\_AUTO\_OK).



## Literatura

- [1] POWELL C. F., OXLEY J. H., BLOCHER J. M.: *Vapor Deposition*, The Electrochemical Society series, New York, 1966.
- [2] GROVE W. R.: *On the electro-chemical polarity of gases*, Philosophical Transactions of the Royal Society **142**, str. 87, 1852.
- [3] PENNING F. M.: *Physica* **3**, str. 563, 1936.
- [4] DUB P., SPOUSTA J., ZLAMAL J.: *Kvantová mechanika (pomalu a těžce, ale radostně)*, Ústav fyzikálního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2005.
- [5] KAUFMAN H. R.: *Technology and applications of broad-beam ion sources used in sputtering*, Journal of Vacuum Science & Technology **21**, Septmber/October 1982,, American Vacuum, 1982.
- [6] BROWN G. I.: *The Physics and Technology of Ion Sources*, Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Německo, ISBN: 3-527-40410-4, 2004.
- [7] NASTASI M., MAYER J. W., HIRVONEN J. K.: *Ion-Solid Interactions Fundamentals and Applications*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, Velká Británie, 1996.
- [8] OHRING M.: *Materials Science of Thin Films: Deposition and Structure*, Elsevier, Inc., ISBN: 978-0-12-524975-1, 2002.
- [9] BIRCH J.: *Recent advances in ion-assisted growth of Cr/Sc multilayer X-ray mirrors for the water window*, Vacuum **68**, str. 275-282, 2002.
- [10] PALENICEK M.: *Modernizace aparatury pro depozici pomocí iontového naprašování*, Ústav fyzikálního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, bakalářská práce, 2010.
- [11] URBANEK I.: *Modernizace aparatury IBAD*, Ústav fyzikálního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, diplomová práce, 2008.
- [12] ERBEN M.: *Vakuová technika*, Katedra obecné a anorganické chemie, Fakulta chemicko-technologická, Univerzita Pardubice, 2008.
- [13] PAVERA M.: *Řízení depozičního procesu pomocí počítače*, Ústav fyzikálního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, bakalářská práce, 2009.
- [14] TRAVIS J., KING J.: *LabVIEW for Everyone: Graphical programming made Easy & Fun*, Prentice Hall PTR, (2006).

# Seznam příloh

## Výkresová dokumentace:

- Držák terčů.
- Patice signálových pinů.
- Propojovací konzole.
- Masky tištěného spoje.

## CD-ROM:

- Výkresy držáku terčů.
- Výkresy patice pinů.
- Výkresy propojovacích konzolí.
- Výkres masky tištěného spoje.
- 3D model nového držáku terčů v programu Inventor.
- 3D model propojovacích konzolí v programu Inventor.
- 3D model patice signálových pinů v programu Inventor.
- Program KAUFMAN\_GUI.vi a všechny příslušné podprogramy.