



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Návrh řízení plazmové depozice tenkých vrstev

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Martin Šetina**

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Petrík, CSc.

Konzultant: RNDr. Michal Krejčík





Diplomová práce

Návrh řízení plazmové depozice tenkých vrstev

Studijní program:

N2612 Elektrotechnika a informatika

Studijní obor:

Mechatronika

Autor práce:

Bc. Martin Šetina

Vedoucí práce:

doc. Ing. Stanislav Petřík, CSc.

Ústav nových technologií a aplikované informatiky

Liberec 2023



Zadání diplomové práce

Návrh řízení plazmové depozice tenkých vrstev

<i>Jméno a příjmení:</i>	Bc. Martin Šetina
<i>Osobní číslo:</i>	M20000189
<i>Studijní program:</i>	N2612 Elektrotechnika a informatika
<i>Studijní obor:</i>	Mechatronika
<i>Zadávající katedra:</i>	Ústav nových technologií a aplikované informatiky
<i>Akademický rok:</i>	2021/2022

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši metod řízení vakuových depozičních komor.
2. Navrhněte princip řízení vývěv a regulaci vakua.
3. Zautomatizujte řízení RF generátoru a kompenzační jednotky.
4. Navrhněte regulaci připouštění plyných prekurzorů.
5. Uvažujte další modifikace celého zařízení.
6. Realizujte dálkovou zprávu a vizualizaci.
7. Ověřte funkčnost celého zařízení.
8. Proveďte měření a sběr experimentálních dat.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 40-50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština

Seznam odborné literatury:

- [1] Optical characterization of thin solid films. Editor Olaf STENZEL, editor Miloslav OHLÍDAL. Cham: Springer International Publishing, [2018]. Series in surface sciences (Springer). ISBN 331975324x.
- [2] KLÍMA, Jan a Bedřich VELICKÝ. Kvantová mechanika. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2018. ISBN 9788024629377.
- [3] BURŠÍKOVÁ, Vilma. Surface energy evaluation of plasma treated materials by contact angle measurement. Brno: Masaryk University, 2004. ISBN 80-210-3563-3.
- [4] DUBRAVCOVÁ, Viera. Vákuová a ultravákuová technika: vysokošk. učebnica pre Elektrotech. fak. STU. Bratislava: Alfa, 1992. Edícia elektrotechnickej literatúry (Alfa).
- [5] PAVERA, Michal a Michal URBÁNEK. Automatizace a řízení depozice multivrstev metodou IBS/IBAD. 2011.

Vedoucí práce: doc. Ing. Stanislav Petřík, CSc.
Ústav nových technologií a aplikované informatiky

Datum zadání práce: 12. října 2021
Předpokládaný termín odevzdání: 22. května 2023

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

Ing. Josef Novák, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 19. října 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil své upřímné poděkování vedoucímu diplomové práce, doc. Ing. Stanislavovi Petříkovi, CSc., za jeho vstřícnost, cenné rady a odborné vedení během celé diplomové práce. Jeho zkušenosti a ochota významně přispěly k zdárnému dokončení této práce.

Rovněž bych chtěl poděkovat RNDr. Michalovi Krejčíkovi za jeho faktické připomínky, odborné rady a ochotu vysvětlovat problematiku spojenou s vakuovou depozicí. Jeho znalosti a zkušenosti z praxe byly velmi užitečné a usnadnily mi hledání vhodných přístupů a řešení.

Nakonec bych chtěl vyjádřit vděčnost své ženě Zdence za její neustálou podporu, pochopení a především neskonalou trpělivost.

Návrh řízení plazmové depozice tenkých vrstev

Abstrakt

Vakuová depoziční aparatura slouží obecně k vytváření tenkých vrstev, nebo speciálních struktur na zvoleném substrátu. Tyto vrstvy mění požadovaným způsobem mechanické, optické a obecně fyzikální vlastnosti původního materiálu. Široká oblast výzkumu v této oblasti představuje i rozmanité požadavky na řízení aparatury a připojovaných periferií. Tato práce se zabývá kompletním návrhem a realizací řízení vakuové depoziční komory. Klade si za cíl co nejvíce zmapovat problematiku a navrhnout elektronické řízení, které bude možné snadno přizpůsobovat konkrétním požadavkům výzkumné činnosti v oblasti nanomateriálů a tenkých struktur. Snahou je vyhledání specifických úskalí, kde by implementace automatického řízení mohla přinést kvalitativní zlepšení. Práce by tak mohla být užitečná a inspirativní pro zájemce o hlubší pochopení principů povlakování, kteří se nespokojí s komerčně dostupným řešením a receptem od výrobce. Je rozčleněna do několika okruhů, jak se z elektrického pohledu nabízí.

- řízení vývěv a regulace vakua
- řízení RF generátoru
- přizpůsobení RF generátoru
- regulace připouštění prekurzorů
- řízení magnetronů
- vizualizace a sběr dat

Klíčová slova: RF PACVD

Design of plasma deposition control for thin films

Abstract

The vacuum deposition apparatus is generally used for creating thin films or special structures on a chosen substrate. These layers alter the mechanical, optical, and overall physical properties of the original material in the desired manner. The wide range of research in this field also encompasses diverse requirements for controlling the apparatus and its connected peripherals. This thesis focuses on the complete design and implementation of control for a vacuum deposition chamber. Its objective is to comprehensively explore the issues and propose electronic control that can be easily adapted to the specific demands of research activities in the field of nanomaterials and thin structures. The aim is to identify specific challenges where the implementation of automatic control could bring qualitative improvements. The thesis could thus be useful and inspiring for individuals interested in gaining a deeper understanding of coating principles, individuals who are not satisfied with commercially available solutions and recipes provided by manufacturers. It is divided into several sections, as it naturally lends itself to electrical considerations.

- Control of pumping and vacuum regulation
- Control of the RF generator
- Adaptation of the RF generator
- Control of precursor delivery
- Control of magnetrons
- Visualization and data collection

Keywords: RF PACVD

Obsah

Seznam zkratek	9
1 Úvod	12
2 Teoretická část	13
2.1 Vývěvy a regulace vakua	13
2.1.1 Měření vakua	16
2.2 Plazma	20
2.2.1 RF generátor jako zdroj plazmatu	21
2.2.2 Princip vytváření plazmatu	25
2.2.3 Přizpůsobovací jednotka	26
2.2.4 Automatická přizpůsobovací jednotka	29
2.3 Regulace připouštění plynů	31
2.4 Magnetron	34
2.4.1 Generátor pro řízení magnetronu	35
3 Praktická část	38
3.1 Regulace Vakua	38
3.1.1 Konfigurace systému odsávání	39
3.2 Návrh převodníku pro magnetronový generátor	40
3.3 Automatizace jednotky DKE6-0K7-22	45
3.3.1 Algoritmus přizpůsobení RF	51
3.4 Komunikace s MFC	56
3.5 Shrnutí	58
4 Závěr	60
Použitá literatura	63

Seznam zkratek

AVR	8bitový RISC mikrokontrolér od Atmel
bps	Komunikační rychlost bity za sekundu (bits per second)
RISC	Redukovaná sada instrukcí (Reduced Instruction Set Computer)
I²C	Rozhraní pro sériovou komunikaci (Inter-Integrated Circuit)
IDE	Integrované vývojové prostředí (Integrated Development Environment)
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter
MCU	Mikrokontrolér (MicroController Unit)
MIPS	Million Instructions Per Second
TCP	Protokol pro řízení přenosu (Transmission Control Protocol)
TCP/IP	Internetový protokol TCP
ModbusTCP	Modbus protokol přenášený pomocí TCP/IP
RF generátor	Radio-frekvenční generátor
RF Matching Network	Impedanční přizpůsobovací jednotka
SWR	Poměr stojatých vln
PWF	Dopředný výkon generátoru ve watttech
PWR	Odražený výkon vracející se do generátoru
PWM	Pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
PCB	Tištěný obvod plošného spoje (Printed Circuit Board)
bias	DC napětí na elektrodě ve vakuové komoře (U_b)
C++	Objektově orientovaný programovací jazyk, rozšíření jazyka C o podporu objektového programování a dalších rozšíření. Čte se "C plus plus"
C#	Moderní objektově orientovaný programovací jazyk, vyvinutý společností Microsoft jako alternativa k jazyku Java. Čte se "C sharp"
PID	spojitý regulátor složený z proporcionální, integrační a derivační části
PLC	řídící jednotka
HMI	rozhraní člověk-stroj, obvykle zobrazovač s ovládáním
PVD	Fyzikální metoda deponování
CVD	Chemická metoda deponování
PACVD	Plazmatem podporovaná CVD
RF PACVD	Radio-frekvenční PA CVD
DLC	Uhlík podobný diamantu
sccm	jednotka průtoku - standardní kubický centimetr za minutu
ICP	Indukčně vázané plazma
CCP	Kapacitně vázané plazma
MFC	Hmotnostní regulátor (Mass Flow Controller)
MFM	Hmotnostní průtokoměr (Mass Flow Meters)

Seznam obrázků

2.1	Přehledová tabulka vývěv (zdroj: [1])	13
2.2	Srovnání rotační a rootsovy vývěvy (zdroj: [2])	15
2.3	Nomogram pro odhad čerpacího času (zdroj: [1])	15
2.4	Princip rootsovy vývěvy (zdroj: [1])	16
2.5	Přehledová tabulka vakuových měrek (zdroj: [1])	18
2.6	Indikovaný tlak (zdroj: [3])	19
2.7	Plazma v depoziční komoře	21
2.8	RF generátor blokové schéma (zdroj: [7])	22
2.9	RF generátor Cesar 1312 (zdroj: [7])	22
2.10	RF generátor Cesar 1312 konektory (zdroj: [7])	23
2.11	Formát komunikace AE BUS (zdroj: [7])	23
2.12	Transakce AE BUS (zdroj: [7])	24
2.13	Příklad komunikace AE BUS (zdroj: [7])	24
2.14	RF generátor a zpětná vazba DC bias (zdroj: [7])	25
2.15	Kapacitní a induktivní RF buzení (zdroj: [8])	26
2.16	Manuální přizpůsobovací jednotka	28
2.17	Automatická přizpůsobovací jednotka	29
2.18	Schéma Matching Network	30
2.19	Geometrie depoziční elektrody (pohled shora)	31
2.20	MFC měření pomocí Coriolisovy síly (zdroj: [9])	33
2.21	Blokové schéma teplotního MFC (zdroj: [10])	33
2.22	Mechanismus magnetronového naprašování (zdroj: [11])	35
2.23	Blokové schéma magnetronového generátoru DORA (zdroj: [12])	36
2.24	Otevřený generátor Dora 10kW	37
3.1	Blokové schéma regulátoru VAT	38
3.2	Konfigurace sériové komunikace v PLC	39
3.3	Návrh zapojení A/D převodníku pro magnetronový generátor	42
3.4	Připojení motorů k DKE6-0K7-22	46
3.5	Vnitřní uspořádání jednotky DKE6-0K7-22	47
3.6	Blokové schéma celkového zapojení	47
3.7	Schéma převodníku napětí U_b	48
3.8	Graf závislosti U_b na tlaku	49
3.9	Graf U_b při konstantních podmínkách	50
3.10	Ilustrace gradientního vzestupu [13].	53

3.11 ukázka PLC programu sekvence ladění SWR	54
3.12 funkční blok normGrad	55
3.13 rozvaděč s rozšiřujícími moduly GECON	57
3.14 Převodníky GNOME (zdroj [14])	58
3.15 Ethernetová konfigurace na straně PLC	59

1 Úvod

Základ vakuové aparatury tvoří depoziční komora se zavzdušňovacím ventilem, vakuovou měrkou a odsávací vývěvou. Pomocí vývěvy se udržuje definované vakuum, ve kterém je dostatečně dlouhá střední volná dráha částic. To je základní předpoklad pro deposici tenké vrstvy na povrchu substrátu. Další nezbytnou součástí je zdroj urychlených částic, jimž bude substrát vystaven.

Základní metoda CVD (Chemical Vapour Deposition) je chemický proces, kdy se komora a substrát vyhřívá na teploty přes 900°C. Dochází k termální dekompozici připouštěných plynných prekurzorů, které díky vysoké teplotě s určitou pravděpodobností zasáhnou povrch substrátu, kde začnou vytvářet nové vazby. Tato metoda se využívá v polovodičovém průmyslu, metalurgii, nebo při výrobě syntetických diamantů. Nevýhodou je především vysoká teplota, energetická náročnost a odpadní toxické výpary. Nevýhody lze částečně eliminovat pokročilejšími metodami PA/-PE-CVD (Plasma Assisted/Plasma Enhanced). Nejčastěji pomocí RF generátoru s indukční nebo kapacitní vazbou se vytváří v komoře doutnavý výboj, který způsobuje elektronové excitace prekurzoru s nízkým stupněm ionizace, obvykle 10^{-4} . Díky tomu se významně sníží nároky na výhřev komory a substrátu. Zvyšuje se ale složitost řízení celé aparatury o RF generátor a impedanční přizpůsobení zářiče, které se musí dynamicky ladit s měnícími se podmínkami v komoře. Cílem přizpůsobení je minimalizovat odražený výkon zpět do generátoru. K tomu slouží přizpůsobovací jednotka - RF Matching Network.

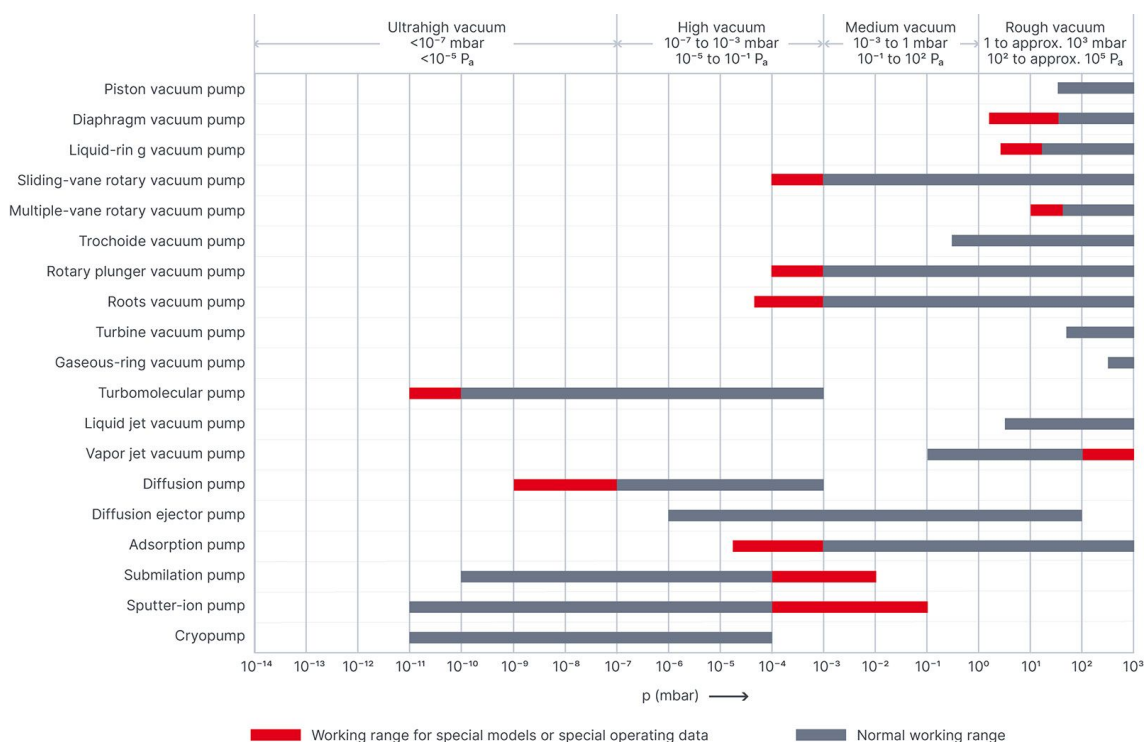
Dalším možným rozšířením je PVD metoda. Ta umožňuje například pomocí magnetronů naprašovat i těžké prvky, které se v plynných skupenstvích obvykle nedají za běžných teplot připravit. To sebou přináší další problematiku regulace magnetronů, které slouží zajišťují odprašování targetů. Pod nimi je obvykle zapotřebí substrát rotovat, naklápět, případně jinak polohovat. To vyžaduje další elektronické řízení, které je součástí celého procesu.

V neposlední řadě je třeba z procesu sbírat data pro vlastní regulaci k následnému vyhodnocení a optimalizaci. Těžištěm této práce je komplexní uchopení celé problematiky. Cílem je navrhnutí řízení, jehož základem bude spolehlivé průmyslové PLC s HMI panelem, které bude komunikovat s podřízenými periferiemi a pomocí sítě ethernet umožní připojení vizualizace a ukládání dat do PC databáze.

2 Teoretická část

2.1 Vývěvy a regulace vakua

Existuje celá řada možného rozdělení vývěv. Podle principu činnosti na transportní a sorpční, podle stupně vakua, dle pracovní oblasti tlaku, z mechanického hlediska atd. Z hlediska řízení jsou ale zajímavé pouze transportní, kde dochází k odvodu molekul plynu z čerpaného prostoru a lze provádět jejich řízení a regulaci. K vytvoření a udržení potřebného vakua se obvykle používá několik různých principů vývěv, které se postupně spínají podle aktuálního tlaku. Důvodem je fakt, že různé principy účinně pracují jen v určitých rozsazích. Na obrázku 2.1 je přehledová tabulka pracovních oblastí pro různá vakuová čerpadla. Podrobněji se v této práci bude věnovat pouze rotační, rootsové a turbo-molekulární vývěvě, se kterými je počítáno v konceptu.



Obrázek 2.1: Přehledová tabulka vývěv (zdroj: [1])

Z praktického hlediska je velmi důležitá čerpací rychlost, respektive čas odčer-

pání "pump-down time". Udává, za jak dlouho lze dosáhnout minimálního tlaku pro danou vývěvu. Čas na odčerpání může významně prodloužit celkový čas procesu, což samozřejmě není žádoucí. U malých experimentálních komor, pro které navrhují řízení, je pro vložení a výměnu vzorku vždy třeba napustit komoru zpět do atmosférického tlaku. Výrobce udává u čerpadel obvykle čerpací rychlost jako objem odčerpaného plynu za čas podle vztahu 2.1.

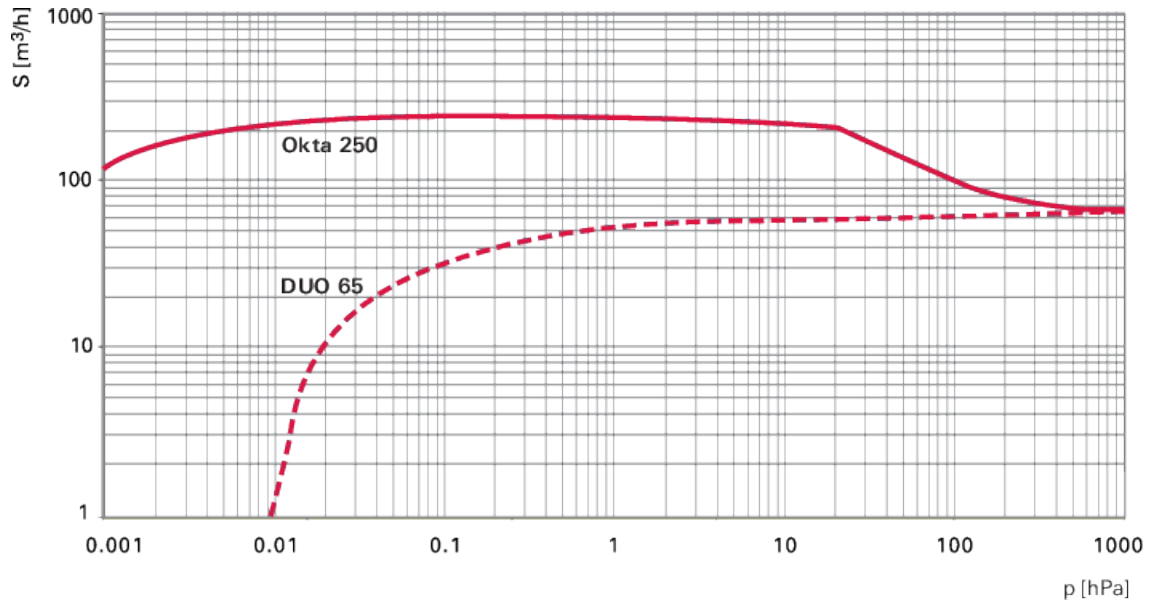
$$S = \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

S tím ale pro odhad potřebného času na odčerpání komory nevystačíme, protože čerpací rychlost není konstantní a ovlivňuje ji více faktorů. S tlakem se čerpací rychlost nelineárně mění, což je patrné z obrázku 2.2 a s klesajícím tlakem vstupují do hry ještě další faktory. Především jde o vzdušnou vlhkost, která při manipulaci ulpí na vnitřních stěnách a při nízkém tlaku se postupně v podobě par uvolňuje. V hlubokém vakuu pak hraje roli i minimální natékání přes různá těsnění přírub a průchodek, kterému se nedá zcela zabránit. Rychlost čerpání ovlivňují ještě mnohé další faktory, jako je geometrie komory a sacího potrubí, která ovlivňuje druh proudění, chemické složení připouštěného/odsávaného plynu atd. V praxi by výpočet potřebného čerpacího času byl příliš obtížný a používá se pouze odhad pomocí tzv. nomogramu. Jde o speciální graf, ze kterého lze pomocí geometrické konstrukce ve dvou krocích odečíst přibližný čerpací čas. Příklad takového nomogramu je na obrázku 2.3. V prvním sloupci se vybere objem komory a propojí se přímkou s efektivní čerpací rychlostí v druhém sloupci. Na nomogramu jsou zakresleny příklady pro komoru o objemu 2000 l a efektivní čerpací rychlosti 60 m³/h a 200 m³/h. Ve třetím sloupci se odečte $\tau = 120s(40s)$ (nejistota tohoto postupu je kolem 10s, takže relativní nejistota je asi 10%). V druhém kroku najdeme na pátém sloupci výpočet bod, který odpovídá rozdílu počátečního tlaku a konečného. V našem případě spodní úsečka $p_{START} - p_{ult} = 1 \times 10^{-1} - 3 \times 10^{-2} = 7 \times 10^{-2} mbar$, odpovídá 18,5 min ve sloupci 4. Zde je relativní nejistota přibližně 15%, takže pro celkový potřebný čas je pro nehorší možný případ dobré násobit ještě faktorem 1,35. V našem případě tedy můžeme počítat až s 25 min.

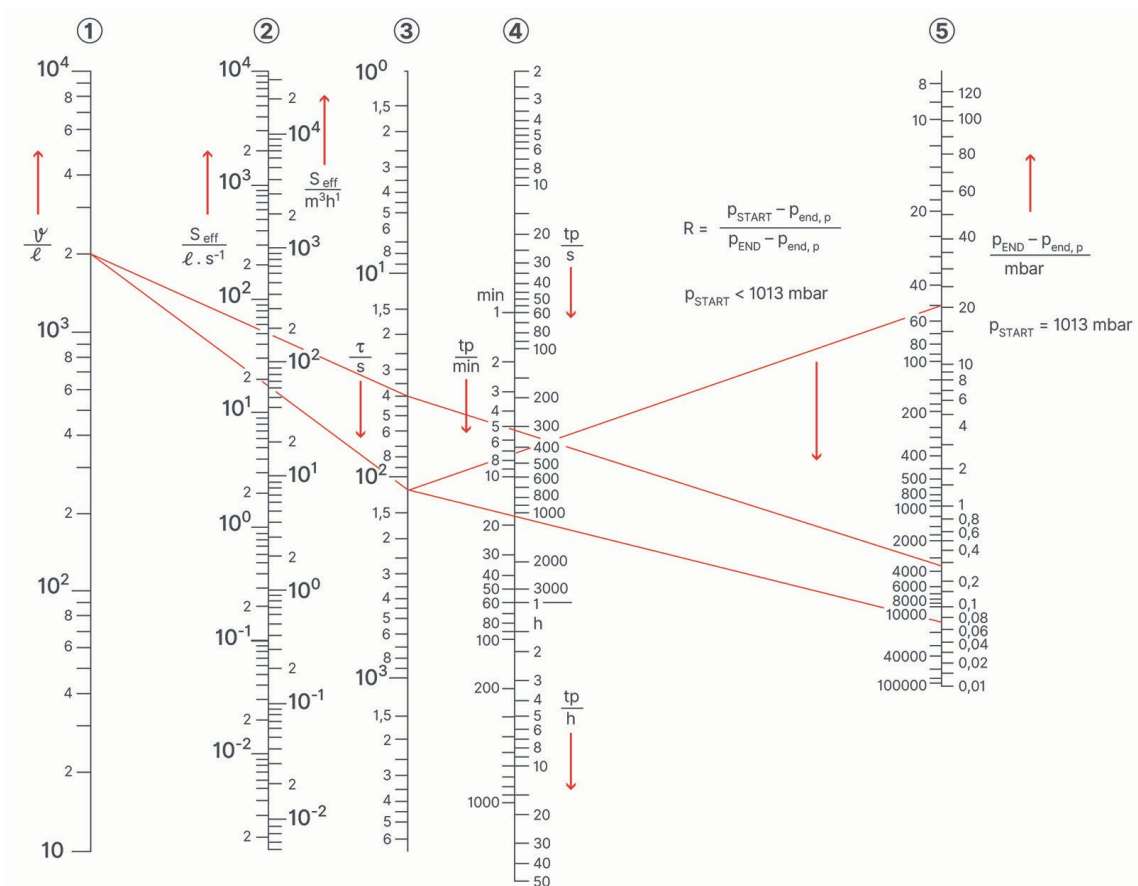
Konkrétní grafy čerpacích rychlostí rotační a rootsovy vývěvy, které jsou uvažovány pro návrh řízení, jsou na obrázku 2.2. Výsledný graf čerpací rychlosti obou vývěv vznikne pak jejich složením. Půjde o konkávní funkci s maximem kolem 100Pa.

Nejběžnější rotační olejová (lamelová) vývěva pracuje od atmosférického tlaku, ale pod 100 Pa se začíná snižovat čerpací výkon. Nejnižšího tlaku, jakého můžeme reálně s rotační pumpou dosáhnout, jsou jednotky pascalů. Je-li v systému tlak nižší než 10 kPa, je možné zapojit takzvanou rootsovu vývěvu. Stručný princip fungování je na obrázku 2.4. Ta účinně pracuje ještě při tlaku 10⁻¹ Pa.

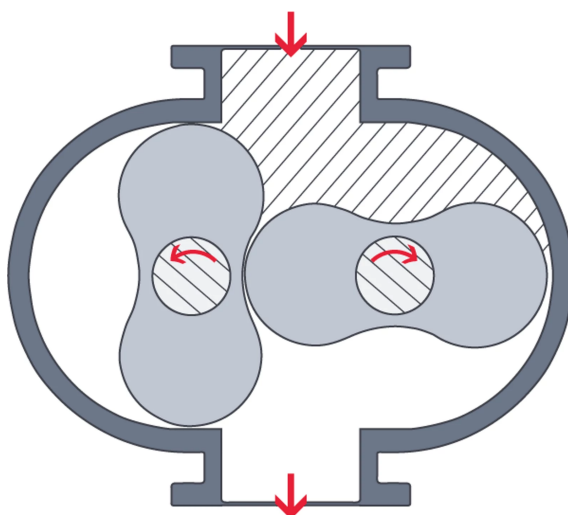
Pro nižší tlaky se pak používají další principy, jako je difuzní olejová, nebo turbo-molekulární vývěva. U nich je důležité hlídat pracovní tlak a dodržovat určité zásady zacházení. Zatím co u difuzní vývěvy hrozí především znečištění olejové náplně, turbo-molekulární vývěva může být velmi snadno zcela zničena. Důvod je ten, že rotor může dosahovat až 90000 ot/min, při kterých prudký nárůst tlaku, nebo kontakt lopatky s drobnou uvolněnou nečistotou, může vývěvu zcela zničit. Turbo-



Obrázek 2.2: Srovnání rotační a rootsovy vývěvy (zdroj: [2])



Obrázek 2.3: Nomogram pro odhad čerpacího času (zdroj: [1])



Obrázek 2.4: Princip rootsovy vývěvy (zdroj: [1])

-molekulární vývěva pracuje při tlacích pod 100 Pa a lze s ní odčerpat systém do méně než 10^{-3} Pa.

2.1.1 Měření vakua

Vakuové měření je nezbytnou součástí vakuových depozičních procesů. Cílem vakuového měření je získávat informaci o tlaku v uzavřeném prostoru depoziční komory. Tlak je fyzikálně definován jako síla působící na plochu. Nejpoužívanější jednotkou je $1 Pa$ (pascal), který je definován jako tlak vyvinutý silou $1 N$ (newton) působícího kolmo na plochu $1 m^2$ dle vztahu 2.2.

$$p = \frac{F}{S} \quad (2.2)$$

a udává se v jednotkách:

$$Pa = \frac{N}{m^2} = \frac{kg \cdot m}{m^2 \cdot s^2} = \frac{kg}{m \cdot s^2} \quad (2.3)$$

Informace o tlaku složí k řízení vývěv a procesu depozice. Obecně se přístroje pro měření tlaku nazývají manometry, ale pro náš speciální případ vakua se vžil pojem vakuové měřky (anglicky vacuum gauge). Některé typy manometrů, jako třeba rtuťové nebo trubcové, nejsou pro naše účely vhodné, proto se jimi zabývat nebudu. Každý typ má své specifické vlastnosti a z toho vyplývá i oblast použití. Nejpoužívanější přístroje vakuového měření jsou těchto typů:

- Piezoelektrické / piezorezistivní vakuové měřky
- Piráňho měřky
- Ionizační měřky

- Penningovy měrky
- Termopárové měrky

Piezelektrická měrka funguje na principu piezelektrického efektu, kdy se na materiálech s piezelektrickými vlastnostmi vytváří elektrické napětí při mechanickém namáhání. Při deformaci piezelektrického materiálu vlivem tlaku se jeho vnitřní struktura mění a dochází ke změně elektrického náboje. Toto napětí lze použít k měření tlaku, kdy se piezelektrický materiál umístí do oblasti s určitým tlakem a deformuje se v závislosti na tomto tlaku. Z deformace se poté dá určit tlak plynu v dané oblasti.

Piezorezistivní měrka využívá materiálů, které mají proměnlivý odpor při deformaci. Při napětí se délka materiálu mění a tím se mění také průřez, který má vliv na odpor vodiče. Tato změna odporu se dá převést na napětí a poté na měření mechanické deformace, nebo síly.

Piraniho měrka je založena na změně elektrického odporu v závislosti na tlaku plynu v oblasti mezi dvěma kovovými elektrodami, které jsou ohřívány elektrickým proudem. Elektrický odpor se mění v závislosti na počtu plynových molekul v této oblasti, které ovlivňují tepelnou vodivost. Tímto způsobem se dá určit tlak plynu v dané oblasti.

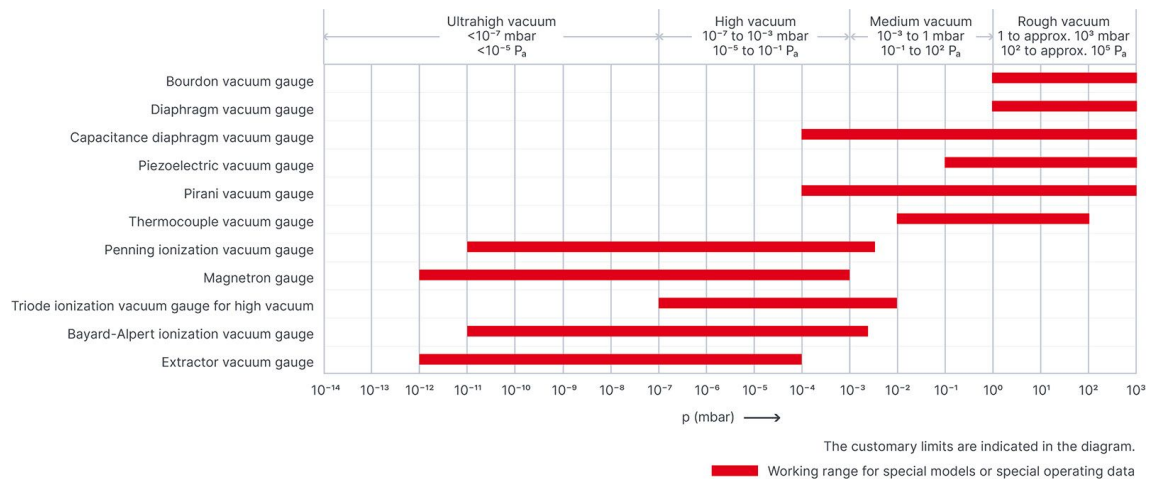
Ionizační měrka je přístroj, který využívá ionizace plynu v depoziční komoře. Ionizované částice jsou poté zachyceny elektrodami a množství ionizovaných částic slouží k určení tlaku.

Penningova měrka měří tlak vakuového prostředí pomocí ionizace plynu a detekce iontů. Princip je založen na elektrickém výboji, který probíhá mezi dvěma elektrodami v magnetickém poli. To prodlužuje dráhu elektronů a tím zvyšuje pravděpodobnost ionizace molekul plynů. Tento typ měření se používá v oblasti středního až vysokého vakua. Při středním vakuu je dominantní iontový proud a při vysokém vakuu je dominantní elektronový proud.

Termopár je vakuový měřicí přístroj, který měří teplotu filamentu a na základě této teploty určuje tlak vakuového prostředí. Tento typ měření se používá především v oblasti nízkého vakua.

Všechny tyto vakuové měřicí přístroje mají své specifické vlastnosti a omezení, které je třeba brát v úvahu při volbě správného typu pro konkrétní aplikaci. Vakuové měření je klíčové pro úspěšnou realizaci vakuových depozičních procesů. Přehledová tabulka dalších principů a pracovních oblastí je na obrázku 2.5.

Jelikož žádný princip nepostihuje celou oblast od atmosférického tlaku až po hluboké vakuum, výrobci často kombinují různé principy pro zvýšení přesnosti měření. Například kombinace Pirani/Penning měrka bývá často použita současně v jednom pouzdře.



Obrázek 2.5: Přehledová tabulka vakuových měrek (zdroj: [1])

Kombinované vakuové měřky zahrnují dva a více principů a mohou měřit širší rozmezí tlaků. Výstup z těchto měrek je obvykle sloučen a na straně řízení již nemáme informaci, z kterého principu měřka hodnotu posílá. Pro kalibraci je ale žádoucí o této vlastnosti vědět, neboť zanesením nečistot či opotřebením se začne obvykle odchylka měření projevovat pouze u jednoho z principů. Nelze tedy provést pouze jednoduchou lineární transformaci a měřku opakovaně kalibrovat jen přepočtem v řídicím systému.

Většina moderních vakuových měrek umožňuje komunikaci s řídicími systémy přes standardní rozhraní, jako je RS-485, Profibus, DeviceNet atd., ale analogový signál je stále hojně rozšířen z historických důvodů. K přepočtu tohoto signálu na konkrétní hodnotu tlaku je nutné znát kalibrační křivku, která vztahuje výstup měřky k odpovídající hodnotě tlaku. Tuto kalibrační křivku může výrobce dodat spolu s měrkou, nebo je možné ji získat experimentálně. Kalibrační křivka popisuje, jaké hodnoty tlaku odpovídají hodnotám výstupního signálu.

Z důvodu požadavků na rozsah a přesnost, bývá vztah mezi napětím a tlakem logaritmický. Na to je třeba myslet při návrhu PLC. Je žádoucí, aby umělo pracovat s čísly v exponenciálním tvaru, respektive s plovoucí desetinnou čárkou. Jako příklad převodu napětí na tlak uvedu přepočet od firmy Pfeiffer 2.4 [3]. V případě měřky s rozhraním RS-485 budu muset do PLC implementovat "Pfeiffer Vacuum protokol". Hodnota je pak čtena přímo v pascálech, ale opět v exponenciálním tvaru. Požadavek na plovoucí desetinnou čárku tedy zůstává a navíc je třeba PLC s konfigurovatelnou linkou RS-485. Zde uvedu základní komunikaci s měrkou:

PLC dotaz do měřky s adresou 001

```
30 30 31 30 30 37 34 30 30 32 3D 3F 31 30 30 36 0D
```

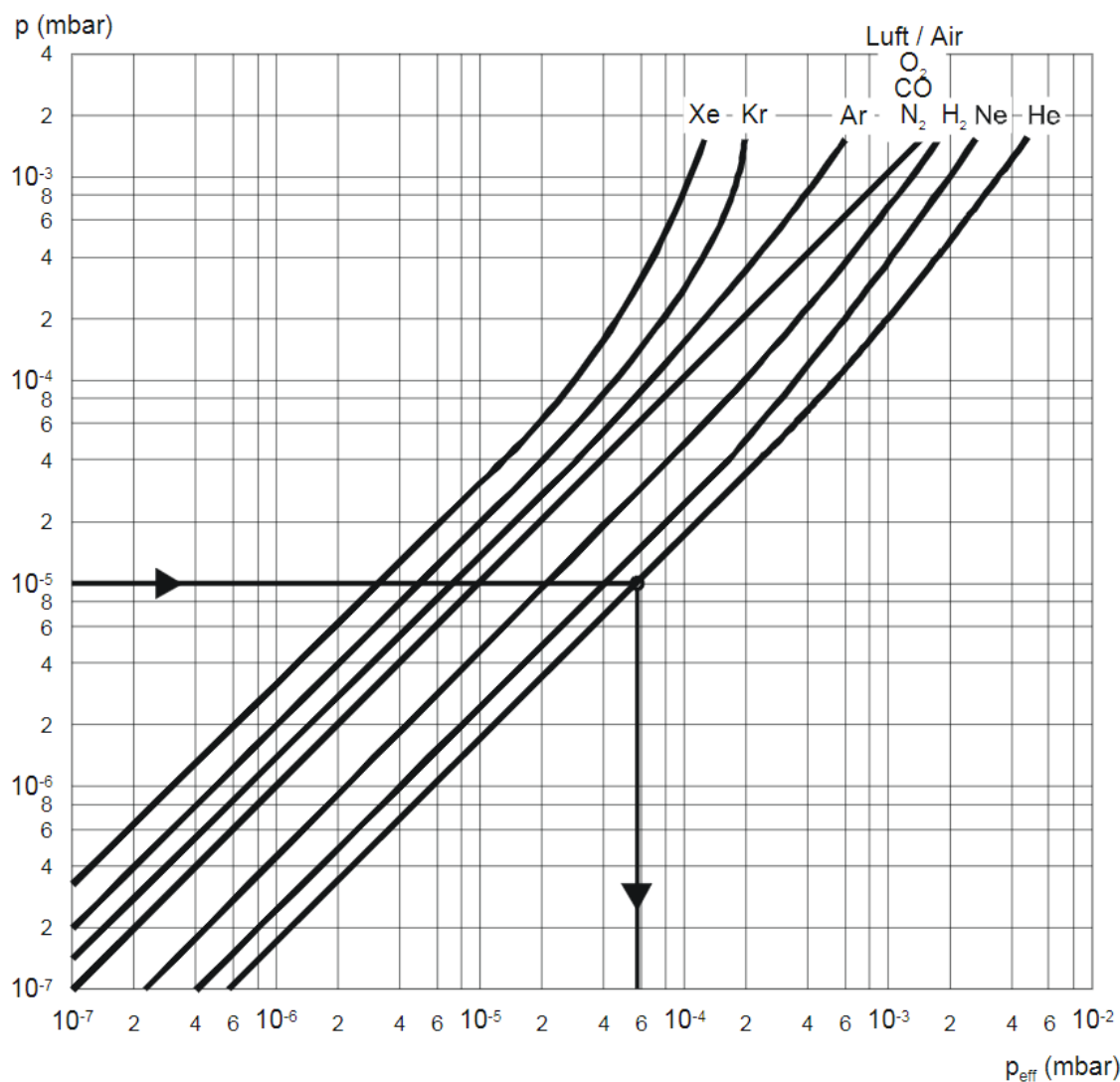
odpověď měřky RPT 200:

```
30 30 31 31 30 37 34 30 30 36 30 31 32 33 31 39 0D
```

Znaky 11-14 tvoří mantisu a je třeba ještě podělit deseti. Znaky 15 a 16 tvoří exponent po odečtení dvaceti. Tlak je tedy $12,3 \times 10^{-1} \text{ Pa}$. Detailnější popis komunikačního protokolu je uveden v manuálu [4].

$$U = 8,6 + 0,8 \cdot \log(p) \Leftrightarrow p = 10^{(1,25 \cdot U - 10,75)} \quad (2.4)$$

Dalším vlivovým faktorem pro měření je složení plynu. Měrka je obvykle nakalibrována na vzduch, který je tvořen směsí N_2 78,084%, O_2 20,946%, Ar 0,934%, CO_2 0,04% a dalších plynů. V procesu povlakování se ale téměř vždy tato směs řízeně mění připouštěním jiných plynů. Na to je dobré myslet a udávanou hodnotu vynásobit ještě odpovídajícím faktorem. Příklad tabulky koeficientů uvádím zde: 2.1



Obrázek 2.6: Indikovaný tlak (zdroj: [3])

Plyn	K faktor
Vzduch (N ₂ , O ₂ , CO)	1,0
Xe	0,4
Kr	0,5
Ar	0,8
H ₂	2,4
Ne	4,1
He	5,9

Tabulka 2.1: Převodní koeficienty pro vakuové měřky

2.2 Plazma

V polovině 19. století zavedl Jan Evangelista Purkyně termín "protoplazma" (později přejmenovaný na "plazma") pro čistou tekutinu, která vznikla odstraněním částic z krve. O půl století později, v 20. letech 20. století, Irving Langmuir použil tento termín pro směs elektronů, iontů a neutrálních částic v ionizovaném plynu. Od 50. let 20. století se v češtině používá slovo "plazma" s významem, který mu dal Langmuir a je středního rodu. Z viditelného vesmíru je více než 99% tvořeno plazmatem. Na Zemi se plazma přirozeně vyskytuje pouze v ojedinělých případech (např. blesky nebo polární záře) a uměle se vytváří v termonukleárních reakcích, laserech, fluorescenčních lampách, zobrazovací technice a také při povrchových úpravách materiálů. S růstem teploty dochází k postupné změně skupenství látek z pevného na kapalnou a dále na plynnou, přičemž v některých případech může dojít ještě k sublimaci (přeskok kapalnou fázi). Pokud teplota plynu dále stoupá, dochází k jeho ionizaci. S narůstající teplotou se zvyšuje počet ionizovaných částic vůči neutrálním částicím. Vznikající volné elektrické náboje způsobují elektrickou vodivost plynu a jeho interakci s elektromagnetickým polem. Plazma bývá někdy označováno za čtvrté skupenství hmoty, ale to není přesné, protože se nejedná o fázový přechod prvního druhu. Nelze ale ani tvrdit, že plazma je jakýkoliv ionizovaný plyn, kde alespoň jeden elektron je excitován, nebo není vázán na atom či molekulu. Toto se může dít i u běžných plynů za normálních podmínek. V současnosti se používá definice „*Plazma je kvazineutrální směs nabitých a neutrálních částic, která vykazuje kolektivní chování.*“ [5]

Kvazineutralita znamená, že počet kladných a záporných nábojů v plazmatu je vyvážený. Aby byla kvazineutralita dosažena, musí být Debyeova stínící délka mnohonásobně menší než charakteristický rozměr celého plazmatu. To znamená, že rekombinace elektronů na stěnách systému je mnohem rychlejší než rekombinace kationtů, což způsobuje, že stěny mají záporný náboj a plazma mírně kladný náboj. Díky Debyeově stínění se tato nerovnováha nešíří do celého plazmatu, ale omezuje se pouze na elektrickou dvojvrstvu, známou jako obálka (anglicky sheath), která má tloušťku několika Debyeových délek.

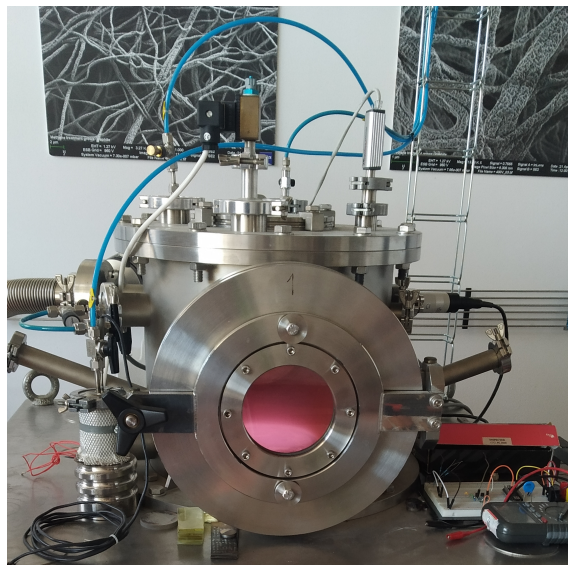
Debyeovým stíněním se rozumí schopnost plazmatu odstínit vložené elektrické potenciály tím, že jsou okamžitě po vložení obaleny částicemi s opačnými náboji.

Prostor s převahou kladného náboje tak odděluje elektrodu od vlastního objemu plazmatu. Vznikají tak elektrické vrstvy s výrazným potenciálovým spádem. [6]

V elektricky vodivém plazmatu se tedy v blízkosti nábojového zdroje vytváří elektrostatické pole, které brání nábojovému zdroji v ovlivňování plazmatu na větší vzdálenosti. To znamená, že vliv elektrod na plazma se omezuje jen na blízké okolí elektrod. Protože ionty a elektrony mají různé hmotnosti a náboje, vytvářejí se kolem elektrody rozdílné hustoty nábojů, což vede ke vzniku elektrického pole. Toto pole pak vytváří potenciálový rozdíl mezi elektrodami a v kapacitně vázané plazmatu vede k vytvoření záporného předpětí na menší elektrodě tzv. DC bias. Ten umožňuje kontrolu hustoty plazmatu v blízkosti elektrody a tím reguluje depoziční proces. Hodnota DC bias bývá obvykle regulovaná veličina pomocí výkonu RF generátoru.

Kolektivním chováním je míněno, že částice ovlivňují nejen bezprostředně nejbližší okolí, ale i vzdálenější částice. Neutrální plyn tuto vlastnost nemá, protože v něm dochází k interakcím kolizemi, při kterých převažují van der Waalsovy síly, které působí na krátké vzdálenosti. V plazmatu převažují Coulombické síly dlouhého dosahu, neboť částice mají větší hybnost a interagují současně s mnoha částicemi.

O plně ionizovaném plazmatu můžeme hovořit u hvězd, tokamaků a v epicentrech výbuchů vodíkových pum. Tam se blíží stupeň ionizace jedné. V našich podmínkách depoziční aparatury se stupeň ionizace pohybuje v rozsahu 10^{-7} až 10^{-4} , což je slabě ionizované plazma. Na obrázku 2.7 je ukázka komory, ve které je toto plazma vidět jasně zářit. Na zbarvení má vliv hustota a složení vnitřní atmosféry a intenzita jasu je ovlivněna výkonem. Ten byl v tomto případě přibližně 200 W.

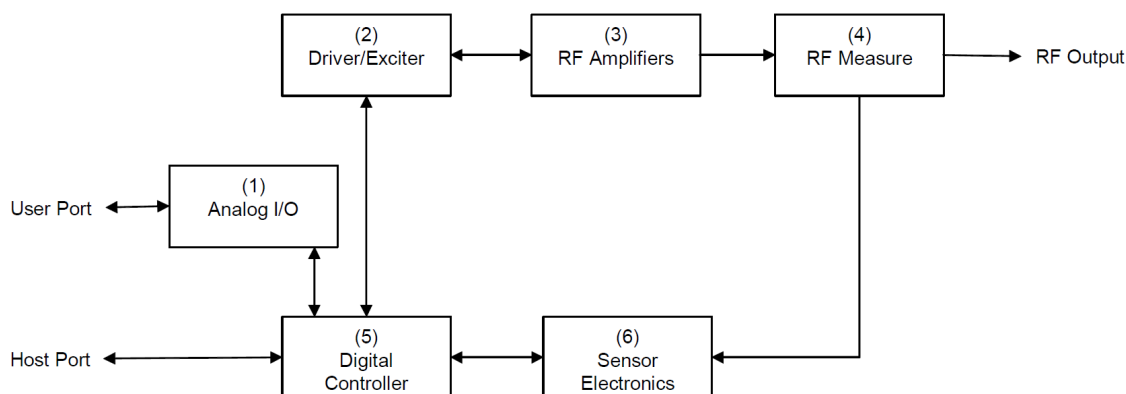


Obrázek 2.7: Plazma v depoziční komoře

2.2.1 RF generátor jako zdroj plazmatu

RF generátor je zdroj vysokofrekvenčního elektrického signálu. Jeho vyzářením do komory se vytváří elektromagnetického pole, které excituje elektrony molekul plynu

a vytváří se plazma. To bývá někdy označováno i jako doutnavý výboj. Jeho důsledkem je porušení kovalentních vazeb molekul a tím rozklad plynu na jednotlivé chemické prvky a jejich ionty. Generátor je v principu koncový stupeň výkonového radiového vysílače s oscilátorem na konstantní frekvenci, který požadovaně mění výstupní výkon. Jeho frekvence není libovolná, ale v průmyslu se používá několik vyhrazených, kvůli minimalizaci rušení (2; 4; 13,56; 27,12; 40,68; 60 MHz...). Detaily vnitřního zapojení generátoru se zabývat nebudu, protože celý generátor lze koupit jako funkční celek. Blokové schéma popisující vnitřní činnost je na obrázku 2.8.



Obrázek 2.8: RF generátor blokové schéma (zdroj: [7])

Existuje celá řada výrobců RF generátorů pro plazma procesy, jako například Advanced Energy, MKS Instruments, ENI Power Systems, Spellman High Voltage Electronics Corp. a další. Tyto generátory se liší výkonem, frekvencí a dalšími parametry, které se volí v závislosti na konkrétním použití a požadovaných vlastnostech. V rámci této práce se budeme zabývat pouze typem Cesar 1312 (13,56 MHz; 1,2kW) od Advanced Energy 2.9, 2.10. Výhodou je, že v této velikosti má generátor ještě jednofázové napájení flexo šňůrou na 230 VAC a chlazení pouze vzduchem. Vyšší výkony již vyžadují třífázové napájení a přívod chladicí vody.

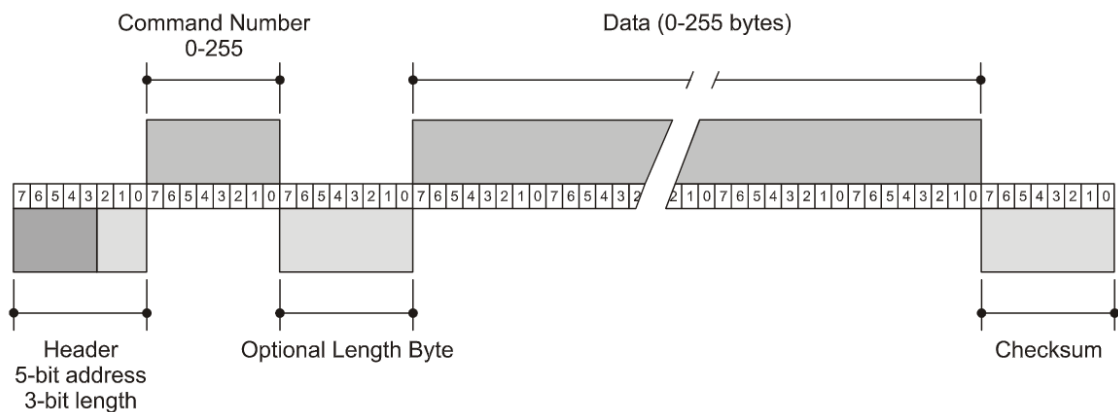


Obrázek 2.9: RF generátor Cesar 1312 (zdroj: [7])

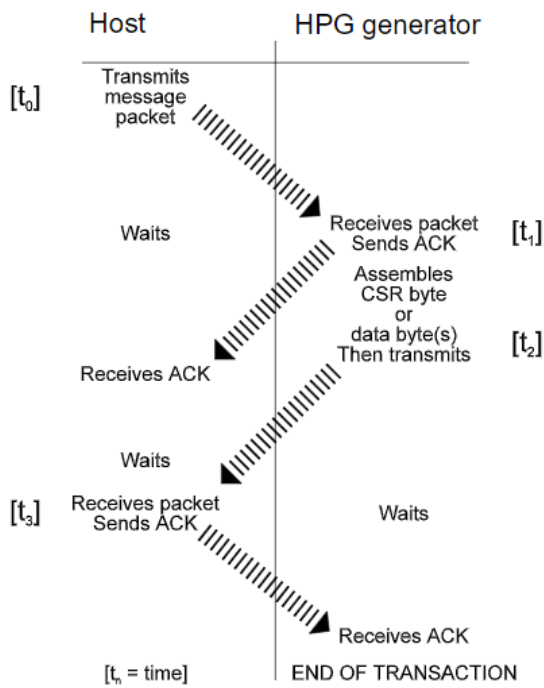


Obrázek 2.10: RF generátor Cesar 1312 konektory (zdroj: [7])

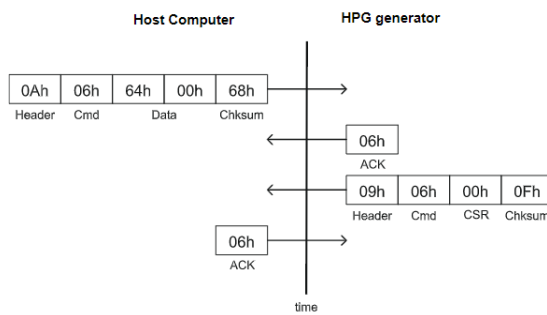
Z hlediska zapojení je důležité především napájení, RF Output, Host Port a případně User Port. Generátor má pouze klasický RS-232 se standardní 9-pin samicí, takže bude potřeba použít nějaký převodník na odolnější RS-4xx, nebo ethernet. Tím se zvýší odolnost proti rušení a bude jednodušší připojení k PLC. K vlastní komunikaci pak zdroj bohužel nepoužívá žádný standard, ale má vlastní protokol AE BUS 2.11 2.12 2.13, který bude třeba implementovat do PLC. Ze všech zařízení je nejvíce variabilní, neboť se přepínají režimy řízení a čte se a zapisuje více různých hodnot. Předpokládám, že jeho implementace bude ze všech komunikací časově nejnáročnější. Pro režim regulace napětí bias, je zapotřebí do generátoru přivést informaci o tomto napětí. Jak je patrné z 2.14, je třeba záporné napětí z elektrody pomocí převodníku upravit na signál 0 až 10V. Tomu se budu podrobněji věnovat v kapitole Přizpůsobovací jednotky.



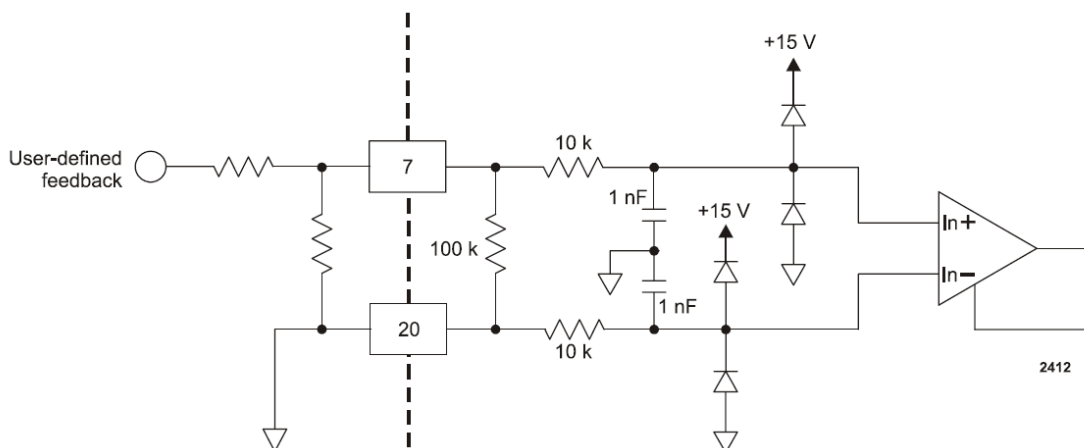
Obrázek 2.11: Formát komunikace AE BUS (zdroj: [7])



Obrázek 2.12: Transakce AE BUS (zdroj: [7])



Obrázek 2.13: Příklad komunikace AE BUS (zdroj: [7])



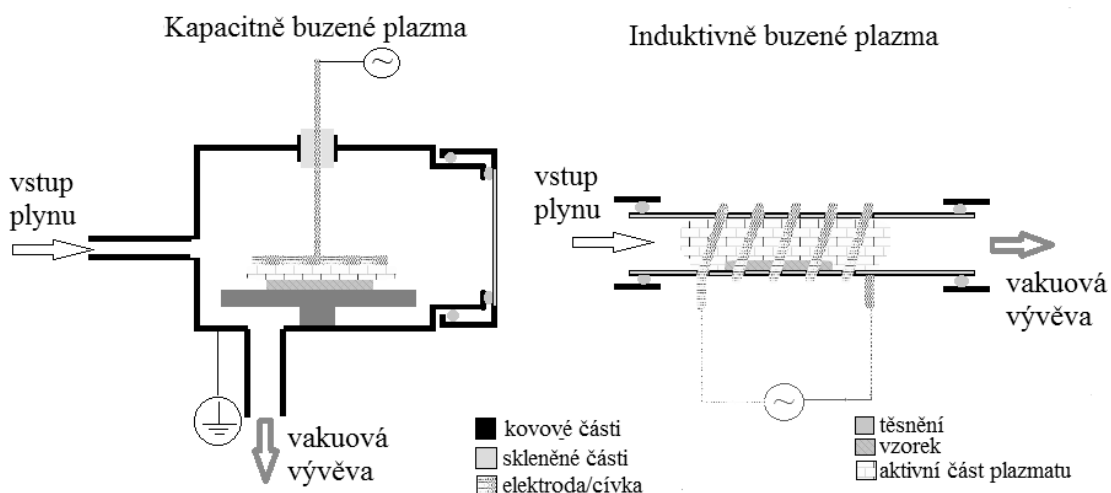
Obrázek 2.14: RF generátor a zpětná vazba DC bias (zdroj: [7])

2.2.2 Princip vytváření plazmatu

Podobně jako vysílací radiová anténa slouží pro vyzáření energie v komoře buď depoziční elektrody, nebo cívka. V případě elektrod mluvíme o kapacitně vázaném plazmatu, neboť elektrody tvoří kondenzátor. Jako druhá elektroda může být použit plášť celé komory. V případě indukčně vázaného plazmatu se obvykle používá cívka z měděného drátu. Postačí několik závitů dostatečného průřezu, která se z praktických důvodů umísťuje vně komory. Aby elektromagnetické pole dobře pronikalo do vnitřní části komory, používá se obvykle jako materiál skleněný válec. Sklo má vysokou dielektrickou konstantu a nízkou vodivost, což umožňuje vytvářet vysokofrekvenční elektromagnetické pole v blízkosti cívky s minimálními ztrátami na vedení. Sklo také neovlivňuje magnetické pole v oblasti plazmatu a umožňuje soustředit magnetické pole tam, kde je to žádoucí, tedy v oblasti plazmatu. Je však třeba mít na paměti, že sklo může být citlivé na tepelné šoky, a proto musí být při použití jako materiál pro cívku pečlivě zpracováno a instalováno. Válec musí být také dostatečně silný, aby unesl atmosférický tlak a aby byl schopen udržet tvar i při vysokých teplotách vytvářených plazmatem. Sklo je sice pevný materiál, ale může být křehké a náchylné k prasknutí, zejména při rychlých změnách teploty a tlaku. Proto je důležité zvolit dostatečně silný a odolný skleněný válec pro cívku, který dokáže snést podmínky vytvářené v oblasti plazmatu a nemohlo dojít k jeho implozi. Schéma těchto dvou principů je na obrázku 2.15.

Indukčně vázané plazma (ICP) využívá magnetické pole ke vzniku plazmatu. Cívka která generuje vysokofrekvenční magnetické pole indukuje elektrické proudy v plynu, a tím způsobuje ionizaci plynu a vznik plazmatu. ICP je typicky používána pro výzkumné účely a pro aplikace, jako jsou například povlakování materiálů.

Kapacitně vázané plazma (CCP) využívá elektrického pole ke vzniku plazmatu. V komoře jsou umístěny dvě elektrody (jednu může tvořit vlastní plášť komory), mezi kterými se vytvoří elektrické pole. Toto pole vytváří proudy v plynu, což způsobuje ionizaci a vznik plazmatu. CCP je často používána pro průmyslové aplikace, jako jsou například leptání desek pro elektroniku. Jistou výhodou CCP představu-



Obrázek 2.15: Kapacitní a induktivní RF buzení (zdroj: [8])

jí elektrody. Využívá se výše popsaného efektu Debyeového stínění, případně lze i přidat vysokonapěťový DC zdroj. Tzv. biasování elektrod znamená připojení stejnosměrného napětí na elektrody, což vytváří elektrické pole, které ovlivňuje pohyb nabitých částic v plazmatu. To může vést například k urychlení iontů směrem k povrch substrátu a zkrácení času depozice. Dále lze pomocí bias ovlivnit vlastnosti vytvářeného povlaku, jako je adheze, tvrdost, chemická odolnost a další.

Hlavní rozdíl mezi ICP a CCP spočívá ve způsobu, jakým se vytváří magnetické nebo elektrické pole, které slouží k ionizaci plynu a tvorbě plazmatu. ICP využívá magnetické pole generované cívkou, zatímco CCP vytváří elektrické pole mezi dvěma elektrodami. Obecně platí, že hustota plazmatu v ICP bývá vyšší než v CCP, protože magnetické pole v ICP dokáže lépe udržet plazma v určité oblasti a omezit tak rozptyl plazmatu, zatímco elektrické pole v CCP může být náchylnější k rozptylu plazmatu, zejména u vysokých frekvencí a nízkých tlaků. Nicméně, hustota plazmatu v obou případech závisí na mnoha faktorech, jako jsou typ plynu, frekvence a výkon použitého zdroje, geometrie komory a další.

Oba typy plazmatu využívají k dosažení požadovaných vlastností plasma-enhanced procesy a mohou být kombinovány pro dosažení synergických efektů.

2.2.3 Přizpůsobovací jednotka

Jak již bylo zmíněno, mezi RF generátorem a depoziční komorou musí být vřazena přizpůsobovací jednotka RF Matching Network. Slouží především k zlepšení přenosu výkonu mezi těmito dvěma prvky. Úkolem přizpůsobovací jednotky je optimalizovat přenos energie tak, aby bylo dosaženo co největší účinnosti a aby se minimalizovala reflexe signálu zpět k RF generátoru. Na rozdíl od vysílacích antén musí být tento proces dynamický v návaznosti na neustále se měnící podmínky v komoře.

Automatická přizpůsobovací jednotka mění impedanci na základě výpočtu a měření, aby se zajistilo co nejlepší přizpůsobení k zátěži. Je umístěna mezi RF generátorem a depoziční komorou a je žádoucí, aby vedení mezi jednotkou a zátěží bylo co

nejkratší. Impedance celé soustavy zahrnuje odpor, indukčnost a kapacitu, které se mohou lišit v závislosti na materiálu a geometrii. Především se ale mění prostředí a podmínky v depoziční komoře.

Pro výpočet impedance vedení se používají různé matematické modely a nástroje, jako je například Smithův diagram. Smithův diagram umožňuje vizualizaci impedance vedení v komplexní rovině a umožňuje tak porovnání s požadovanou impedancí.

Dalšími faktory, které mohou ovlivnit účinnost přenosu energie, jsou frekvence signálu, délka vedení, typ konektorů a další. Proto je důležité provést důkladnou analýzu a výpočty impedance, aby bylo dosaženo co nejlepšího výkonu.

Smithův diagram je grafický nástroj, který se používá k analýze elektrických obvodů a anténových systémů. Byl vyvinut americkým elektroinženýrem Phillipem H. Smithem v roce 1939. Diagram umožňuje snadno vizualizovat impedanční a admitanční charakteristiky obvodu nebo antény a také umožňuje jednoduše nalézt optimální impedanční přizpůsobení pro maximalizaci přenosu výkonu signálu.

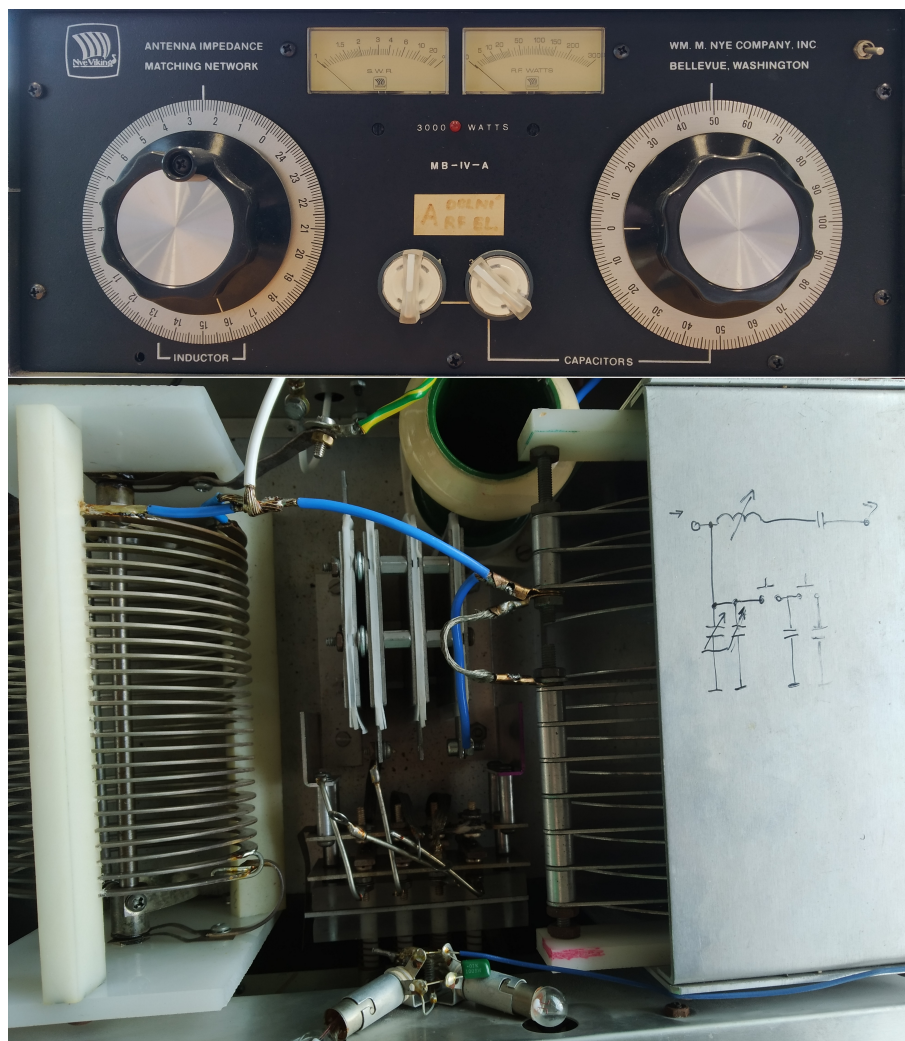
Smithův diagram se skládá z jednotkové kružnice, která představuje impedanční rovinu, a úsečky spojující střed kružnice s jejím okrajem, což se nazývá reálná osa. Na kružnici jsou vyobrazeny konstantní odporové a reaktanční kružnice, které reprezentují hodnoty impedance nebo admitance v obvodu. Konkrétně odporové kružnice jsou kružnice se středem v reálné ose a reaktanční kružnice jsou kružnice s nulovým středem.

Smithův diagram umožňuje vizualizovat vztahy mezi různými impedančními a admitančními charakteristikami, jako je odpor, reaktance, impedance a admitance. Například na Smithově diagramu je často zobrazena charakteristická impedance antény, která je obvykle označena jako 50Ω . Impedance a admitance různých anténových systémů mohou být poté zobrazeny jako bod na Smithově diagramu.

Výhodou Smithova diagramu je, že umožňuje snadno nalézt optimální impedanční přizpůsobení pro maximalizaci výkonu přenosu signálu. Tento bod je označen jako bod maximálního přenosu nebo bod maximálního výkonu a nachází se na kružnici s poloměrem 1, která prochází bodem, který reprezentuje charakteristickou impedanci antény.

Celkově lze říci, že Smithův diagram je užitečný nástroj pro analýzu elektrických obvodů a anténových systémů a umožňuje snadno vizualizovat impedanční a admitanční charakteristiky a nalézt optimální impedanční přizpůsobení pro maximalizaci výkonu přenosu signálu.

Menší manuální přizpůsobovací jednotky (do výkonu maximálně jednotek kW) mají obvykle laditelnou indukčnost i kapacitu. Takovéto přístroje se těšili v minulosti značné oblibě mezi radioamatéry, kteří řešili problém s anténním přizpůsobením a snažili se minimalizovat stojaté vlnění SWR, aby docílili maximálního vysílacího výkonu. Na obrázku 2.16 je ukázka takovéto jednotky od firmy NYE COMPANY, Inc. V původním zapojení jednotka neobsahovala oddělovací kondenzátor, protože pro potřeby anténního systému není zapotřebí. Obvod byl tvořen pouze paralelní laditelnou kapacitou a do série zapojenou laditelnou indukci.



Obrázek 2.16: Manuální přizpůsobovací jednotka

2.2.4 Automatická přizpůsobovací jednotka

Přizpůsobovací jednotky určené přímo pro RF generátory vakuové techniky pracují na stejném principu, jen mají drobné odlišnosti. Ty vyplývají z podstaty, že neppracují ve frekvenčním pásmu ale s konstantním kmitočtem. Dále kvůli bias potřebují galvanické oddělení DC složky a především musí co nejrychleji reagovat na neustále se měnící výkon a podmínky. Laditelná indukčnost se problematicky realizuje pro velké výkony, proto bývá nahrazena druhou laditelnou kapacitou. Přes odpor řádově jednotky $M\Omega$ je měřeno záporné napětí bias na elektrodě. Pomocí této hodnoty se řídí automatická regulace, jak vysvětlím později.

Například firma Advanced Energy vyrábí přizpůsobovací jednotky řady Navio. Jde o kompaktní moduly v provedení Plug-and-play, které udávají velmi rychlé přeladění (dle manuálu typicky 2-3s). Vnitřní provedení takovéto jednotky je na obrázku 2.17. Pod ventilátorem jsou dva vakuové ladící kondenzátory v sériovém a paralelním zapojení. V manuálu bývají označeny jako C_L (Load) a C_T (Tune). Pro přizpůsobování je třeba regulace obou, což činí problematiku výpočetně zajímavou.

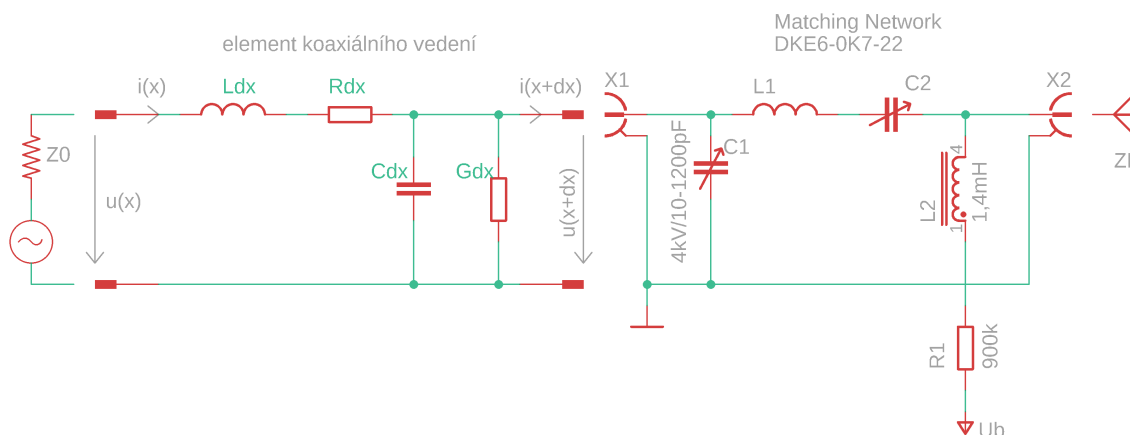


Obrázek 2.17: Automatická přizpůsobovací jednotka

Přizpůsobovací jednotky obvykle nemívají žádné uživatelské ovládací prvky jako displej a tlačítka. Algoritmus řízení bývá integrován v RF generátoru a ten řídí přizpůsobovací jednotku pomocí "Matching interface". Přizpůsobovací jednotka posílá generátoru aktuální polohu kondenzátorů a hodnotu napětí bias. Na generátoru lze volit mezi manuálním a automatickým řízením, které provádí generátor digitálními výstupy (vpřed / vzad).

K dispozici je manuální přizpůsobovací jednotku DKE6-0K7-22 od P.P.U.H. "Mi-ziak" s vodním chlazením, ke které navrhne automatické řízení. Kompletní schéma problematiky, kterou zde řešíme, je nakresleno ve schématu 2.18. Frekvence a impedanci vedení je konstantní. Jediné co se mění je výkon a impedance zátěže. K té se musí neustále dolaďovat přizpůsobovací jednotka.

Impedanci elektrického obvodu lze spočítat podle vzorce (2.5). V případě, že



Obrázek 2.18: Schéma Matching Network

zanedbám reálnou složku $Rdx = Gdx = 0$, mohu výraz zjednodušit. Impedance již nebude komplexní, ani frekvenčně závislá. Vzhledem k tomu, že délka koaxiálního vedení bude mezi generátorem a komorou přibližně $1m$, bude odchylka zanedbatelná.

$$Z_x = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.5)$$

Impedance generátoru je dle manuálu 50Ω . Na tuto hodnotu bude třeba volit i koaxiální vedení a přizpůsobovat k ní zátěž. V této práci se zabýváme případem kapacitně vázaného plazmatu, neboť řešíme řízení vakuové komory s válcovou koncentrickou elektrodou. Hlavní proměnnou složkou bude tedy kapacita, která se bude měnit s permitivitou prostředí. Tento vztah lze odvodit pomocí Gaussovy věty pro elektrostatiku 2.6

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \int_V \rho(\vec{r}) dV = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (2.6)$$

kde

S je plocha elektrody

\vec{E} je vektorové elektrostatické pole

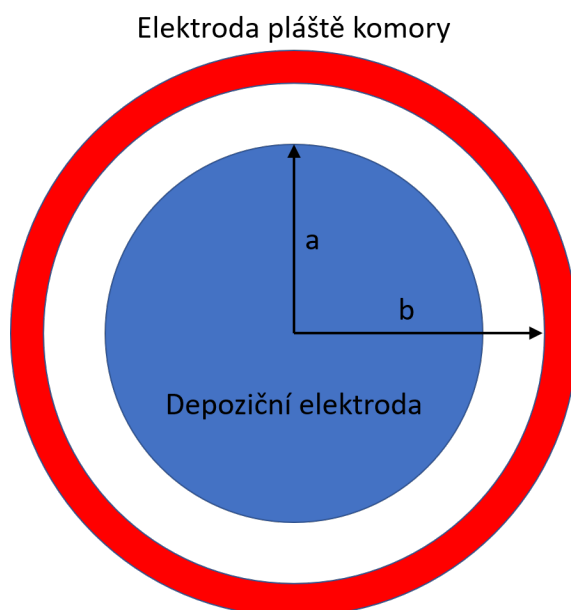
$\rho(\vec{r})$ je hustota náboje v prostoru, kterou integrujeme

ε_0 je permitivita vakua

ε_r je relativní permitivita dielektrického prostředí v komoře

Q značí celkový vnitřní náboj uzavřené plochy S

Depoziční oblast je tvořena vnitřní elektrodou válcového kondenzátoru. Jeho rozměry jsou určeny poloměry elektrod a a b výškou L . Předpokládejme, že elektrody jsou ideální vodiče s nekonečnou vodivostí a že náboj se na nich rovnoměrně rozloží. Schématicky nakresleno na 2.19.



Obrázek 2.19: Geometrie depoziční elektrody (pohled shora)

Kapacitu válcového kondenzátoru C určíme jako podíl náboje Q na stěnách válců a napětí U mezi nimi. Velikost napětí mezi válci je rovna práci, kterou je třeba vykonat pro přenesení jednotkového náboje z jednoho válce na druhý. Náboj Q je součin plochy S a Kapacita kondenzátoru je tedy dána vztahem 2.7

$$C = \frac{Q}{U} = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r \frac{L}{\ln(\frac{b}{a})} \quad (2.7)$$

2.3 Regulace připouštění plynů

Při komplexním návrhu řízení je třeba myslet na regulaci připouštěných plynů a dalších prekurzorů, bez kterých se žádná vakuová depozice neobejde. Plyny jsou přiváděny buď přímo z tlakové láhve přes redukční a škrtecí ventily, nebo se zplyňují kapalně prekurzory. Zplyňování může probíhat samovolně v důsledku snížení tlaku, případně může být podpořeno zahříváním prekurzoru. V obou případech je zapotřebí připouštěné množství za časovou jednotku regulovat. Nejsnadnějším způsobem je hmotnostní nebo termální regulátor MFC, který bývá nakalibrován na konkrétní plyn, nebo směs plynů. Regulátor se samozřejmě může použít i pro jiný plyn, ale je třeba rozsah regulační hodnoty přepočítat správným konverzním faktorem, který udává vztah mezi nakalibrovaným a použitým plynem.

Tento přepočet lze získat buď od výrobce MFC, nebo lze vypočítat z hustoty plynu za standardních podmínek (1 atm, 25°C) 2.2. Podílem hustot dostaneme tabulku bezrozměrných koeficientů přepočtu 2.3. Převodové faktory jsou platné za předpokladu konstantní teploty a tlaku.

plyn	ρ (kg/m^3)
Ar	1,784
O ₂	1,308
N ₂	1,250
H ₂	0,090
CH ₄	0,717

Tabulka 2.2: hustoty plynů (při 1 atm, 25°C)

	Ar	O ₂	N ₂	H ₂	CH ₄
Ar	1,000	0,733	0,701	0,050	0,402
O ₂	1,364	1,000	0,956	0,069	0,548
N ₂	1,427	1,046	1,000	0,072	0,574
H ₂	19,822	14,533	13,889	1,000	7,967
CH ₄	2,488	1,824	1,743	0,126	1,000

Tabulka 2.3: faktory přepočtu sccm

Takže máme-li například MFC kalibrovaný na Ar, ale chceme s ním regulovat N₂, z tabulky odečteme přepočtový faktor 0,701. Zobrazovanou hodnotu musíme tedy pronásobit tímto faktorem a požadovanou hodnotu naopak podělit, abychom zajistili správný průtok plynu a jeho zobrazení.

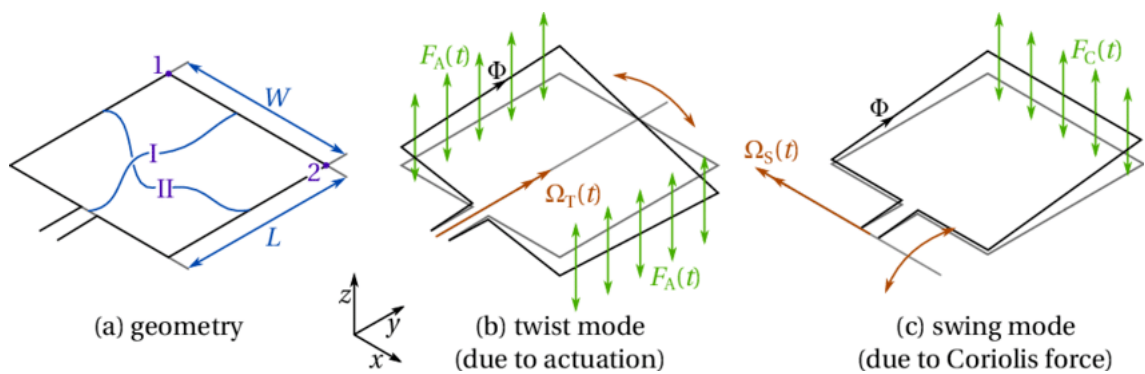
MFC má typicky tři hlavní části: detektor průtoku, ventil a elektroniku řízení. Při nastavení požadovaného toku plynu elektronika řídí ventil tak, aby udržoval požadovanou hodnotu průtoku plynu měřenou detektorem.

MFC měření funguje obvykle na principu detekce změny hmotnosti plynu, který prochází definovanou trubicí. Pokud se průtok plynu změní, snímač detekuje změnu hmotnosti a elektronika reaguje ovládním ventilu, aby udržela požadovanou hodnotu. Někdy se používá složitější princip měření, který je založen např. na změně setrvačného momentu plynu. Plyn proudí vibrující trubicí, na které se měří Coriolisova síla. Její velikost je přímo úměrná množství plynu. Na obrázku 2.20 je obdélníková trubice, která při rozkmitání silou F_A vyvolá moment síly Ω_T . Průtok plynu pak Coriolisovou silou způsobí rozkmitání F_C .

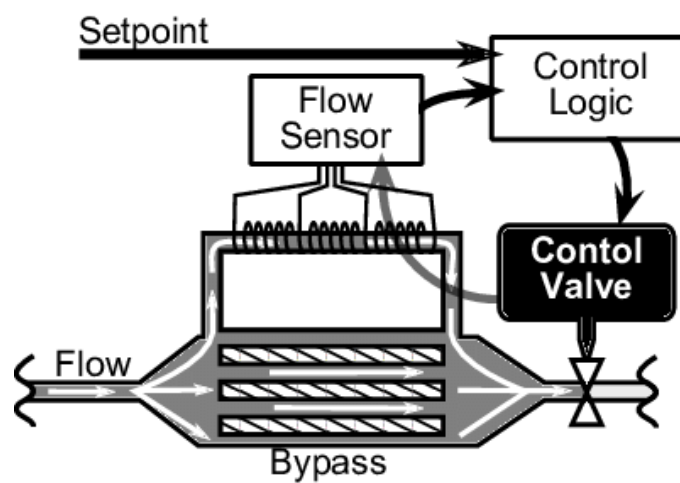
Další používaný princip MFC je teplotní. Ten obvykle vyhodnocuje změnu teploty plynu mezi dvěma body, za předpokladu dodávání konstantní tepelné energie mezi nimi. Princip funkce je na obrázku 2.22. Změna průtoku plynu změní výstupní teplotu a z poměru teplot lze určit množství protékajícího plynu.

Na základě měření MFC vypočítá aktuální průtok plynu a upraví polohu proporcionálního ventilu tak, aby se skutečný průtok přizpůsobil požadovanému.

Existují ještě další principy měření průtoku, například na základě změny tlaku, jako je rotometr. Ten měří tlak pomocí unášeného ukazatele v rozšiřující se trubici. Nicméně tato metoda je vhodná na větší průtoky a pro vakuovou depozici se nepoužívá. Měření na základě hmotnosti je většinou přesnější a spolehlivější.



Obrázek 2.20: MFC měření pomocí Coriolisovy síly (zdroj: [9])



Obrázek 2.21: Blokové schéma teplotního MFC (zdroj: [10])

MFC umožňuje přesné a konzistentní řízení průtoku plynu, což je důležité pro dosažení přesné a opakovatelné výroby vrstev v depozičních procesech. Pro zaručení přesnosti měření je třeba při montáži dodržet výrobcem určenou polohu MFC.

Existuje celá řada výrobců kvalitních hmotnostních regulátorů pro vakuovou depoziční. Zde je seznam několika používaných výrobců:

- Brooks Instrument (typ SLA)
- MKS Instruments (model 1179A)
- Aalborg (typ GFC)
- Bronkhorst High-Tech (model F-201CV)
- Teledyne Hastings Instruments (model HFC-D-303)
- Sierra Instruments (model SmartTrak 100)

U hmotnostních regulátorů je jako standardizovaná měrná jednotka průtoku používáno sccm. Definice sccm je následující: *Průtok jednoho standardního kubického centimetru za minutu (sccm) je průtok plynu při teplotě 0 °C, tlaku 1 atm a relativní vlhkosti 0%.* Tato definice umožňuje porovnávat průtoky různých plynů při různých teplotách a tlacích, protože všechny jsou převedeny na stejné standardní podmínky.

Z hlediska elektronického ovládání dodávají výrobci MFC buď analogové provedení, kde se průtok reguluje signálem 0 až 5V (4 až 20 mA), nebo dražší s digitální komunikací, např. s RS-485. U analogového ovládání je třeba myslet i na zpětnou vazbu. Například požadavek na příliš nízký průtok (typicky < 10% jmenovitého) nemusí být schopen realizovat. Případně může nastat i jiný problém a PLC potřebuje znát, jaká je skutečnost připouštěného plynu. Mírně nestandardní je i napájení, neboť tyto analogové MFC vyžadují obvykle symetrické napájení ± 15 V. Na to je třeba v návrhu rozvaděče pamatovat.

2.4 Magnetron

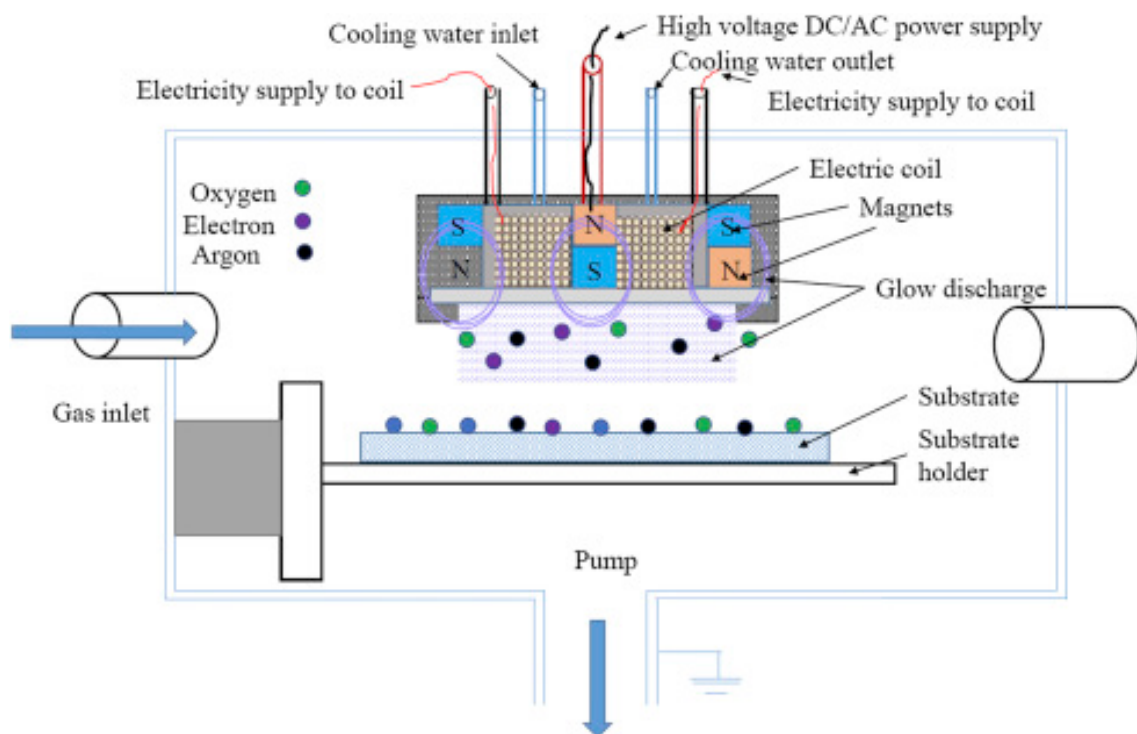
V oblasti vakuové depoziční se magnetron poprvé začal používat v 70. letech, kdy byly vyvinuty magnetronové zdroje pro naprašování tenkých vrstev materiálů na substráty. Jejich hlavní výhodou je schopnost pracovat s širokou škálou materiálů. Díky vysokému výkonu a účinnosti magnetronů se staly velmi populární v průmyslu vakuové depoziční a jsou široce používány dodnes.

Magnetron pro naprašování je speciální elektronka, jejíž katoda je tvořena tzv. targetem z materiálu, který se odprašuje za pomoci iontů pracovního plynu v komoře. Na rozdíl od běžné elektronky zde není žádné katodové žhavení, ale soustava permanentních magnetů. Princip je na obrázku 2.22. Přivedené vysoké napětí způsobuje emisi elektronů, jejichž dráhy jsou díky magnetickému poli zakřiveny. Pro elektricky méně vodivé materiály se používá k buzení RF. Elektrony kroužící po spirálách vytvářejí vysokofrekvenční elektromagnetické pole. To stejně jako v případě RF generátoru vyvolává ionizaci pracovního plynu, vytváří plazma, jehož ionty jsou

přitahovány ke katodě. V případě inertního plynu, jakým je například argon, nedochází k chemickým vazbám. Ionty pouze vyrážejí atomy materiálu targetu, které se následně deponují na substrát. Proto hovoříme o fyzikálním principu depozice PVD.

Jelikož se přibližně 70% dodané energie mění na teplo a vyšší rychlost naprašování vyžaduje větší energii, je zapotřebí katodu a target aktivně chladit. Obvykle se používá vodní chlazení, které protéká vyfrézovanými otvory v katodě. Nutné příslušenství magnetronu je dále ovládaná clona, která umožní zakrýt a odstínit substrát. Toho se využívá před náběhem magnetronu do pracovní oblasti a při vytváření multivrstev pomocí více magnetronů.

Z hlediska konstrukce magnetronu se tedy nejedná o nikterak složité zařízení, důležitá je pouze výrobní přesnost a volba správných materiálů.



Obrázek 2.22: Mechanismus magnetronového naprašování (zdroj: [11])

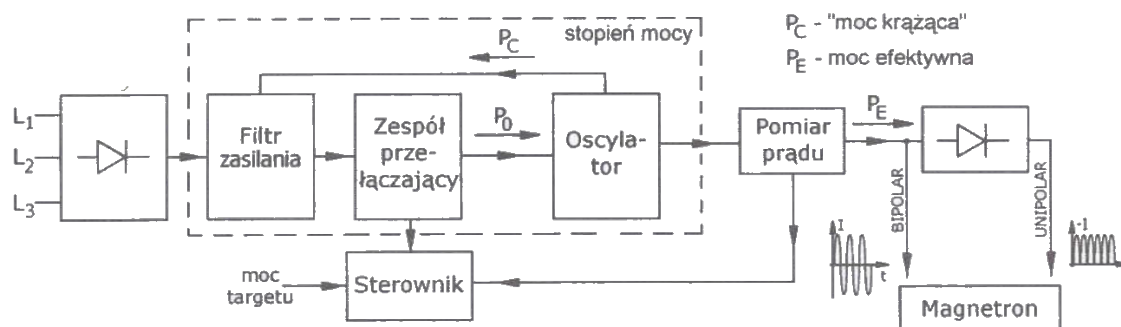
2.4.1 Generátor pro řízení magnetronu

K řízení magnetronů nelze použít běžný stejnosměrný zdroj napětí, jak je chápán v elektrotechnice. Používá se speciální generátor, jehož funkce je poměrně složitá. Pro zapálení a udržení výboje musí generátor posílat opakovaně různé balíky napěťových pulzů a měnit jejich hustotu a amplitudu na základě zpětné vazby z měření proudu a napětí. Obecně se generátor musí umět přizpůsobit široké oblasti pracovních podmínek, které kromě tlaku a složení plynu ovlivňuje ještě povrch targetu. Během reaktivního naprašování dochází například k pokrytí jeho povrchu vrstvou vytvořenou z atomů reaktivních plynů a ta brání emisi elektronů a tlumí výboj. Hovoříme o tzv. otrávení targetu. Řízení generátoru se musí umět tomuto stavu

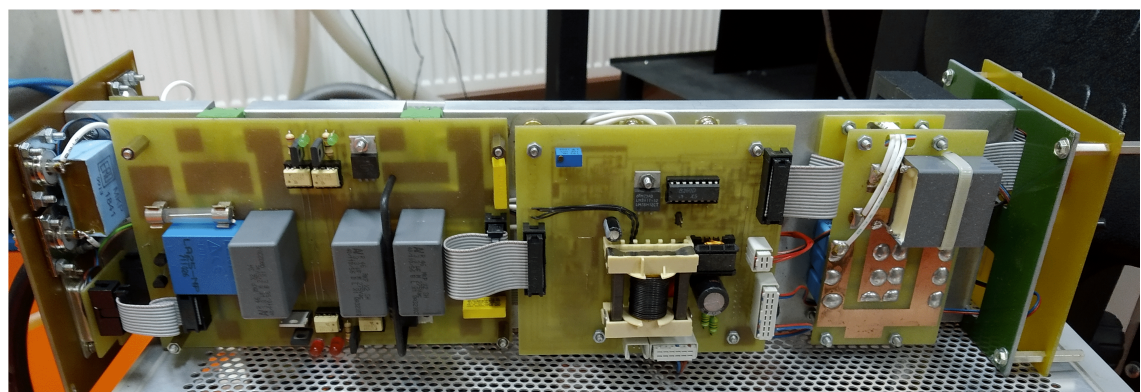
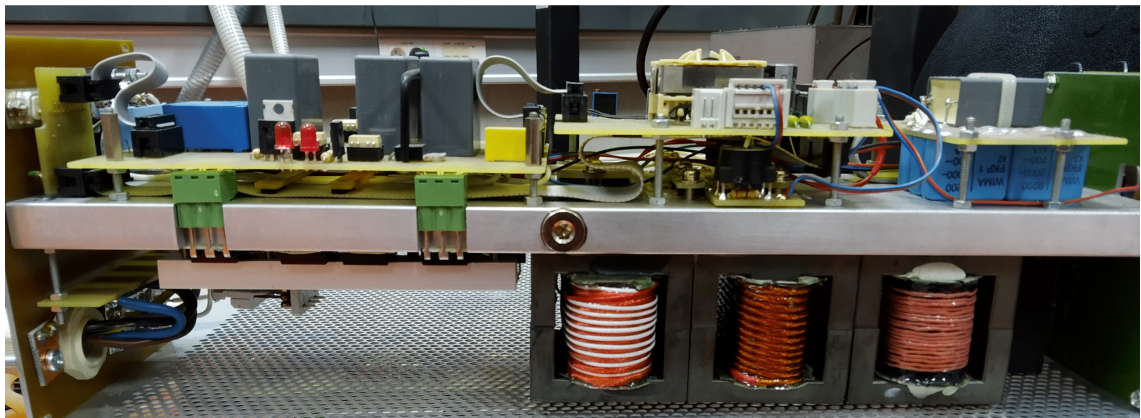
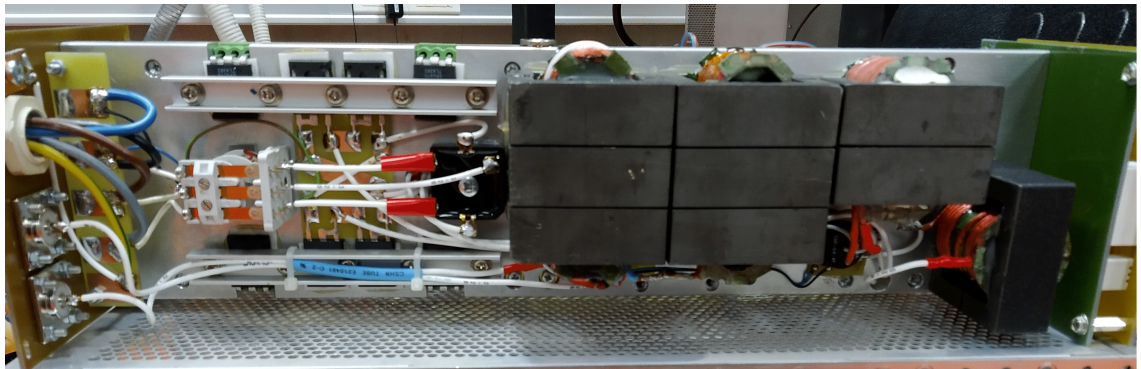
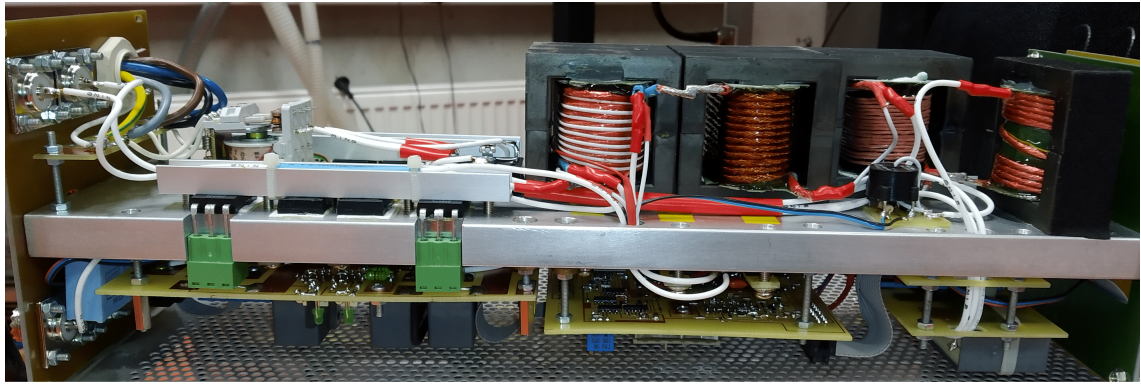
vyhnout a pomocí zpětné vazby udržovat maximální efektivní výkon magnetronu před hranicí otravy.

Blokové schéma generátoru, jehož řízením se budu zabývat je na obrázku 2.23. Regulace výkonu se provádí pomocí analogového napětí 0-2V a pomocí dvou analogových výstupů stejných napěťových úrovní vrací generátor hodnotu činného a cirkulačního výkonu. Z důvodů nízkých napěťových úrovní a možného rušení bude žádoucí navrhnout řídicí desku, která bude umístěna co nejbližší generátoru a bude s PLC komunikovat pouze digitálně.

Otevřený 10kW generátor a jeho vnitřní provedení je na obrázku obrázku 2.24.



Obrázek 2.23: Blokové schéma magnetronového generátoru DORA (zdroj: [12])

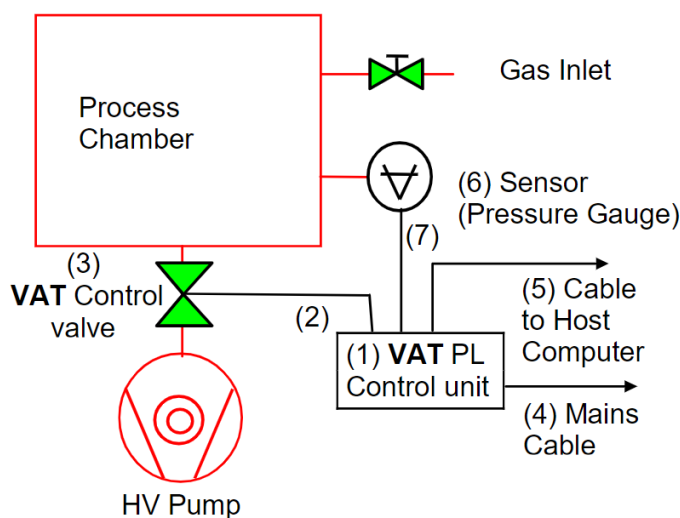


Obrázek 2.24: Otevřený generátor Dora 10kW

3 Praktická část

3.1 Regulace Vakua

Nejprve se zaměřím na procesy, kde stačí použití rotační, případně Rootsovy vývěvy. První myšlenkou bylo použít frekvenční měnič pro regulaci otáček vývěvy a pomocí PID regulace udržovat požadovaný tlak. Jelikož regulace otáček asynchronním motorem je možná pouze v omezeném rozsahu (15-70 Hz) a ve vývěvě jsou velké momenty setrvačnosti, které by bránily rychlé změně otáček, ukázala se tato metoda pro rychlou regulaci jako nevhodná. Řízení Rootsovy vývěvy frekvenčním měničem je ale i přes to výhodné. Otáčky se nastavují dle konkrétních podmínek tak, aby nebyly vyšší, než je nutné pro pohodlné dosažení požadovaného vakua. Pro rychlé odčerpání se použijí maximální otáčky a po dosažení se změny na pracovní hodnotu.



Obrázek 3.1: Blokové schéma regulátoru VAT

Pro rychlou regulaci byly zvažovány další možnosti. Jako velmi zajímavá se jeví ventilová přívěra v sacím potrubí, která se vřazuje mezi vývěvu a komoru. Řídící PLC dokáže změnou světlosti sacího potrubí velmi rychle regulovat sací výkon a tím udržovat požadovaný tlak v komoře. Princip a blokové schéma je na obrázku 3.1. V našem případě nebude třeba osazovat senzor (6) s kabelem (7). Tlakový snímač bude zaveden do nadřazeného PLC, které bude řídit celý proces a do regulátoru bude posílat pouze požadovanou polohu.

K dispozici je starší řídicí jednotka VAT PM-3, která má pouze historické

☐ Communication Protocol Type	Set communication protocol type.
Communication Protocol Type	Non-procedural
☐ Advanced Settings	Set detailed setting.
Data Length	7bit
Parity Bit	Even
Stop Bit	1bit
Baud Rate	4,800bps
Header	Not Added
Header Setting Value	02000000
Terminator	Not Added
Terminator Setting Value	03000000
Control Mode (RS - 232C)	No Control Line
Control Mode (RS - 485)	Half Duplex Bi-directional Communication
Sum Check Code	Not Added
Control Procedure	Format 4 (CR, LF Added)

Obrázek 3.2: Konfigurace sériové komunikace v PLC

komunikační rozhraní RS-232 s uvnitř hardwareově nastavenou rychlostí 4800 bps. PLC bylo třeba dovybavit převodníkem RS232/RS485, ale pro požadovaný účel regulace je tento princip komunikace zcela postačující. Celá konfigurace PLC je na obrázku 3.3. Poloha klapky se řídí vzdáleně jednoduchým příkazem v rozsahu 0-1000, jak je uvedeno v dokumentaci:

R:<6-character value><CR><LF>

PLC nejprve zajistí plné otevření klapky na začátku procesu, kdy je třeba co nejrychleji odčerpát z pracovního tlaku. To provede vysláním následujícího příkazu:

```
52 3A 30 30 31 30 30 0D 0A
```

jednotka odpovídá:

```
52 3A 0D 0A
```

Dle dokumentace existuje několik dalších příkazů pro čtení polohy, jako plné otevření nebo zavření, ale v tomto případě postačí tento jediný typ telegramu.

Z praktických důvodů je výhodné systém nejprve odčerpát pod pracovní tlak a teprve následně zapnout PID regulaci klapky a začít připouštět pracovní plyny. Tím zajistíme lepší odčerpání nežádoucích zbytkových plynů, které se uvolňují z povrchů o to více, čím je hlubší vakuum.

3.1.1 Konfigurace systému odsávání

Před vývěvy je nezbytné umístit uzavírací elektroventil v provedení "Normally closed" (bez napětí v uzavřeném stavu). Jeho funkce je velmi důležitá. V případě, že se z jakéhokoli důvodu zastaví odsávací vývěvy, podtlak v komoře by mohl způsobit nasátí oleje a kontaminaci komory. Tomu zabránil elektroventil, který se otevírá se zpožděním několika sekund po roztočení vývěv a zavírá s předstihem před jejich zastavením. Celý systém odsávání komory je tedy sestaven z těchto prvků:

- vakuová komora
- regulační přívěra VAT
- sací potrubí - vlnovec
- volitelně filtr dle povahy odpadních látek
- uzavírací elektroventil VR40E
- rootsová vývěva WKP250A
- rotační vývěva DUO35
- výfukové potrubí

Rootsova vývěva je osazena asynchronním motorem 750W, který je ovládán pomocí frekvenčního měniče Panasonic VFO. Rotační vývěva s ASM 1,1kW je bez regulace otáček spínaná pouze stykačem.

3.2 Návrh převodníku pro magnetronový generátor

Z důvodů popsaných v předchozí kapitole se budu zabývat návrhem A/D-D/A převodníku ke generátoru magnetronu. Požadavky na jeho základní vlastnosti nejprve stručně sepiš. Každý generátor bude mít vlastní převodník, takže řízení bude muset komunikovat s větším počtem. Převodník bude tedy v režimu slave komunikovat po sériové lince RS-485 s nadřazeným PLC (masterem). PLC bude cyklicky posílat dva telegramy a to střídavě pro čtení a zápis. Číst se budou hodnoty dvou analogových vstupů 0-2V, které odpovídají rozsahu 0-10kW činného a cirkulačního výkonu. Zapisovat pak bude z PLC pouze jedna hodnota a to požadovaný výkon. Ten bude na výstupu převodníku opět převeden na analogovou hodnotu 0-2V. Současně se bude spínat digitální výstup enable, pokud hodnota z PLC bude větší než nula. Z bezpečnostních důvodů se možná ukáže rozumnější signál enable posílat mimo převodník, přímo výstupem PLC, ale při návrhu budu počítat s oběma variantami a na převodníku udělám i 1 tranzistorový výstup NPN s otevřeným kolektorem. Napájení převodníku by mělo být 24 VDC, jelikož se jedná o automatizační standard a toto napětí bude zapotřebí i pro další periferie.

Z důvodů ceny, dostupnosti a kompaktních rozměrů, mi připadá nejjednodušší vzít za základ malé Arduino, např. NANO (rozměry 18x45 mm). Jeho výkon je pro tuto úlohu naprosto dostačující, potřebné periferie lze snadno pořídit v podobě rozšiřujících modulů na sběrnici I²C a nemusím ani řešit návrh PCB.

Jak už to často bývá, i Arduino lze zakoupit jako originál, nebo čínský klon. Na první pohled se liší pouze barvou DPS (originál je zelený) a cenou. Cena klon se může pohybovat kolem 30,-Kč, zatím co originál vyjde přes 600,-Kč. Z programového hlediska se liší pouze nepatrně, MCU bývá stejné. Rozdíl je v připojení k PC, klon používá jiný USB ovladač a deska snese napájení jen 15V místo 20V. Drobně se může lišit i rozložení součástek, ale hlavní nedostatek klonu spatřuji v použitých

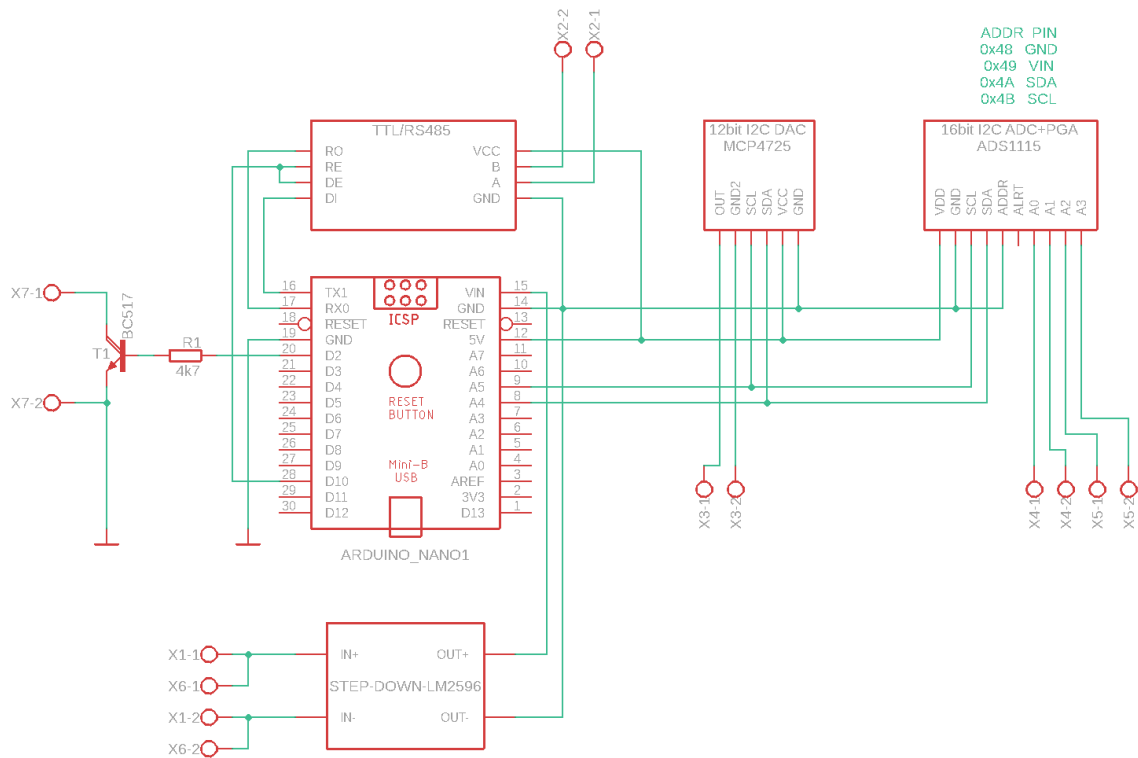
materiálech. Povrchové úpravy pinů a konektorů jsou žalostné. Vzdušná vlhkost a lidský pot vykonají velmi brzy své. Oxidace konektorů se začne brzy projevovat nestabilitou připojení, výpadky atd.

Vlastní Arduino je postavené na 8-bitovém AVR mikrokontroléru firmy Atmel, nyní patřící pod Microchip Technology. Konkrétně jde o CPU ATmega328P. Detaily architektury mikročipu se nemusím zabývat, neboť se programuje v otevřeném prostředí Arduino IDE a v syntaxi, která vychází z C a C++. Většinu programátorské otročiny již za nás udělal někdo jiný a my můžeme s výhodou využít dostupné knihovny bez hlubších znalostí. Z vlastností hardware je pro tuto práci důležité pouze několik málo věcí, jako:

- pracovní napětí 2,7 - 5,5V
- 23 programovatelných digitálních I/O
- proudová zatížitelnost výstupu 40mA
- programovatelný pull-up rezistor
- taktovací frekvence - krystal 16 MHz (16 MIPS)
- programová paměť - Flash 32kB
- programovatelný sériový USART port
- bajtově orientované 2 drátové rozhraní I²C

Arduino disponuje i osmi analogovými vstupy, ale pouze v rozlišení 10 bitů, což na rozsahu 0-2 V omezí digitální rozsah na 0-400. Programovatelné PWM výstupy sice umožňují 16 bitové rozlišení, ale jen s nízkou frekvencí 244 Hz. Navíc úprava na analogový signál 0-2V vyžaduje další diskrétní součástky, proto je výhodnější analogové vstupy i výstupy řešit pomocí rozšiřujících modulů. Zde je uveden seznam použitých komponent, které budou pomocí pinů zasunuty do lišt na univerzální desce a propojeny.

- Arduino NANO
- step-down zdroj LM2596 DC-DC (5-35V / 1,25-30V)
- převodník TTL/RS485 (MAX485)
- převodník MCP4725 (1x DAC 12 bit I²C)
- převodník ADS1115 (4x ADC 16 bit I²C)
- rezistor 4k7
- tranzistor BC517



Obrázek 3.3: Návrh zapojení A/D převodníku pro magnetronový generátor

Navržené schéma zapojení je na obrázku 3.3

Vlastní program pro Arduino je poměrně jednoduchý, proto ho zde uvedu celý. Sériová komunikace musí být na straně PLC i převodníku nastavena stejně. Byla zvolena možná až zbytečně vysoká rychlost 115200 bps, bez parity, s 1 stop bitem a 8 datovými bity. Jelikož je RS-485 diferenciální dvoudrátová sběrnice, která pracuje v režimu half-duplex, je třeba na straně Arduino řídit provoz Rx/Tx. K tomu slouží procedury `switchRx()` a `switchTx()`, které obsahují i nezbytné zpoždění.

Ve smyčce `loop()` se nejprve přečtou všechny z ADS1115 po sběrnici I²C všechny 4 analogové hodnoty a uloží se do vnitřních proměnných Arduino. Následuje ověření, zda PLC nezapsalo novou požadovanou hodnotu pro výstup. Pokud ne, čeká se nastavenou periodu a testuje se procedurou `switchRx()`, zda nepřišla z PLC data. Po uplynutí periody se smyčka opakuje. V případě, že z PLC přijdou data v korektním formátu, vykoná se příslušná procedura. Zpracuje se nová hodnota výstupu, nebo se odvysílá zpráva s aktuálními hodnotami analogů a celá smyčka se opakuje. Díky C++ je zdrojový kód programu jednoduchý a nevyžaduje detailnější popis.

Převodník pracuje v režimu slave a čeká na dotaz od PLC. To bude posílat stále dokola se zvolenou periodou dotazy pro čtení a zápis.

Znaky STX (0x02) a ETX (0x03) ohraničují začátek a konec telegramů. Všechny ostatní znaky uvnitř zprávy jsou posílány jako ASCII znaky. Adresa i příkaz mají pevnou délku jednoho znaku. Čísla jsou posílána v hexadecimálním formátu s pevnou délkou 4 znaků (tj. velikost `int_16`).

PLC dotaz

```
<STX><ADR><CMD><ETX>  
02 31 41 03
```

odpověď převodníku, hodnoty "255, 256, 257, 258"

```
<STX><ADR><CMD><VAL1><VAL2><VAL3><VAL4><ETX>  
02 31 41 30 30 46 46 30 31 30 30 30 31 30 31 30 31 30 32 03
```

PLC zapíše hodnotu "259"

```
<STX><ADR><CMD><ETX>  
02 31 42 30 31 30 33 03
```

potvrzení od převodníku

```
<STX><ADR><CMD><ETX>  
02 31 42 03
```

```
#include <Wire.h>      //Include the Wire library to talk I2C  
2 #include <Adafruit_ADS1X15.h>  
  
4 #define serial_addr "1"  
  
6 #define Tx_EN_PIN 10  
#define o_enable 2  
8  
#define STX '\2'  
10 #define ETX '\3'  
#define MCP4725_ADDR 0x60  
12  
Adafruit_ADS1115 ads1115;  
14  
int valOut = 0;  
16 int valOutLast = -1;  
  
18 unsigned long cycleTime = 1000; // delay between measurements [ms]  
unsigned long timeStemp = cycleTime; // arduino time for next  
measurement  
20  
int16_t valIn[4]; // read analogs  
22  
// ***** P R O C E D U R E *****  
24  
void(* resetFunc) (void) = 0; //declare reset function at address 0  
26  
void switchTx(){  
28   digitalWrite(Tx_EN_PIN, HIGH); // enable sending  
   delay(10);  
30 }  
void switchRx(){  
32   delay(25);
```

```

34 }
    digitalWrite(Tx_EN_PIN, LOW);
36 void tx_values(){
    switchTx();
38 Serial.print(STX);
    Serial.print("1A");
40 for (uint8_t i = 0; i < 4; i++)
    {
42     char hexString[5];
        sprintf(hexString, "%04X", valIn[i]);
44     Serial.print(hexString);
    }
46 Serial.println(ETX);
    switchRx();
48 }

50 void tx_ack(){
    switchTx();
52 Serial.print(STX);
    Serial.print("1B");
54 Serial.println(ETX);
    switchRx();
56 }

58 void serial_Rx(){
    if(Serial.available()){
60     String data = Serial.readStringUntil(ETX);
        String adr = data.substring(1,2);
62     String cmd = data.substring(2,3);
        String valStr = data.substring(3,data.length()-1);
64
        if(adr.equals(serial_addr)){ // <STX><addr><cmd><ETX>
66             if (cmd.equals("A")){ // request to read analog inputs
                tx_values();
68             } // <STX><addr><cmd><val><ETX>
            else if(cmd.equals("B")){ // write value to analog output
70                 valOut = valStr.toInt();
                tx_ack();
72             }
        }
74 }
}

76 // ***** S E T U P
78
80 void setup()
81 {
    ads1115.setGain(GAIN_TWO); // 2x gain +/- 2.048V 1 bit = 1mV
82 Serial.begin(115200);
    Serial.setTimeout(20);
84 pinMode(Tx_EN_PIN, OUTPUT);
    switchRx(); // enable receiving
86 pinMode(o_enable, OUTPUT);

```

```

88   ads1115.begin();
   }
90
   // ***** L O O P
92   void loop()
   {
94     valIn[0] = ads1115.readADC_SingleEnded(0);
     valIn[1] = ads1115.readADC_SingleEnded(1);
96     valIn[2] = ads1115.readADC_SingleEnded(2);
     valIn[3] = ads1115.readADC_SingleEnded(3);
98
     if (valOutLast != valOut){           // write analog value
100     Wire.beginTransaction(MCP4725_ADDR);
        Wire.write(64);                   // cmd to update the DAC
102     Wire.write(valOut >> 4);           // the 8 most significant bits
        ...
        Wire.write((valOut & 15) << 4);   // the 4 least significant bits
        ...
104     Wire.endTransmission();
        valOutLast = valOut;
106     }
108     do{
        serial_Rx();
110     }while(millis() < timeStamp); // pause until the end of the cycle
112     timeStamp = millis() + cycleTime;
   }

```

Listing 3.1: program Arduino převodníku

3.3 Automatizace jednotky DKE6-0K7-22

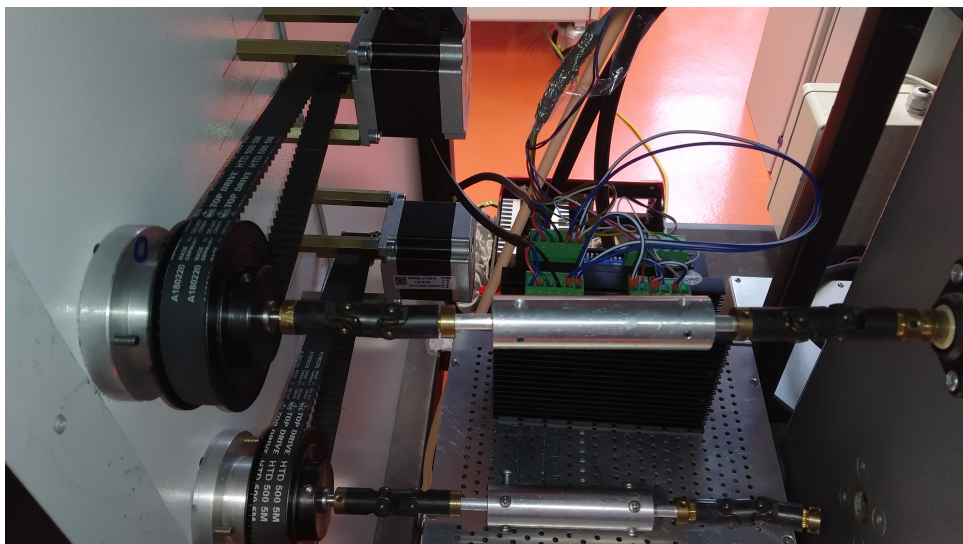
Manuální přizpůsobovací jednotka RF generátoru DKE6-0K7-22 je třeba upravit pro automatické řízení. Z praktických důvodů ponechám i nadále možnost ručního řízení, pouze přidám na hřídele klikových mechanismů ozubené řemenice, které budu ovládat pomocí 2-fázových krokových motorků 57CM13 (1,3Nm/4A/1,8°). Díky převodovému poměru $i=10/3$ je zajištěn na hřídelích dostatečný kroutící moment, který umožní ovládání vakuových kondenzátorů jednotky, které zůstanou nadále propojeny s ručním klikovým mechanismem. Motory budou buzeny drivery M542. Jelikož ruční ovládací kliky a hřídele nejsou nikterak vyvážené a souosost spojení je velmi špatná, nelze využívat plné rychlosti a převod do pomala nemá na rychlost ladění vliv. Přeladit celý 13-ti otáčkový kondenzátor reálně trvá kolem 20s, ale v praxi se ukázalo, že to během procesu ničemu nevádí, neboť podmínky se nemění skokově a tudíž i doladování se provádí jen malými změnami. Pro úplnost ještě uvedu rozlišení motorků. Jednotka M542 je nastavena na 400 pls/rev. S řemínkovým převodem odpovídá rozsahu kondenzátoru 10-1200pF (13 otáček) 0-17333 pulzů z PLC. Řízení umožňuje i funkci "Microstep", bylo by tak možné stávající rozlišení ještě zjemnit

a to až 64x. Zřejmě to však nebude zapotřebí, se stávajícími mechanickými vůlemi by nemělo valný smysl.

Krokové motory jsou zvoleny především pro jejich nízkou pořizovací cenu a snadné ovládání. Servopohon a absolutní odměřování by pro tuto aplikaci bylo jistě výhodnější. Ovládání by bylo jednodušší, obsluha by nemusela věnovat seřízení a poloze motorů pozornost, informace o poloze by byla k dispozici i při ručním přestavení, ale cena takového řešení by byla přibližně desetinásobná. Navíc vlastní proces ladění, kterým se zabývám, by to nikterak nezlepšilo.

Na tomto řešení je největší omezení především absencí informace o absolutní poloze kondenzátorů. Motory nemají zpětnou vazbu a rotační osa neumožňuje ani připojení žádných referenčních snímačů. Na kondenzátory by bylo problematické něco umístit. Reference polohy se tedy budou muset nastavovat ručně a pokud dojde k ručnímu přeladění nebo mechanickému prokluzu, bude nutné před spuštěním automatiky referenční proces zopakovat.

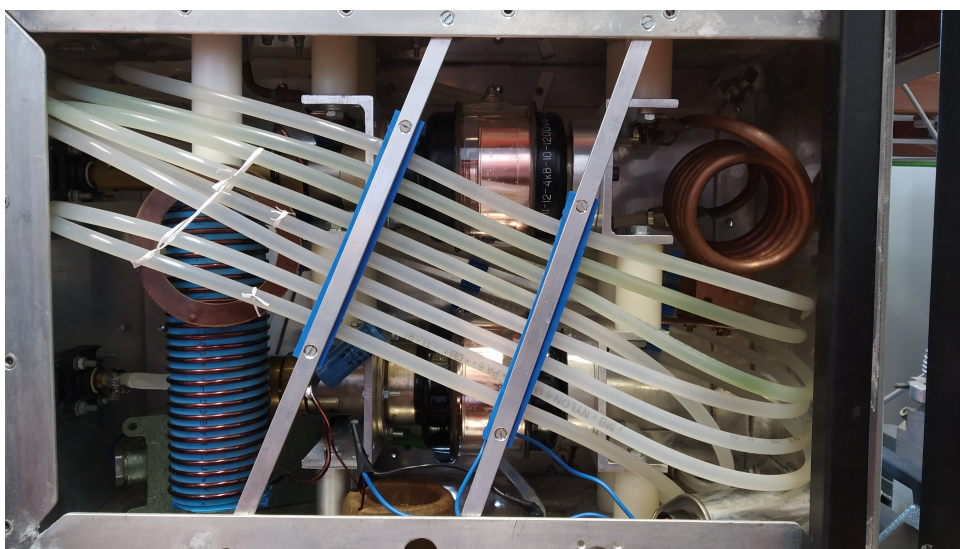
Proces reference bude probíhat následovně. Ručním pootáčením se oba kondenzátory přesunou do krajní polohy (nejnižší kapacita) a na panelu HMI se vynulují aktuální polohy. Od této chvíle ví PLC kde se nachází a bude schopné jednotku korektně řídit.



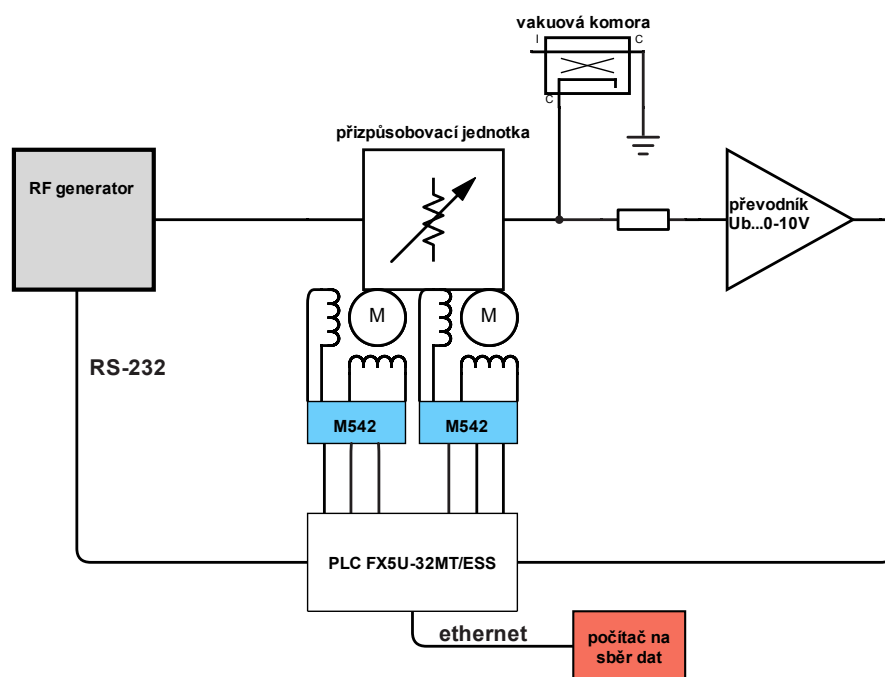
Obrázek 3.4: Připojení motorů k DKE6-0K7-22

Úkolem přizpůsobovací jednotky je při neustále se měnících podmínkách v komoře udržovat co nejmenší odražený výkon. Absolutní hodnotu odraženého výkonu ale PLC zjišťuje pouze po sériové lince z RF generátoru. Cyklicky ho načítá přes RS-232 spolu s dalšími údaji a hodnota se tedy v PLC obnovuje přibližně 1 za sekundu. Pro doladování tedy využívám U_b , které je aktualizované prakticky v každém scanu PLC. Jak se ukázalo, SWR je totiž nepřímo úměrné U_b . Jinak řečeno, pokud je přizpůsobovací jednotka správně vyladěna, $SWR=0$ a $U_b = U_{max}$.

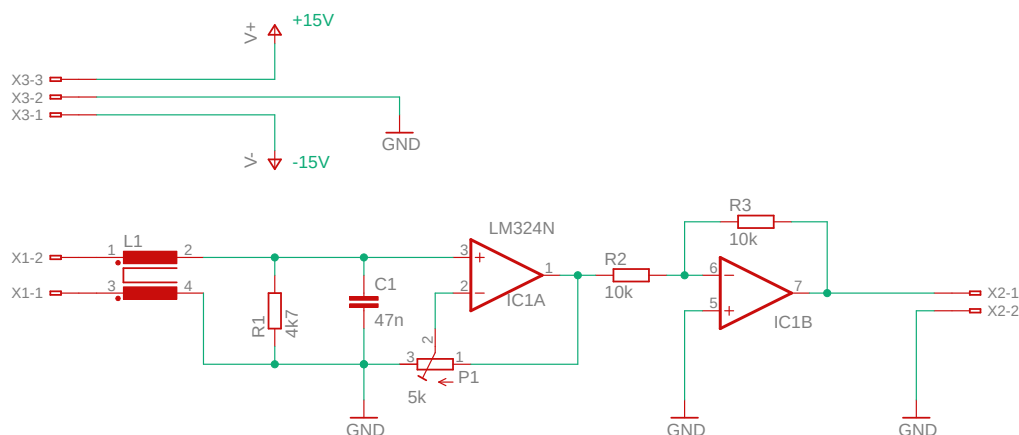
Nejprve bylo třeba vytvořit obvod, který převede záporné napětí U_b na signál 0-10V. Je navržen pomocí operačních zesilovačů LM324N, viz obrázek 3.8. Obvod



Obrázek 3.5: Vnitřní uspořádání jednotky DKE6-0K7-22



Obrázek 3.6: Blokové schéma celkového zapojení

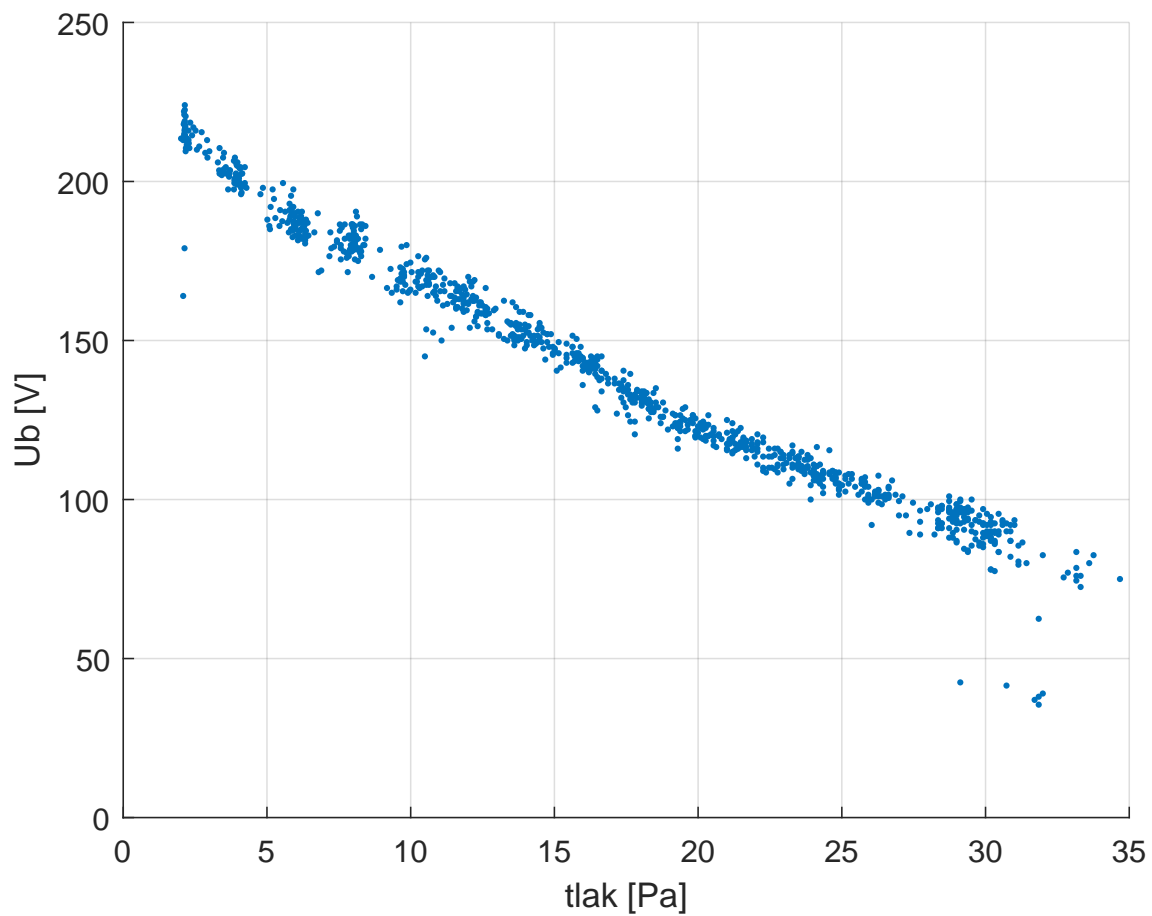


Obrázek 3.7: Schéma převodníku napětí U_b

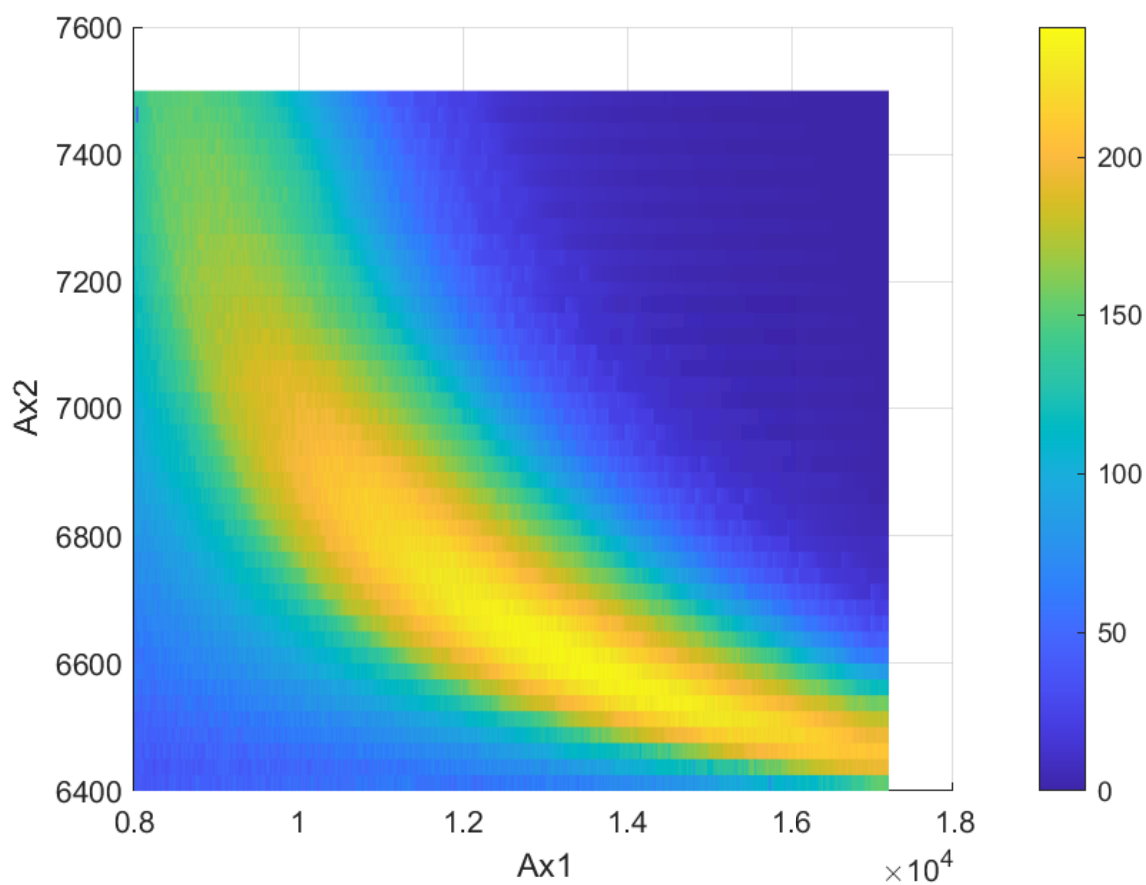
se připojí přímo k přizpůsobovací jednotce 2.18.

Trimmer P1 byl doladěn za pomoci DC zdroje připojeného k depoziční elektrodě a ručního voltmetru. Napětí na elektrodě 0 až -2kV by mělo odpovídat rozsahu 0 až +10V. Toto napětí se použije pro RF generátor a současně na analogový vstup řídicího PLC Mitsubishi FX5U-32MT/ESS.

PLC řídí pulzními výstupy Y0, Y1 rychlost a polohu krokových motorů. Směr otáčení a povolení řízení (signály DIR a ENA) jsou pak pro osu 1 na výstupech Y10, Y11 a pro druhou osu na výstupech Y12, Y13. Blokové schéma celého zapojení je na 3.6. S tímto jednoduchým zapojením byly spuštěny vývěvy komory s PID regulací, která udržovala tlak 4Pa a při připouštění argonu v množství 20 sccm. Po ustálení tlaku v komoře byl zapnut RF generátor v režimu regulace výkonu a nastaveno 60W s omezením PWR na 32W. Tento odražený výkon vydrží dlouhodobě přívodní vedení i generátor bez rizika poškození. V tomto stavu bylo spuštěno automatické proladování celé pracovní oblasti a pomocí jednoduché aplikace vytvořené v C# se ukládala měřená data (U_b , PWF, PWR). Ta si aplikace pomocí modbud/TCP vyčítala z PLC. Aby byla zaručena synchronizace, prováděly se motory definované kroky, a následné vzorkování a příprava dat pro PC. Takto systematicky se po jednotlivých krocích proladovala celá oblast. Jeden vzorek trval zhruba 1s (především díky komunikaci s RF generátorem), takže proladit celou oblast s rozumným rozlišením, by bylo časově náročné. Proto došlo k cílenému zaměření pouze na část oblasti, kde je nenulové U_b . To bylo nalezeno pomocí ručního ladění. Jak je patrné z obrázku 3.9, oblast kvalitního přizpůsobení je poměrně úzká a to především z po-



Obrázek 3.8: Graf závislosti U_b na tlaku



Obrázek 3.9: Graf U_b při konstantních podmínkách

hledu druhé osy. Mimo ní jsou evidentně rozsáhlé oblasti, kde nedochází k zapálení výboje, napětí U_b je nulové a odražený výkon je na maximální povolené limitě RF generátoru.

Z takového místa bude komplikované nastartovat automatickou kalibraci, neboť numerický gradient bude v těchto bodech nulový. Pro druhou osu by byl výhodnější laděný kondenzátor zhruba poloviční hodnoty, aby se "světlejší oblast" rozšířila. Při bližším zkoumání jsou na obrázku patrné rovnoběžné čáry, které naznačují nějakou hysterezi systému. Z principu skenování, které probíhalo "cik-cak" na ose 1 (osa 2 krokovala jen vpřed v krajních bodech), bude tento problém zřejmě způsoben mechanickými vůlemi, které jsou vymezeny na dvou sousedních bodech (mezi řádky) do opačných směrů.

Experimentálně jsem ověřil, že při změně tlaku v komoře dochází ke změně permittivity prostředí. To způsobuje změnu kapacity mezi depoziční elektrodou a pláštěm. Po doladění je vedlejším efektem změna napětí U_b , viz obrázek 3.8. Ta má fyzikální podstatu v počtu iontů v objemu plazmatu. Z U_b tedy nelze usoudit, jak je jednotka dobře vykompenzována, protože neznáme U_{max} . Gradient lze ale využít k ladění a skutečné SWR následně ověřit přečtením z RF generátoru. Opačně lze využívat pokles napětí k indikaci rozladování.

3.3.1 Algoritmus přizpůsobení RF

Z dostupných údajů a získaných dat jsem vytvořil strukturu sekvenčních kroků, jak by měl postupovat řídicí PLC program. Z matematického hlediska jde o numerickou optimalizační úlohu hledání lokálního minima.

$$\text{minimalizace } f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, \quad \arg \min_{x \in \mathbb{R}^2} f(x) \quad (3.1)$$

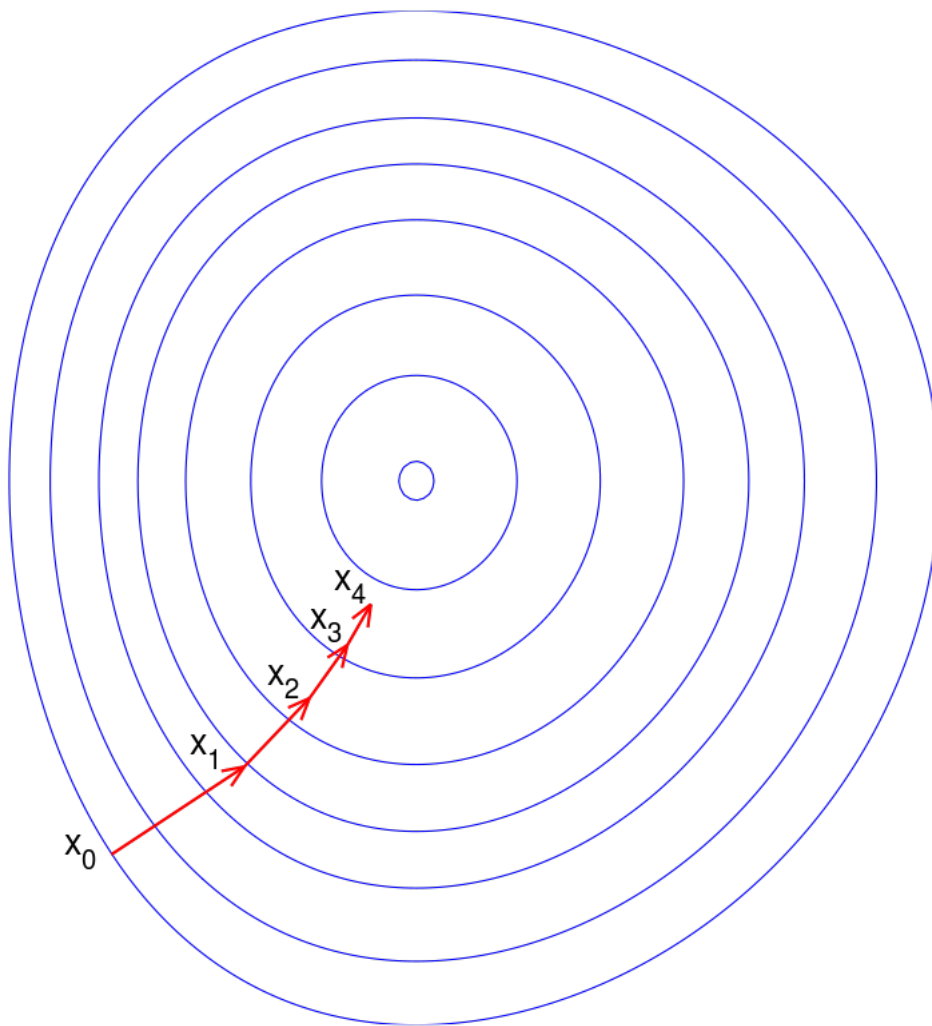
V našem případě hledáme maximum, ale to v praxi znamená jen otočení znaménka. Těchto metod existuje celá řada, nejznámější je Newton, Newton-Raphson a Nelder–Mead. Vychází z výpočtu numerické derivace nebo gradientu a výpočtem udělá predikci dalšího kroku, jak je znázorněno na 3.10.

Pro její praktickou realizaci mám následující představu. PLC nejprve přečte SWR z generátoru, a je-li vyšší než žádoucí, začne ladit. Z nějakého výchozího bodu pootočí postupně oběma kondenzátory vpřed a vzad a naměří napětí U_b ve čtyřech bodech roviny obrázek 3.9. Z nic vypočítá numerický gradient a v jeho směru se začne pohybovat (ladit kondenzátory), dokud napětí poroste. Jakmile zaznamená pokles, muselo se přeladit přes nějaké maximum (lokální nebo globální). Zastaví se tedy pohyb a případně se vrátí na pozici nejvyššího napětí. Nyní je možné celý proces opakovat, až do okamžiku nalezení uspokojivého globálního maxima. Popis kroků algoritmu:

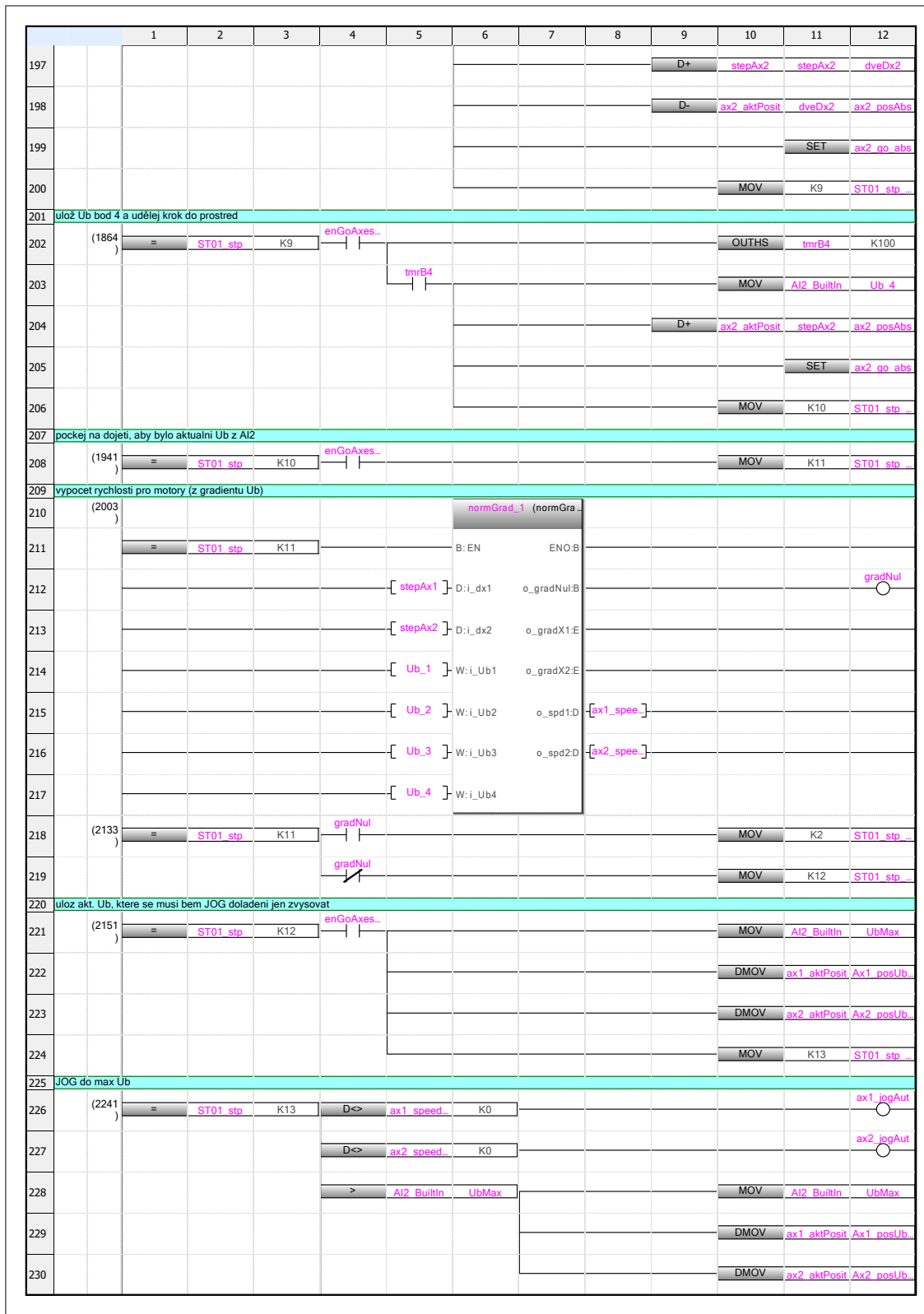
1. zapnout pohony krokových motorů
2. čekej na $PWR > 2W$
3. přesun motorů do pracovní pozice (experimentálně zjištěna, funkce tlaku)

4. dle PWR nastav velikost kroku l_0 pro měření gradientu U_{b1}
5. osou 1 udělej inkrementální krok vpřed o l_0 (první bod)
6. ulož napětí U_{b1} , osou 1 krok $-2l_0$ (druhý bod)
7. ulož napětí U_{b2} , osou 1 krok l_0 , osou 2 krok l_0 (třetí bod)
8. ulož napětí U_{b3} , osou 2 krok $-2l_0$ (čtvrtý bod)
9. ulož napětí U_{b4} , osou 2 krok l_0 (střed)
10. rezerva
11. výpočet gradientu U_b a z něj rychlosti os funkčním blokem
12. ulož U_{bmax} a aktuální pozici
13. přesun obou os ve směru gradientu, dokud roste napětí
14. návrat do bodu, kde bylo nejvyšší U_b , opakuj od bodu 4

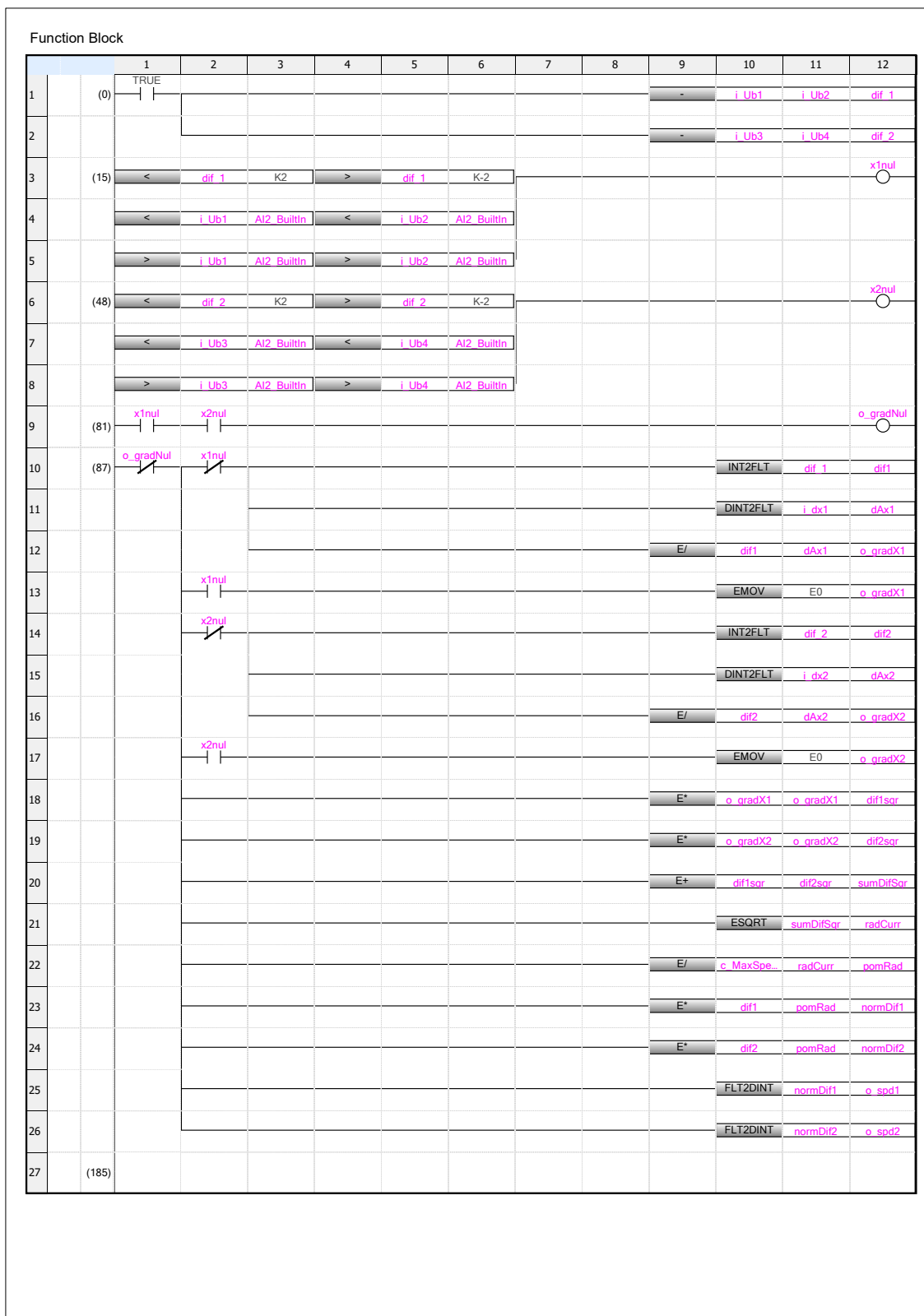
Číslování odpovídá sekvenčním krokům v PLC programu. Používám programovací jazyk Ladder, který je zřejmě nejrozšířenějším jazykem u většiny PLC a nabízí ho i vývojové prostředí GX Works3 od Mitsubishi, které jsem použil. Tento jazyk je velmi praktický pro přehled a ladění, ale nehodí se pro vykreslování v textovém dokumentu. Z tohoto důvodu zde zobrazím pouze nejdůležitější části a celý program bude k dispozici jako příloha. Část programu ladící sekvence je na obrázku 3.11 a princip výpočtu numerického gradientu je pomocí funkčního bloku rozkreslen na obrázku 3.12.



Obrázek 3.10: Ilustrace gradientního vzestupu [13].



Obrázek 3.11: ukázka PLC programu sekvence ladění SWR



Obrázek 3.12: funkční blok normGrad

3.4 Komunikace s MFC

Jelikož většina hmotnostních regulátorů plynů je analogových a základní PLC jednotka FX5u nedisponuje dostatkem analogových IO, je zapotřebí nějaké rozšíření. Nejlevnější variantou byl modul GECON TCP-508N, obrázek 3.13. Ten nabízí 8 analogových vstupů, 4 analogové výstupy, 8 relé výstupů a 8 digitálních vstupů. Komunikace s modulem může probíhat buď po sériové lince, nebo jak bylo použito zde, pomocí ModbusTCP. Analogy lze softwareově přepínat mezi napěťovými 0-10V a proudovými 4-20mA, ale v případě výstupů je zapotřebí ještě ručního přestavení jumperu uvnitř. Jedno zařízení GECON obsluhuje čtyři MFC, takže musíme připojit 2 zařízení. Čtení a zápis probíhá následovně:

PLC dotaz (Start Address 50, Size 8, Bits, Read coils)

```
00 01 00 00 00 06 00 01 00 32 00 08
```

GECON odpověď

```
00 01 00 00 00 04 00 01 01 01
```

PLC dotaz (Start Address 0, Size 8, Word, Read input register)

```
00 04 00 00 00 06 00 04 00 00 00 08
```

GECON odpověď

```
00 04 00 00 00 13 00 04 10 19 D2 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
```

PLC zápis (Start Address 0, Size 8, Bits, Write multiple coils)

```
00 06 00 00 00 08 00 0F 00 00 00 08 01 01
```

GECON potvrdí

```
00 06 00 00 00 06 00 0F 00 00 00 08
```

PLC zápis (Start Address 0, Size 4, Word, Write multiple register)

```
00 08 00 00 00 0F 00 10 00 00 00 04 08 00 00 00 00 1F 40 00 00
```

GECON potvrdí

```
00 08 00 00 00 06 00 10 00 00 00 04
```



Obrázek 3.13: rozvaděč s rozšiřujícími moduly GECON

3.5 Shrnutí

PLC musí komunikovat různými způsoby s několika zařízeními. Základní jednotka FX5U-32MT disponuje pouze jedním ethernet portem a portem sériové linky RS-485. Lze sice doplnit rozšiřující karty, ale jsou i jiné možnosti, které jsou v tomto případě praktičtější a levnější. PLC může přes ethernet port navázat až 8 TCP spojení, například s převodníky ethernet/serial. Ty lze pak umístit přímo k zařízení a vyhneme se problematické dlouhé kabeláži RS-232. V našem případě jde o regulační ventil vývěv VAT, vakuovou měрку a RF-generátor, které nejsou součástí elektrického rozvaděče, ale z praktických důvodů musí být co nejbližší vakuové depoziční komory. Převodníky jsem pořídil od firmy Papouch, viz obrázek 3.14, ale existuje celá řada dalších výrobců. Výhodou je jejich snadná konfigurace. Přes ethernet stačí nastavit IP adresu, port, parametry sériové linky a ještě zvolit "Enable Packing", aby převodník posílal celé zprávy. Pak už jen stačí připojit a navázat spojení ze strany PLC.



Obrázek 3.14: Převodníky GNOME (zdroj [14])

Na obrázku 3.15 je ethernetová konfigurace PLC. Mitsubishi nabízí u PLC mnoho různých metod spojení, ale pro potřeby této práce vystačíme s TCP protokolem, metodou socket a ModbusTCP. MELSOFT connect je rezerva pro připojení více panelů HMI. Unpassive umožňuje navázat spojení zvenku z jiných zařízení, stejně jako ModbusTCP. Ten využívám pro vizualizaci a vzdálenou správu. Do PLC registrů se takto může snadno podívat a zapisovat vlastní počítačová aplikace.

port	protokol	zařízení
RS-485	VAT	PM-3
TCP	ModbusTCP	GECON 1
TCP	ModbusTCP	GECON 2
TCP	Pfeiffer	RPT200
TCP	AE BUS	RF generátor

Tabulka 3.1: Přehled aktivní komunikace PLC

Pro ovládání jsem použil standardní panel HMI GT2505-VTBD rovněž od Mitsubishi. Jeho výhodou je snadné grafické programování, které mi přijde intuitivní. Pro-

gramuje se v GT Designer3, který není nikterak navázán na vývojové prostředí GX Works3 pro PLC. Existuje sice nadstavba, která přenáší mezi programy symbolické adresy, při přímé adresaci ale není třeba a zde se nepoužívá.

Výhodou panelu je možnost připojení až 4 kontrolérů od různých výrobců a to jak přes ethernet, tak RS-232, nebo RS-485. Umožňuje i nastavit předávání dat mezi zařízeními, což může být užitečné. Program zde netřeba nějak popisovat, je součástí přílohy.

The screenshot shows the 'Ethernet Configuration' window. At the top, there is a 'Detect Now' button and a status bar indicating 'Connected Count (Cur./Max.): 7/8'. Below this is a table with columns for 'No.', 'Model Name', 'Communication Method', 'Protocol', 'Fixed Buffer Send/Receive Setting', 'PLC IP Address', 'PLC Port No.', 'Sensor/Device MAC Address', 'Sensor/Device Host Name', 'Sensor/Device IP Address', and 'Sensor/Device Port No.'. The table lists seven connection modules, including MELSOFT, Unpassive, Active, and MODBUS/TCP modules. Below the table is a network diagram showing a 'Host Station' connected to seven modules (MEL, UP, three A, and MOD) via connections No. 1 through No. 7.

No.	Model Name	Communication Method	Protocol	Fixed Buffer Send/Receive Setting	PLC		Sensor/Device				
					IP Address	Port No.	MAC Address	Host Name	IP Address	Port No.	
	Host Station				192.168.1.200						
1	MELSOFT Connection Module	MELSOFT Connection	TCP		192.168.1.200						
2	Unpassive Connection Module	Socket Communication	TCP		192.168.1.200	10001					
3	Active Connection Module	Socket Communication	TCP		192.168.1.200	10002			192.168.1.74	502	
4	Active Connection Module	Socket Communication	TCP		192.168.1.200	10003			192.168.1.75	502	
5	Active Connection Module	Socket Communication	TCP		192.168.1.200	10004			192.168.1.80	10001	
6	Active Connection Module	Socket Communication	TCP		192.168.1.200	10005			192.168.1.81	10001	
7	MODBUS/TCP Connection Module	MODBUS/TCP	TCP		192.168.1.200	502					

Obrázek 3.15: Ethernetová konfigurace na straně PLC

4 Závěr

Návrh řízení plazmové depozice se v průběhu realizace ukázal jako velmi rozsáhlý projekt. Zejména pronikání do specifických problémů spojených s vakuem a plazmatem bylo časově velmi náročné. Práce mi však přinesla mnoho cenných poznatků a zkušeností, a to jak z oblasti technologické, tak i z oblasti elektronické a řídicí. V průběhu bylo třeba řešit mnoho dílčích problémů, které při vývojové činnosti lze očekávat a nelze se jim vyhnout. V rámci diplomové práce bylo dosaženo těchto cílů:

- Provedena rešerše existujících metod řízení vakuových depozičních komor a vytvoření komplexního přehledu o dostupných technologiích a postupech.
- Byl navržen princip řízení vývěv a regulace vakua kombinovanou metodou změny otáček a řízení proporcionální klapky. Tato kombinace přinesla výhodu rychlého dosažení pracovní oblasti, stabilní a přesnou regulaci a současně vedla k šetrnému a energeticky úspornějšímu řešení.
- Navržené automatické řízení RF generátoru a kompenzační jednotky umožňuje snadnější provádění experimentů depozice a jejich opakovatelnost.
- Návrh regulace připouštění plynných prekurzorů zvýšil spolehlivost procesu a rozšířil možnosti sběru dat o významné údaje. Ty jsou zásadní pro stanovení požadovaných chemických reakcí a umožní přenesení procesu na jiné zařízení.
- Jako další modifikace zařízení se nabízí několik oblastí. Pro vytváření větších ploch či struktur by bylo žádoucí vyvinout polohovací zařízení do vakua, které by umožňovalo automatické natáčení vzorku pod magnetrony. Dále by bylo vhodné doplnit nějaké nepřímé měření teplot vzorku a jejich řízený předehřev.
- Dálková správa a vizualizace, umožňuje základní řízení, sledování provozních stavů a především sběr dat do PC. Data se ukázala jako velmi užitečná už při ožívování zařízení a určitě půjde o oblast, kterou by bylo možné dále rozvíjet.
- Funkčnost dílčích celků byla ověřována průběžně, takže při ověřování funkčnosti celého zařízení již nenastali žádné komplikace. Vše pracuje spolehlivě dle očekávání.
- Bylo provedeno měření a sběr experimentálních dat. Data z RF generátoru zároveň posloužila pro analýzu přizpůsobovací jednotky, jak je popsáno v kapitole 3.3.1.

Věřím, že tato diplomová práce poslouží jako inspirace pro další podobné projekty v této oblasti, práce na ní byla velice zajímavá a obohacující. Pevně doufám, že v budoucnu bude příležitost na tuto práci navázat a celý koncept dále rozvíjet.

Použitá literatura

- [1] GMBH, Leybold. *Products* [online]. 2022. [cit. 2022-10-01]. Dostupné z: <https://www.leybold.com/en/>.
- [2] GMBH, Pfeiffer Vacuum. *Products* [online]. 2022. [cit. 2022-10-01]. Dostupné z: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/>.
- [3] CALTECH. *Pfeiffer CCG IKR 270 Instruction Manual* [online]. 2003. [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://mmrc.caltech.edu/Vacuum/Pfeiffer%20/Pfeiffer%20CCG%20IKR%20270.pdf>.
- [4] VACUUM, Pfeiffer. *Digiline Manual* [online]. 2019. [cit. 2023-05-10]. Dostupné z: https://www.pfeiffer-vacuum.com/filepool/file/digiline/pg0023ben_e.pdf?request_locale=en_US&referer=2063.
- [5] KREGAR, Zlatko; BISCAN, Marijan; MILOSEVIC, Slobodan; VESEL, Alenka. Monitoring Oxygen Plasma Treatment of Polypropylene With Optical Emission Spectroscopy. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2011, roč. 39, č. 5, s. 1239–1246. Dostupné z DOI: [10.1109/tps.2011.2123111](https://doi.org/10.1109/tps.2011.2123111).
- [6] BUSSCHER, H.J.; PELT, A.W.J. van; BOER, P. de; JONG, H.P. de; ARENDS, J. The effect of surface roughening of polymers on measured contact angles of liquids. *Colloids and Surfaces*. 1984, roč. 9, č. 4, s. 319–331. Dostupné z DOI: [10.1016/0166-6622\(84\)80175-4](https://doi.org/10.1016/0166-6622(84)80175-4).
- [7] ADVANCED ENERGY INDUSTRIES, INC. *CESAR RF Generator User Manual* [online]. 2017. [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.advancedenergy.com/globalassets/resources-root/data-sheets/cesar-data-sheet.pdf>.
- [8] GRULICH, Ing. Ondřej. *Disertační práce* [online]. 2015. [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/31063/grulich_2015_dp.pdf?sequence.
- [9] BATTISTONI, Federica; FAIT, Alberto; BORTOLAMI, Ivan; GIROTTI, Matteo; NOLLO, Giandomenico. Integrated throughflow mechanical microfluidic sensors. *Sensors and Actuators, A: Physical*. 2018, roč. 276, s. 75–83. Dostupné z DOI: [10.1016/j.sna.2018.04.006](https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.04.006).
- [10] MUTOH, Hirofumi; KAWAI, Masanari. Schematic of flow control schemes for mass flow controllers used in the semiconductor industry. *Journal of flow control, measurement & visualization*. 2013, roč. 1, č. 1, s. 37–48.

- [11] EHRHARDT, H.; SZYSZKA, B. *Magnetron Sputtering: Fundamentals and Applications*. Wiley-VCH, 2012.
- [12] POSADOWSKI, Witold; ZIELIŃSKI, Grzegorz. Magnetron sputtering process control by medium-frequency power supply parameter. *Vacuum*. 2011, roč. 85, č. 12, s. 1261–1265.
- [13] WIKIPEDIA. *Gradient descent* — *Wikipedia, The Free Encyclopedia* [online]. 2021. [cit. 2021-09-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Gradient_descent.
- [14] PAPOUCH. *GNOME232 Manual* [https://cdn.papouch.com/data/user-content/old_eshop/files/GNOME232_1/gnome.pdf]. 2011. Accessed: May 8, 2023.