

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přípravek pro výuku měření mechanické polohy

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub LINHART**

Osobní číslo: **E17N0015P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Přípravek pro výuku měření mechanické polohy**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prozkoumejte běžně používané principy měření mechanické polohy.
2. Seznamte se s dostupným vybavením pro měření mechanické polohy, které je k dispozici v laboratoři neelektrických veličin.
3. Navrhněte přípravek, který bude ve výuce sloužit k demonstraci principů měření mechanické polohy.
4. Navržený přípravek realizujte.
5. Vytvořte návod k laboratornímu cvičení na tomto přípravku.



Doc. Ing. Alois Hamr, Ph.D.
vedoucí katedry

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

V Plzni dne 5. října 2018

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

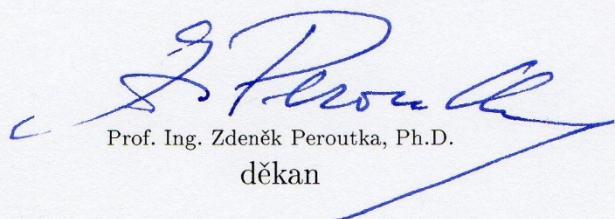
1. Ripka, R., Ďaďo, S., Kreidl, M., Novák, J.: **Senzory a převodníky, ČVUT, Praha, 2005**
2. Beran, V., **Technická měření, ZČU, 2004, ISBN 80-7043-320-5**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Sýkora, Ph.D.**

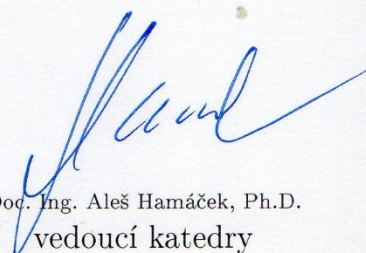
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **5 října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**


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




Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5 října 2018

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá měřením mechanické polohy a za cíl si klade vytvoření přípravku pro výuku jejího měření. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou stručně vysvětleny principy vybraných senzorů a způsoby měření mechanické polohy. V praktické části jsou představeny vybrané senzory pro konstrukci přípravku spolu s popisem jeho realizace. Pro účely výuky a snadnou manipulaci s přípravkem je též uveden návod k měření.

Klíčová slova

Indukční senzor, kapacitní senzor, lineární pohyb, lineární posunutí, mechanická poloha, měření polohy, odporový senzor, optický senzor, polohový senzor, senzor pozice, úhlový senzor.

Abstract

This diploma thesis deals with the measurement of mechanical position and its aim is to design and build a device for educative purpose. The thesis consists of theoretical and practical part. In the theoretical part the principles of chosen sensors and methods of the mechanical position measurement are introduced and explained. In the practical part the specific sensors used for the device are characterized and the device's realization process is shown. For the educative purpose and easy use of the device the user manual is included.

Key words

Angular sensor, capacitive sensor, displacement, inductive sensor, linear motion, mechanical position, optical sensor, position measurement, position sensor, resistance sensor.

Prohlášení

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

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

V Plzni dne 29.05.2019

.....
Bc. Jakub Linhart

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Sýkorovi, Ph.D. za praktické připomínky, cenné rady a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	12
SEZNAM TABULEK	13
ÚVOD	14
CÍLE PRÁCE	14
1 SENZOR	15
1.1 DĚLENÍ SENZORŮ	15
1.2 MĚŘICÍ ŘETĚZEC	16
1.3 PARAMETRY SENZORŮ	17
2 MĚŘENÍ MECHANICKÉ POLOHY	18
2.1 ODPOROVÉ SENZORY	19
2.2 SENZORY POLOHY SE SKOKOVOU ZMĚNOU ODPORU (ELEKTROKONTAKTNÍ)	21
2.2.1 Jazyčkové kontakty	21
2.2.2 Hallův senzor.....	22
2.2.3 Magnetorezistory.....	22
2.2.4 Indukční senzory.....	23
2.2.5 Wiegandův senzor.....	24
2.3 INDUKČNOSTNÍ SENZORY	25
2.3.1 Indukčnostní senzory s malou vzduchovou mezerou	25
2.3.2 Indukčnostní senzory na principu vířivých proudů	26
2.3.3 Indukčnostní senzory s otevřeným magnetickým polem	27
2.3.4 LVDT	27
2.3.5 Indukčnostní senzory bez feromagnetika.....	28
2.4 KAPACITNÍ SENZORY.....	29
2.4.1 Kontaktní kapacitní senzory	29
2.4.2 Bezkontaktní kapacitní senzory	30
2.5 OPTICKÉ SENZORY	30
2.5.1 Polohově citlivé senzory (PSD).....	31
2.5.2 CCD senzory – senzory s nábojově vázanou strukturou	32
2.5.3 Inkrementální optoelektronické senzory posuvu	32
2.5.4 Absolutní optoelektronické senzory polohy s prostorovým kódem.....	34
2.5.5 Optoelektronické senzory polohy s triangulací	35
3 STANOVENÍ ZÁKLADNÍCH POŽADAVKŮ A VÝBĚR VHODNÝCH SENZORŮ	36
3.1 AHLBORN ALMEMO FWA100T	36
3.2 ODPOROVÝ POTENCIOMETR VISHAY UIPMA1501472XCB	37
3.3 OPTICKÝ SENZOR	38
4 NÁVRH MĚŘICÍHO PŘÍPRAVKU	40
4.1 NÁVRH ELEKTRONICKÉ ČÁSTI.....	40
4.2 NÁVRH MECHANICKÉ ČÁSTI.....	42
5 REALIZACE MĚŘICÍHO PŘÍPRAVKU	43
5.1 REALIZACE MECHANICKÉ ČÁSTI	43
5.2 REALIZACE ELEKTRONICKÉ ČÁSTI	44
5.3 FINÁLNÍ PODOBA PŘÍPRAVKU	46
5.4 FIRMWARE	47
6 OVĚŘENÍ FUNKCE PŘÍPRAVKU	49

ZÁVĚR	51
POUŽITÁ LITERATURA	52
PŘÍLOHY	54
PŘÍLOHA A – SCHÉMA ŘÍDICÍ DPS	54
PŘÍLOHA B – SCHÉMA KONEKTOROVÉ DPS.....	55
PŘÍLOHA C – SCHÉMA SENZOROVÉ DPS.....	56
PŘÍLOHA D – OSAZOVACÍ VÝKRES ŘÍDICÍ DPS	57
PŘÍLOHA E – OSAZOVACÍ VÝKRES KONEKTOROVÉ DPS	58
PŘÍLOHA F – OSAZOVACÍ VÝKRES SENZOROVÉ DPS	59
PŘÍLOHA G – VYROBENÉ DPS – PANEL	60
PŘÍLOHA H – HOTOVÝ PŘÍPRAVEK.....	61
PŘÍLOHA I – VÝROBNÍ VÝKRES PLEXISKLA	62
PŘÍLOHA J – VÝROBNÍ VÝKRES STUPNICE.....	63
PŘÍLOHA K – KUSOVNÍK SOUČÁSTEK	64

Seznam symbolů a zkratek

Symboly

B [T]	Magnetická indukce
C [F]	Kapacita kondenzátoru
d [mm]	Velikost vzduchové mezery, vzdálenost elektrod kondenzátoru
H [A/m]	Intenzita magnetického pole
I [A]	Elektrický proud
K [-]	Konstanta dle parametrů cívky
L [H]	Indukčnost cívky
M [H]	Vzájemná vazba cívek
N, n_2, n_1 [-]	Počet závitů cívky
Q [-]	Činitel jakosti cívky
R [Ω]	Elektrický odpor
R_H [$m^3 A^{-1} s^{-1}$]	Hallova konstanta
R_{in} [Ω]	Elektrický odpor pro linearizaci
R_m [H^{-1}]	Reálná část reluktance
R_v [Ω]	Elektrický odpor přívodních vodičů
R_z [Ω]	Elektrický odpor zátěže
S [m^2]	Průřez jádra cívky, plocha elektrod kondenzátoru
U [V]	Elektrické napětí
U_H [V]	Hallovo napětí
X [mm]	Celková délka odporové dráhy
X_i [mm]	Vzdáleností jezdce od počátku odporové dráhy
X_m [H^{-1}]	Imaginární část reluktance
Z [Ω]	Impedance
Z_m [H^{-1}]	Magnetická reluktance
δ [mm]	Hloubka vniku
ε [F/m]	Absolutní permitivita materiálu
ε_0 [F/m]	Permitivita vakua
ε_r [-]	Relativní permitivita
λ [-]	Krok inkrementálního čítače
μ [H/m]	Permeabilita prostředí
μ_0 [H/m]	Permeabilita vakua
ω [rad/s]	Úhlová frekvence
η [-]	Poměr mezi vzdáleností jezdce
ρ [-]	Poměr odporů
ρ [Ωm]	Rezistivita

Zkratky

ABS	ABSolutní
AC	Alternating Current (střídavý proud)
AMR	Anisotropic Magnetic Resistance
A/D	Analogově/Digitální
BNC	Bayonet Neill Concelman connector (konektor)
CALIB	Kalibrační
CCD	Charge-Coupled Devices (nábojově vázaná struktura)
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DC	Direct Current (stejnoseměrný proud)
DPS	Deska Plošných Spojů
EMC	ElectroMagnetic compatibility (elektromagnetická kompatibilita)
EMI	ElectroMagnetic Interference (elektromagnetické rušení)
GPB1, GPB2	General Purpose Buttons (tlačítko obecného využití)
GPIO	(General Purpose Input/Output)
LED	Dioda emitující světlo
LSB	Least Significant Bit (nejméně významný bit)
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MCU	Mikrokontrolér (MicroController Unit)
MOS	Metal Oxide Semiconductor
NO	Normálně rozepnutý (Normally Open)
PA6	Typ polyamidu
PC	Personal Computer (osobní počítač)
PSD	Positive Sensitive Detectors
RCC	Reset and Clock Control
REL	RELativní
SiO ₂	Oxid křemičitý
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
UIPMA	Ultraflat Industrial Potentiometer Membrane (ultratenké průmyslové potenciometrické čidlo)
USB	Universal Serial Bus

Seznam obrázků

Obr. 1 Rozdělení senzorů [3].....	16
Obr. 2 Blokové schéma měřícího řetězce A/D převodem a číslicovým zpracováním signálu [1].....	16
Obr. 3 Rozdělení dvoustavových senzorů [8].....	18
Obr. 4 Potenciometrické zapojení (náhradní schéma odporového senzoru polohy) [2].....	19
Obr. 5 Převodní charakteristika [2].....	19
Obr. 6 Měřící obvody pro odporový senzor polohy (zleva napěťový sledovač, můstek) [2].....	20
Obr. 7 Reedův kontakt při spínání [10].....	21
Obr. 8 Vnitřní zapojení 3D AMR senzoru firmy Honeywell a možnosti provedení [12].....	23
Obr. 9 Uspořádání indukčního senzoru firmy Baumer [14].....	24
Obr. 10 Wiegandův jev, a) princip, b) hysterezní smyčky, c) impuls Barkhausenova šumu [2].....	24
Obr. 11 Jednoduché uspořádání senzoru a jeho charakteristika.....	26
Obr. 12 Princip snímače a jeho nejčastější konstrukce [1].....	26
Obr. 13 Indukčnostní senzor s otevřeným magnetickým obvodem a jeho charakteristika.....	27
Obr. 14 LVDT senzor [18].....	28
Obr. 15 Náhradní schéma senzoru a princip funkce.....	28
Obr. 16 Kontaktní kapacitní senzory.....	29
Obr. 17 Princip bezkontaktního kapacitního senzoru [19].....	30
Obr. 18 Princip PSD senzoru [1].....	31
Obr. 19 Princip CCD snímače a komerčně dostupný CCD senzor [22].....	32
Obr. 20 a) uspořádání snímače, b) čtyřnásobná interpolace, c) určení směru posuvu [1].....	33
Obr. 21 Provedení inkrementálního enkodéru a princip detekce směru otáčení [23].....	34
Obr. 22 a) kotouč s pěti snímači, b) 4bitový standardní kód, c) 3bitový Grayův kód [23].....	35
Obr. 23 Princip triangulačního senzoru [24].....	35
Obr. 24 Potenciometrický senzor FWA100T [26].....	37
Obr. 25 Ultratenký odporový senzor Vishay UIPMA [27].....	38
Obr. 26 Optický senzor CNY70 [28].....	39
Obr. 27 Blokové schéma obvodového řešení.....	41
Obr. 28 Blokové rozložení snímačů.....	42
Obr. 29 Konstrukce mechanického posuvníku.....	43
Obr. 30 Mechanická konstrukce přípravku.....	44
Obr. 31 Řídící deska.....	45
Obr. 32 Konektorová DPS (vlevo) a senzorová DPS (vpravo).....	46
Obr. 33 Finální podoba měřícího přípravku.....	46
Obr. 34 Blokový diagram hlavní programové smyčky.....	47
Obr. 35 Blokový diagram obsluhy přerušení cyklicky vyvolávaného čítačem.....	48
Obr. 36 Výstupní signály z tvarovačů určených pro senzory CNY70.....	49
Obr. 37 Ukázka dat přijímaných na PC v programu Termite.....	50

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Statické a dynamické parametry senzorů [4], [5].....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 2 Parametry senzoru FWA100T [26]</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 3 Parametry senzoru Vishay UIPMA150I472XCB [27]</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 4 Parametry senzoru CNY70, převzato z [28]</i>	<i>39</i>

Úvod

S rozvojem techniky se do průmyslu rozšířilo i velké množství senzorů. S pozičními senzory se v dnešní době setkáváme i v běžném životě. Široké uplatnění nacházejí tyto senzory v mnoha zautomatizovaných procesech. Konkrétně měření mechanické polohy nacházíme téměř ve všech aplikacích, například v zabezpečovacích systémech (magnetický kontakt na dveřích), hlídání pozice vačkové hřídele ve spalovacích motorech, laserové měřicí přístroje, nebo různé měření polohy u dopravních pásů. Škála využití senzorů pro měření je vskutku široká. Samozřejmě základem je použití správného senzoru a jeho správná konfigurace pro daný typ aplikace. Neméně důležité je bezpochyby i vyhodnocení a zpracování výstupních signálů. Právě zde vyvstávají otázky ohledně principu funkce senzoru, způsobu generování signálu a možnosti jejich zpracování.

Z těchto důvodů vzešel požadavek na sestavení přípravku, na kterém lze studenty seznámit se základními principy. Studenti si díky měřicímu přípravku prakticky ověří, že daný senzor skutečně funguje tak, jak je uvedeno v knihách a katalogových listech výrobců. Budou si moci zobrazit signály na zobrazovacích zařízeních a proměřit jejich parametry. Zkušenosti získané při konfrontaci s pozičními senzory mohou následně uplatnit v budoucí praxi.

Cíle práce

Jak je uvedeno výše, široké spektrum aplikací pozičních senzorů evokuje nutnost zahrnutí vysvětlení jejich principů v učebních osnovách technických oborů. Z tohoto důvodu si práce klade za cíl vysvětlení jednotlivých principů a seznámení s běžně používanými typy senzorů. Zároveň je velmi důležité provést i základní rozdělení senzorů a zdůraznit, kde se konkrétní senzory využívají. Práce bude primárně zaměřena na lineární měření polohy.

Hlavním cílem však bude praktická část. Ta se na základě rešerše bude zabývat výběrem tří typů cenově dostupných senzorů s měřícím rozsahem 0-150 mm. Po výběru senzorů bude následovat mechanický návrh zařízení a návrh DPS (Deska Plošných Spojů) včetně realizace a osazení součástkami. Důraz bude kladen na jednoduché ovládání, bezpečnost, možnost připojení běžně dostupných přístrojů a celkovou cenovou dostupnost.

Výsledkem práce bude přípravek nahrazující dosavadní zařízení, které se využívá k výuce, ale, bohužel již nevyhovuje požadavkům na výuku. Přípravek bude orientován na názornou ukázkou funkce senzorů s možností připojení laboratorních přístrojů pro sledování signálů produkovaných senzory. K přípravku bude zároveň vytvořen návod pro laboratorní cvičení.

1 Senzor

Senzorem, někdy též snímačem, se nazývá zařízení, pomocí kterého lze zaznamenat okamžitou hodnotu fyzikální, chemické nebo biologické veličiny. Pomocí senzoru se měřená veličina mění na veličinu elektrickou, kterou lze dále přenášet a zpracovávat. Mezi nejčastější výstupní veličiny se řadí analogový signál nebo číslicový elektrický signál. Senzor představuje vstupní funkční blok v měřícím řetězci. Senzor musí být v přímém kontaktu s měřeným prostředím, čehož je dosaženo citlivou částí senzoru. Tato část senzoru se nazývá čidlo [1].

1.1 Dělení senzorů

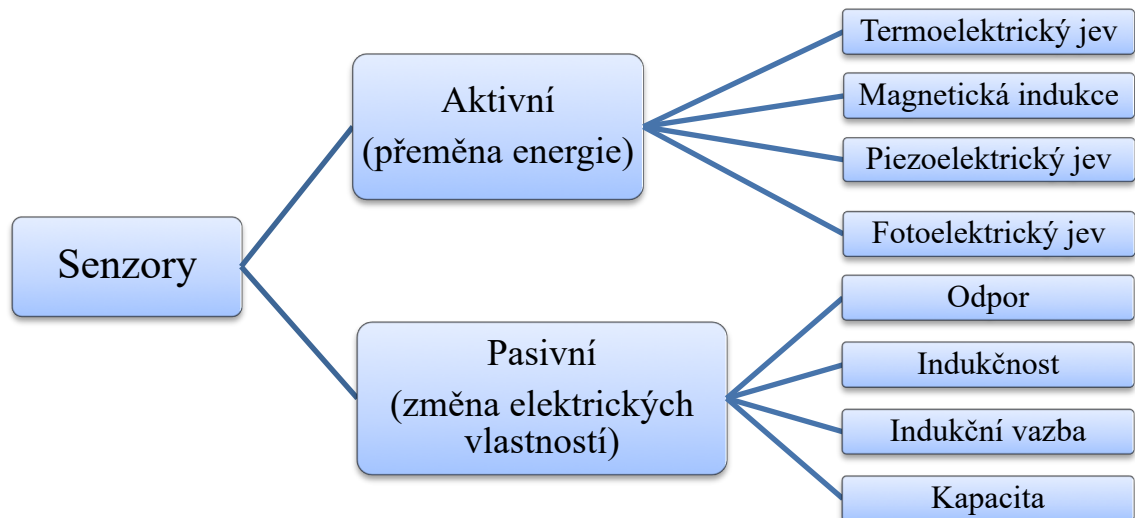
Senzory lze rozdělit podle různých kritérií a to následovně:

- podle fyzikálního principu (odporové, indukční, kapacitní, magnetické atd.)
- podle měřené veličiny (teplota, tlak, poloha, otáčky, pro radiační veličiny apod.)
- podle styku s měřeným prostředím (bezdotykové, dotykové)
- podle výrobní technologie (elektromechanické, mechanické, elektrické, pneumatické atd.)
- podle transformace signálu (aktivní, pasivní)

Z pohledu přeměny neelektrické veličiny na elektrickou (při zachování energetické bilance) je pro tuto práci důležité členění na aktivní a pasivní senzory.

Aktivním senzorem se rozumí takový senzor, který se chová jako zdroj elektrické energie vlivem působení snímané veličiny. Aktivní senzory tedy přeměňují energii neelektrických veličin (mechanickou, světelnou, tepelnou a chemickou) přímo na energii elektrickou, přičemž využívají některý z transformačních jevů (fotoelektrický, piezoelektrický, elektrochemický a další). Mezi aktivní senzory se řadí například indukční senzory.

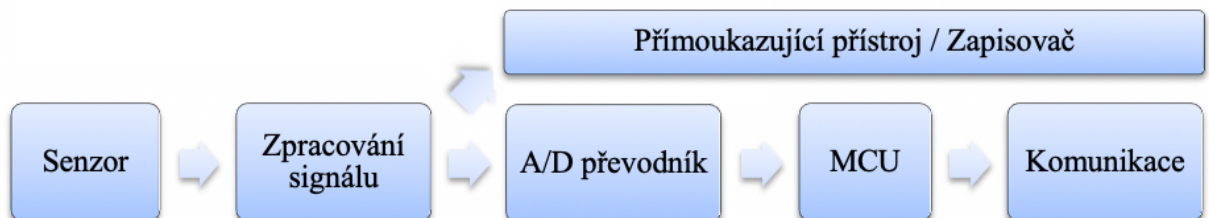
Pasivní senzor je naopak senzor, který pro svoje fungování nezbytně potřebuje napájení. Zde dochází vlivem neelektrických veličin, jako jsou teplota, akustický tlak, mechanická poloha, zrychlení a mnoho dalších, ke změně elektrických vlastností (indukčnosti, kapacity a odporu) [2], [3].



Obr. 1 Rozdělení senzorů [3]

1.2 Měřicí řetězec

Signál získaný senzorem je třeba v některých případech zesílit se zachováním dostatečného odstupů signálu od šumu. Toho lze dosáhnout speciálním zapojením zesilovačů, frekvenčním omezením signálu, jeho modulací ve vysílači a následnou demodulací v přijímači. Všechny tyto funkce zajišťuje blok *Zpracování signálu*, jak lze vidět na *Obr. 2* [1], [2].



Obr. 2 Blokové schéma měřicího řetězce A/D převodem a číslicovým zpracováním signálu [1]

Po digitalizaci analogového signálu následuje zpracování výsledku v MCU (mikrokontrolér). Transformace neelektrické veličiny na elektrickou je značnou výhodou, jelikož můžeme se signály pracovat pomocí matematických operací (derivace, integrace, sčítání, násobení, aj.) a signálových operací (analogová nebo digitální filtrace, frekvenční analýza pomocí rychlé Fourierovy transformace, autokalibrace aj.) [1], [2].

Výstupy řetězce lze realizovat analogově nebo číslicově. V prvním případě se jeví jako nejjednodušší případ přímoukazující přístroj nebo zapisovač. Pro přenos dat lze použít unifikaci signálu nebo modulátor, přičemž unifikace analogových signálů je standardizována na hodnoty $U = 0-10\text{ V}$, $I = 0-20\text{ mA}$ a případně $I = 4-20\text{ mA}$ [1], [2].

1.3 Parametry senzorů

Na senzor, jakožto vstupní část měřicího řetězce, jsou z důvodu přesnosti kladeny vysoké nároky. Při výběru senzoru se vychází z požadavku kladeného na určitý typ pro konkrétní aplikaci. Zde se požadavky zákazníků mohou začít rozcházet a volí se kompromis, přičemž většinou vítězí poměr cena/výkon. Základní požadavky zákazníků jsou mimo jiné: dostatečná citlivost senzoru, vhodný průběh základních statických charakteristik, dostatečná přesnost, nezávislost na vlivech okolního prostředí, minimální zatěžování měřeného objektu, vysoká spolehlivost, nízká cena a náklady na provoz a také jednoduchá obsluha [4].

Typické parametry a charakteristiky popisující statické a dynamické chování senzorů jsou uvedeny v *Tab. 1* [4], [5].

Tab. 1 Statické a dynamické parametry senzorů [4], [5]

Statické parametry	Dynamické parametry
Přesnost	Rozsah měření
Citlivost	Šum
Rozlišovací schopnost	Nestabilita a drift
Práh citlivosti	Časová konstanta
Linearita	Šíře frekvenčního pásma
Zkreslení	Rychlost přenosu
Hystereze	Přechodová charakteristika
Reprodukovatelnost	Frekvenční charakteristika
Dynamický rozsah	Rychlostní charakteristika
Statická přenosová charakteristika	Impulsní charakteristika

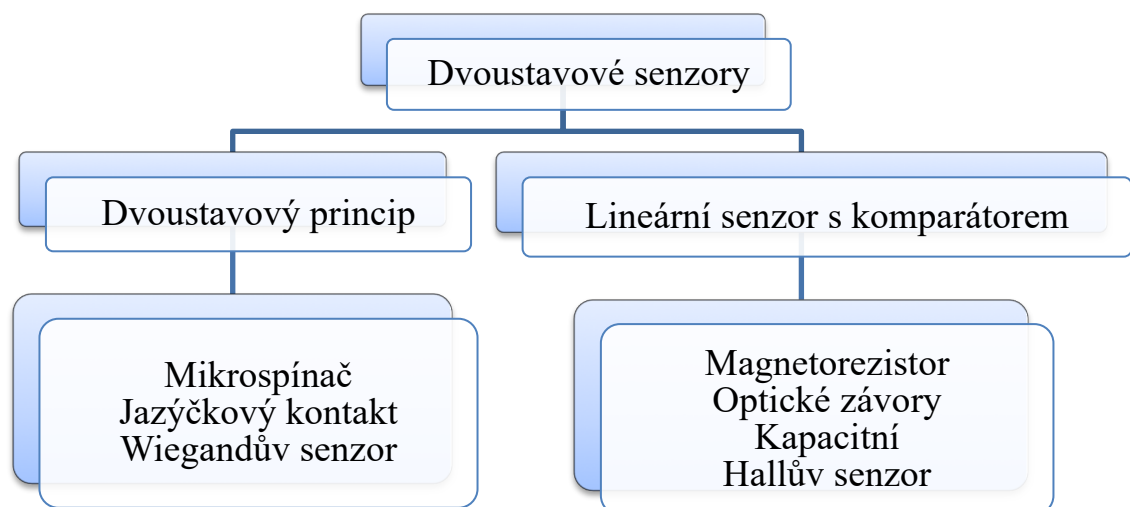
Na senzory působí i rušivé vlivy, které se snažíme potlačovat vhodnou konstrukcí senzoru. Mezi tyto vlivy patří například teplota, tlak, vlhkost nebo radiace. Z hlediska chyb se musí brát zřetel na vazby senzoru se zbylými částmi systému. Mezi nejpoužívanější metody omezení chyb se řadí metoda kompenzačního senzoru, metoda diferenčního senzoru, metoda zpětnovazebního senzoru, metoda sériového zapojení linearizačního členu, metoda linearizace při číslicovém zpracování signálu, metoda automatické kalibrace, metoda filtrace, metoda posunu spektra a metoda korekce dynamických chyb senzoru [2], [6].

2 Měření mechanické polohy

Mechanická poloha zobrazuje prostorové určení tělesa vzhledem k referenčnímu bodu. Sensory pro měření polohy se vyrábí v rotačním nebo lineárním provedení. Sensory můžeme dělit podle výstupu následovně:

- se spojitým výstupem
 - odporové
 - indukčnostní
 - kapacitní
 - ultrazvukové
 - optické
- s binárním výstupem (inkrementální nebo absolutní)
 - optické
 - magnetické

Další kategorii dělení senzorů představují dvoustavové senzory (polohové spínače). Tyto senzory jsou nyní nejvíce využívány díky jejich binárnímu výstupu ve formě logického signálu, otevřeného kolektoru či prostého spínacího kontaktu. Spínače tohoto typu pracují buď přímo na dvoustavovém principu nebo využívají senzor polohy se spojitým výstupem a komparátorem na výstupu. Sensory polohy se nepoužívají pouze pro měření lineární polohy, ale také pro měření úhlové polohy a zrychlení. Své uplatnění poté nalézají v automobilovém průmyslu. Například pro řízení spalování motorů se využívají magnetické senzory kvůli své robustnosti a spolehlivosti. Sensory využívající vířivých proudů se používají v místech, kde není možno umístit permanentní magnet přímo na měřený objekt nebo není-li objekt z feromagnetického materiálu. Pro nevodivé materiály se využívají kapacitní či případně ultrazvukové senzory. Rozdělení dvoustavových senzorů je zobrazeno na Obr. 3 [7], [8].

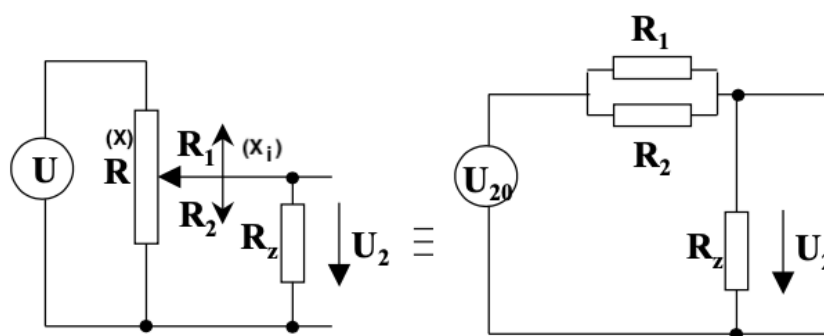


Obr. 3 Rozdělení dvoustavových senzorů [8]

2.1 Odporové senzory

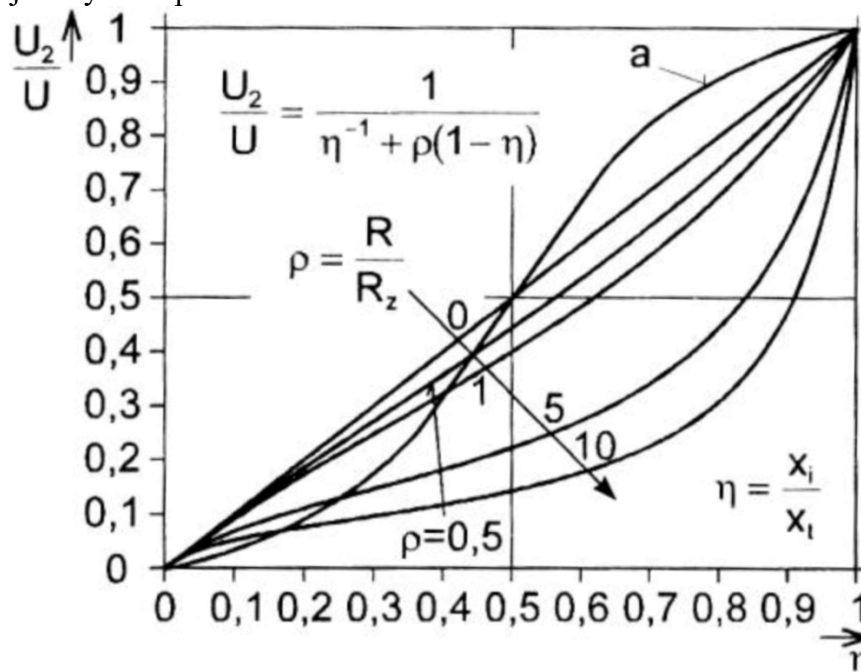
Odporové senzory využívají odporové potenciometry s pohyblivými jezdcí, které jsou ovládány mechanicky měřenou veličinou. Příkladem je jezdec připojený k pohyblivé matici na závitové tyči. Vodivé dráhy precizních potenciometrů se vyrábějí z odporového drátu či z častěji používaných vodivých plastů. V praxi patří mezi nejpoužívanější potenciometry tyto tři druhy: s rotačním pohybem jezdcí pro úhlové posunutí, s přímočarým pohybem pro lineární posuv nebo polohu a se spirálovým pohybem pro úhlovou polohu s velkou rozlišovací schopností [2].

Odporový senzor je vlastně napěťový dělič, kde dělicí poměr určuje měřená poloha. Pro měření se používá potenciometrické zapojení na Obr. 4, jelikož dokáže oproti reostatovému zapojení vyloučit chyby způsobené změnami rezistivity odporové dráhy (vlivem teploty).



Obr. 4 Potenciometrické zapojení (náhradní schéma odporového senzoru polohy) [2]

Z tohoto zapojení vychází převodní charakteristika viditelná na Obr. 5.



Obr. 5 Převodní charakteristika [2]

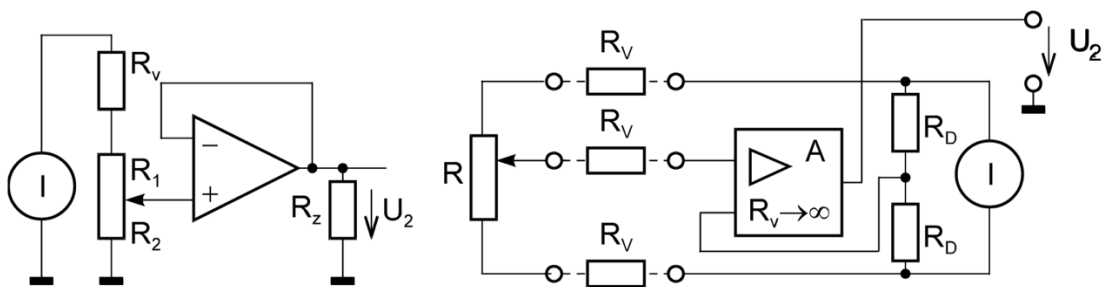
Ze schématu lze odvodit vztah převodní charakteristiky v následující formě:

$$\frac{U_2}{U} = \frac{1}{\eta^{-1} + \rho(1 - \eta)} [-], \quad (1)$$

kde U [V] značí napětí zdroje, U_2 [V] výstupní napětí, $\eta = \frac{X_i}{X}$ [-] reprezentuje poměr mezi vzdáleností jezdce od počátku odporové dráhy X_i [mm] a celkové délky odporové dráhy X [mm] a $\rho = \frac{R}{R_2}$ [-] představuje poměr odporů.

Přenos $\frac{U_2}{U}$ je lineární funkcí polohy jezdce pro nezatížený potenciometr. Chyba nelinearitou pro zatížení $R_z = R$ [Ω] může dosahovat až 12 %. Poměru $R/R_z = 0,1$ dovoluje pokles až na 1,5 %. Vztah 2.1 platí pouze při rovnoměrném délkovém rozložení odporu dráhy.

Pro vyloučení vlivu odporu přívodů R_v [Ω] se využívá měřících obvodů s velkým vstupním odporem a proudovým napájením, viz *Obr. 6*. Chybu nelinearity i při velkém poměru ρ (na *Obr. 5* křivka *a*) lze zmenšit zapojením rezistoru s odporem $R_{lin} = R_z$ [Ω] mezi jezdec a horní konec potenciometru [2].



Obr. 6 Měřící obvody pro odporový senzor polohy (zleva napěťový sledovač, můstek) [2]

Potenciometry využívané pro odporové senzory polohy mají specifické vlastnosti a existuje několik druhů potenciometrů. Rozdělují se do skupin podle tvaru odporové dráhy, podle materiálu odporové dráhy a podle pohybu jezdce. Nejdůležitějšími parametry potenciometrů jsou [9]:

- **Rozlišovací schopnost** – udává jaký úhlový (dédkový) inkrement potenciometr rozlišuje. Největší rozlišení nalezneme u senzorů vrstevových (až 0,01 %) a v případě vinutých závisí rozlišení na skokové změně odporu při pohybu jezdce mezi sousedními závity.
- **Linearita** – největší odchylka U_{OUT} od vztažné přímky, v procentech napájecího napětí.
- **Životnost** – počet otočení hřídelkou při zadaných provozních podmínkách a parametrech dosahuje u vinutých typů řádově 10^6 a pro vrstevové a hybridní typy 10^7 .
- **Šum** – vzniká při pohybu jezdce po vinutí. Způsobují ho mechanické i elektrické efekty. U vinutých potenciometrů může být způsoben odskakováním jezdce. Špatný vliv mají také nečistoty při styku jezdce s odporovou vrstvou, například vlhkost při špatném zapouzdření [2], [9].

2.2 Senzory polohy se skokovou změnou odporu (elektrokontaktní)

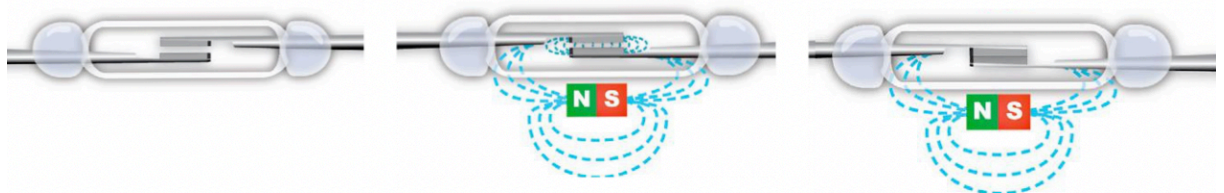
Senzory tohoto typu převádějí změnu polohy na změnu odporu skokově. Převod je zajištěn přepínáním jednoho kontaktu nebo celého pole kontaktů nacházejících se na dráze pohybu. Výstupní signál je typu sepnuto – rozepnuto. Kontakty se podle způsobů ovládaní dělí na dva typy: mechanicky ovládané a ovládané magnetickým polem. Mezi nejvíce využívané mechanické kontakty patří koncové spínače, jinak se tyto spínače pro měření polohy nevyužívají. V následujících podkapitolách tak budou popsány nejvyužívanější a nejrozšířenější typy magnetických senzorů. Jde o dvoustavové senzory, mezi které patří:

- jazýčkové kontakty
- Hallovy senzory
- magnetorezistory
- indukční senzory
- Wiegandův senzor

2.2.1 Jazýčkové kontakty

Magnetické senzory a spínače využívají magnetické pole, které se vytváří pomocí permanentního magnetu. Magnet bývá nejčastěji součástí senzoru, ale může být také připevněn k měřenému objektu. Změnou magnetického toku dochází ke změně magnetického pole.

Jazýčkové kontakty (též známé jako Reedovy kontakty) jsou nejjednodušší variantou magnetických spínačů. Využívají se pro jednoduché polohovací aplikace například jako dveřní spínač v zabezpečovací technice. Z názvu vyplývá, že pracují na Reedově principu. Jazýčkový kontakt se skládá ze dvou magneticky měkkých kontaktů, které jsou zapouzdřeny ve skleněné baňce společně s inertním plynem. Kontakty pokryté vzácnými kovy jsou ovládaný magnetickým polem permanentního magnetu. Elektrická indukce způsobená přiloženým magnetickým polem vytvoří v kontaktech opačnou magnetickou polaritu, která svými protikladnými póly kontakty přitáhne a dojde k elektricky vodivému spojení. Reedův kontakt se vyrábí v provedení NO (Normally Open). Spínací vzdálenost je závislá na magnetu, přičemž maximum je 10 cm. Doba sepnutí se pohybuje kolem 1 ms [1], [10].



Obr. 7 Reedův kontakt při spínání [10]

2.2.2 Hallův senzor

První plně integrovaný křemíkový snímač využívající Hallův jev byl vyvinut v roce 1955, ačkoliv samotný jev byl objeven již v roce 1879 Edwinem Hallem. Magnetické senzory s Hallovým efektem jsou ovládány Hallovým napětím:

$$U_H = R_H \frac{BI}{d} \text{ [V]}, \quad (2)$$

kde R_H [$\text{m}^3\text{A}^{-1}\text{s}^{-1}$] značí Hallovu konstantu, B [T] velikost magnetické indukce, I [A] velikost protékajícího proudu a d [mm] označuje tloušťku materiálu. Směr elektrického proudu I je vychylován v závislosti na velikosti indukce magnetického pole B , které je kolmé na křemíkovou destičku, tzv. Hallův element, a výsledkem je generování právě Hallova napětí.

Zesilovač napětí U_H tvoří společně s obvody senzoru, a Hallovým elementem o ploše přibližně $1,5 \text{ mm}^2$, jeden integrovaný obvod. Hojně využívána je technologie CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) z důvodu nízké ceny. Hallovy spínače mívají různé spínací charakteristiky a různě vymezené frekvenční oblasti. Využívají se i snímače v diferenčním provedení obsahující dvě a více Hallových sond. Hodnoty spínacích polí se pohybují v rozmezí 1 až 10 mT.

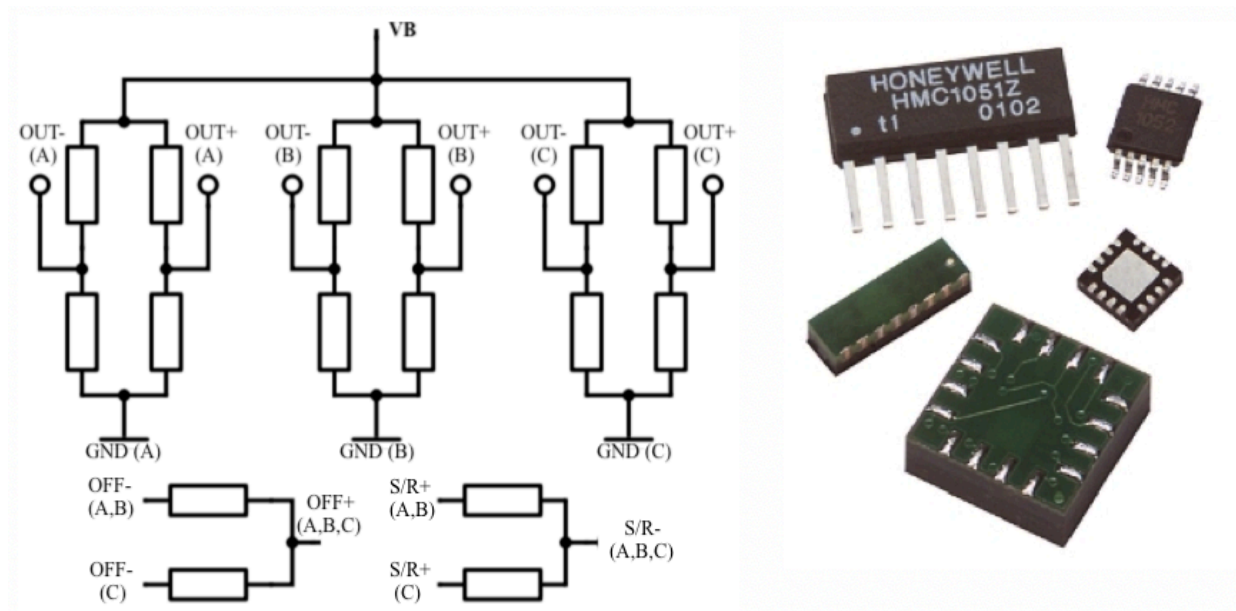
Hallovy senzory nacházejí uplatnění v automobilovém průmyslu pro řízení spalovacích motorů, pro měření a detekci pohybu, přiblížení a umístění. Pro měření pohybu a přiblížení se používají díky možnosti miniaturizace. Lze tak měřit velmi malé objekty generující stálé magnetické pole či případně objekty feromagnetické. Feromagnetické materiály se v kombinaci s magnetem nazývají vychýlený Hallův senzor, jehož typické využití je v počítačových klávesnicích. Jednotlivá klávesa nebo tlačítko obsahuje malý magnet a stisknutí je detekováno dostatečným přiblížením k Hallovu senzoru [2], [11].

2.2.3 Magnetorezistory

Polovodičové magnetorezistory využívají změny elektrického odporu prostřednictvím jevu AMR (Anizotropní Magnetické Resistance), který se využívá v AMR senzorech. V některých aplikacích nahrazují Hallovy senzory, jelikož vynikají vyšší citlivostí, magnet může být menších rozměrů a vzdálenost mezi senzorem a měřeným objektem naopak větší. To je výhodné z hlediska hromadné výroby. Při AMR jevu dochází ke změně elektrického odporu tenké vrstvy permalloy při vložení do podélného magnetického pole. Ke změně odporu dochází již při změnách indukce v řádech μT až mT a s rostoucí hodnotou poté odpor téměř lineárně klesá. Pokles je přibližně o 3 % původní hodnoty odporu materiálu ve stavu bez přiloženého magnetického pole. S rostoucí silou je již hodnota neměnná. AMR senzor

reaguje na podélné horizontální siločáry neohledě na jejich směr. Nerozlišuje severní a jižní magnetický pól a díky tomu je nezávislý na směru magnetického pole. Oproti tomu Hallův senzor reaguje na kolmé magnetické siločáry. Snímací rozsah závisí na snímacím elementu, konkrétně na tvaru, složení a rozměrech.

V praxi senzor netvoří pouze samostatný permalloy, ale využívá se zapojení 4 snímacích odporových elementů do Wheatstonova můstku a jeho následná implementace do jediné součástky. Pro vícesou detekci se používá vícemůstkových zapojení. AMR senzory se používají díky své vysoké citlivosti pro měření magnetického pole Země a jsou integrovány v různých detektorech a vyhledávacích aktivních vodičů. Při měření lineárního nebo rotačního pohybu se AMR senzory využívají jako snímače magnetické pásky nebo kotouče. Použitelné jsou i pro konstrukci kompasů [12].



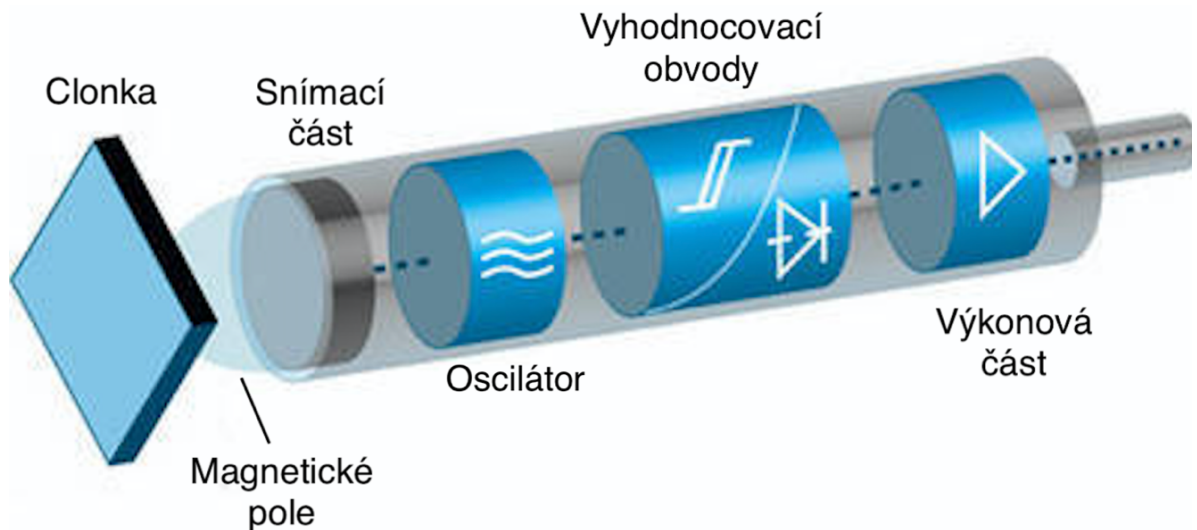
Obr. 8 Vnitřní zapojení 3D AMR senzoru firmy Honeywell a možnosti provedení [12]

2.2.4 Indukční senzory

Indukční snímače patří mezi aktivní senzory. Nejčastěji se vyrábějí v bezkontaktním provedení a běžně se skládají z několika za sebou řazených elektrických bloků, mezi které patří oscilátor, vyhodnocovací obvody a koncový stupeň. Základním prvkem snímače je oscilátor využívající principu změny činitele jakosti jádra Q při přiblížení kovového materiálu. Tuto změnu lze pozorovat útlumem kmitů oscilátoru až úplným zastavením kmitání. Prahový detektor ovládá výkonový koncový stupeň skrze klopný obvod. Obnovení kmitů se docílí odstraněním kovového objektu z aktivní spínací zóny [13].

Hlavní část senzoru představuje cívka společně s kondenzátorem. Cívka zabírá polovinu jádra feritového hrníčku. Vysokofrekvenční střídavý proud, vygenerovaný oscilátorem, protéká

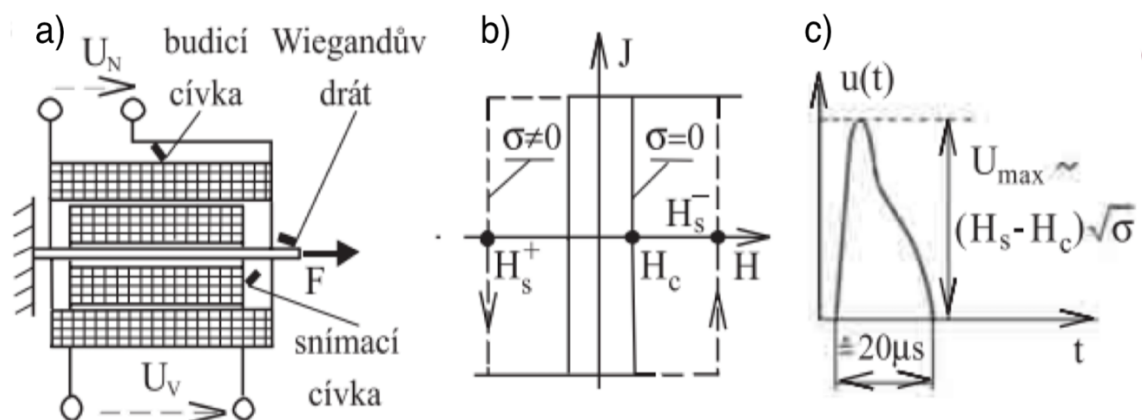
cívkou a tím vytváří magnetické pole vystupující z otevřené strany hrníčku. Otevřená strana hrníčku se nazývá aktivní plocha senzoru a pokud se v její blízkosti vyskytuje elektricky vodivý materiál (tlumící clonka), deformuje se magnetické pole. V clonce se indukují vířivé proudy, které způsobí změnu magnetického pole. To působí zpátky na cívku vlivem vzájemné indukčnosti M tak, že změní svoji impedanci. Výrazná změna nastává teprve až při malých vzdálenostech mezi cívkou a clonkou, a to řádově v jednotkách až desítkách mm [13].



Obr. 9 Uspořádání indukčního senzoru firmy Baumer [14]

2.2.5 Wiegandův senzor

Jedná se o speciální typ indukčního snímače využívajícího Barkhausenova jevu, během kterého dochází k rychlým změnám napětí v cívce s feromagnetickým jádrem při pomalém přemagnetování vnějším polem. Impulzy napětí (Barkhausenovy šумы) odpovídají překlápění magnetických domén při magnetizaci feromagnetika. Magnetizace při pomalém přemagnetování tak probíhá skokově. Tohoto jevu se využívá z důvodu nezávislosti tvaru a šířky impulsů na rychlosti změn magnetizace a rychlosti měřeného objektu [2].



Obr. 10 Wiegandův jev, a) princip, b) hysterezní smyčky, c) impuls Barkhausenova šumu [2]

2.3 Indukčnostní senzory

Indukčnostní senzory se řadí mezi senzory pasivní. Poloha se v nich převádí na změnu indukčnosti (při použití jedné cívky jde o tlumivkové senzory) nebo na změnu vzájemné indukčnosti (použití minimálně dvou cívek pro konstrukci transformátorových senzorů). Převod vychází z Hopkinsonova zákona [1].

Senzory lze rozdělit podle magnetického obvodu senzoru na:

- s malou vzduchovou mezerou
- na principu vířivých proudů (s potlačeným magnetickým polem)
- s otevřeným magnetickým polem
- snímače bez feromagnetika

nebo je lze rozdělit podle uspořádání na jednoduché a diferenciální [1], [15].

Impedanci senzoru s cívkou o N [-] závitěch určíme z obecného vztahu pro impedanci:

$$Z(j\omega) = R + j\omega \frac{N^2}{Z_m} = R + j\omega \frac{N^2}{R_m + jX_m} = R + \frac{N^2\omega X_m}{|Z_m(j\omega)|^2} + j \frac{N^2\omega R_m}{|Z_m(j\omega)|^2} \quad [\Omega], \quad (3)$$

kde R_m [H^{-1}], X_m [H^{-1}] představují činnou a jalovou složku komplexní magnetické reluktance $Z_m(j\omega)$ a R [Ω] ohmický odpor. Druhý člen výsledného výrazu reprezentuje ztráty vířivými proudy a hysterezí a je podstatný pro senzory s vířivými proudy. Třetí člen je důležitý pro senzory s proměnnou reluktancí a představuje indukčnost [1]. Další typy senzorů jsou indukčosyny, pro měření posuvů a selsyny, pro měření úhlu natočení.

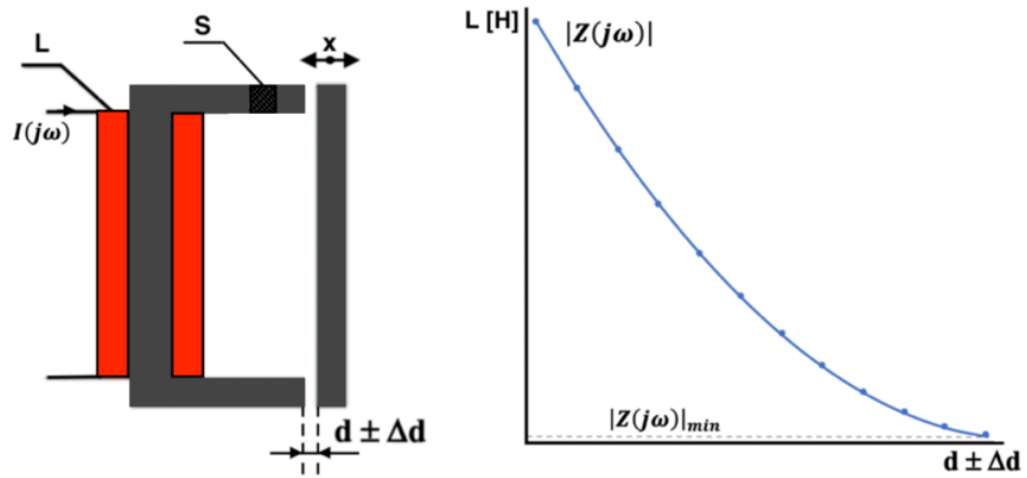
2.3.1 Indukčnostní senzory s malou vzduchovou mezerou

Indukčnostní senzory s malou vzduchovou mezerou se vyznačují hyperbolickou závislostí indukčnosti L [H] na velikosti vzduchové mezery d . Z toho důvodu se senzory používají v rozsahu malých vzduchových mezer, kde lze považovat převodní charakteristiku za lineární. Senzor se skládá z feromagnetického jádra typu UI, na kterém je navinuta cívka. Mezi pevnou částí U a pohyblivou I se přes vzduchovou mezeru uzavírá magnetický obvod. S pohyblivou částí (kotvou) se pohybuje měřený objekt a dochází ke změně impedance Z vlivem změny vzduchové mezery – konkrétně její velikosti nebo plochy. Změnou impedance se zároveň mění měřitelný proud v cívce. Impedanci cívky lze určit dle následujícího vzorce:

$$Z = j\omega \frac{\mu_0 S N^2}{2d} \quad [\Omega], \quad (4)$$

kde je ω [rad/s] úhlová frekvence, μ_0 [H/m] permeabilita vzduchové mezery, S [mm^2] průřez jádra, N počet závitů, d velikost vzduchové mezery [17].

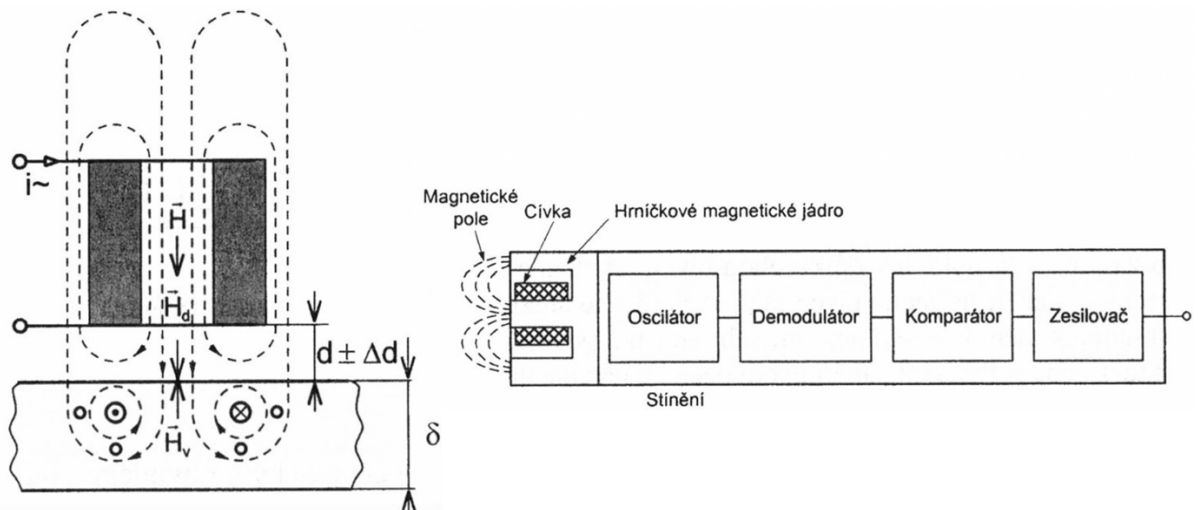
Obr. 11 zobrazuje jednoduché uspořádání senzoru a jeho charakteristiku, častěji se senzory využívají v diferenčním zapojení.



Obr. 11 Jednoduché uspořádání senzoru a jeho charakteristika

2.3.2 Indukční senzory na principu vířivých proudů

Princip těchto senzorů spočívá v indukování vířivých proudů. Snímač se skládá z válcové cívky, kterou prochází střídavý elektrický proud. Průchodem proudu se kolem cívky začne vytvářet magnetické pole působící na měřené objekty ve svém okolí. Siločáry střídavého magnetického pole cívky procházejí měřeným objektem s permeabilitou μ [H/m] a rezistivitou ρ [Ω m]. V objektu se začne objevovat magnetické pole vybuzevané indukovanými vířivými proudy. Vířivými proudy vyvolané magnetické pole má vlastní intenzitu a podle Lenzova zákona působí proti původnímu magnetickému poli cívky snímače. Interakcí těchto dvou polí dochází k potlačování intenzity původního pole, a tím ke zmenšení indukčnosti budící cívky a zvýšení jejích ztrát. Tyto senzory se také díky tomu nazývají senzory s potlačeným magnetickým polem. Tento princip společně s konstrukcí snímače zobrazuje Obr. 12 [1], [15].



Obr. 12 Princip snímače a jeho nejčastější konstrukce [1]

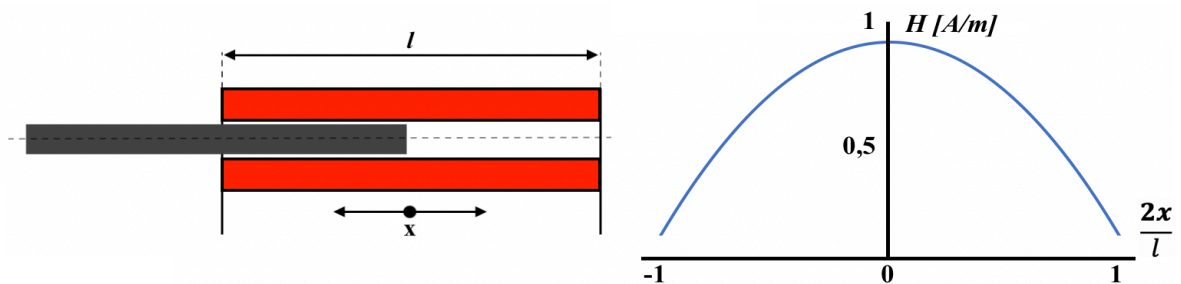
Pro indukčnostní senzory s využitím vířivých proudů se zavádí pojem hloubka vniku δ , která je dána vztahem:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \text{ [mm]} \quad (5)$$

Ze vztahu plyne, že pomocí snímače lze měřit kromě vzdálenosti i další vlastnosti předmětu mající vliv na velikost indukovaných proudů a magnetického pole. Fyzikálně pak hloubka vniku koresponduje se vzdáleností pod povrchem tělesa, ve které je magnetické pole utlumené na 37% intenzity povrchu. Při měření vzdálenosti se z důvodu nezávislosti na tloušťce materiálu d musí zvolit vhodná pracovní frekvence ω , aby platilo $d \gg \delta$ [1].

2.3.3 Indukčnostní senzory s otevřeným magnetickým polem

Indukčnostní senzor s otevřeným magnetickým polem se řadí společně s odporovými potenciometry k nejstarším typům senzorů. Ve většině případů se skládá z válcové cívky (častěji z několika cívek) a uvnitř posunujícího se feromagnetického jádra. Na Obr. 13 je k vidění jednoduchý typ senzoru a jeho charakteristika [16].



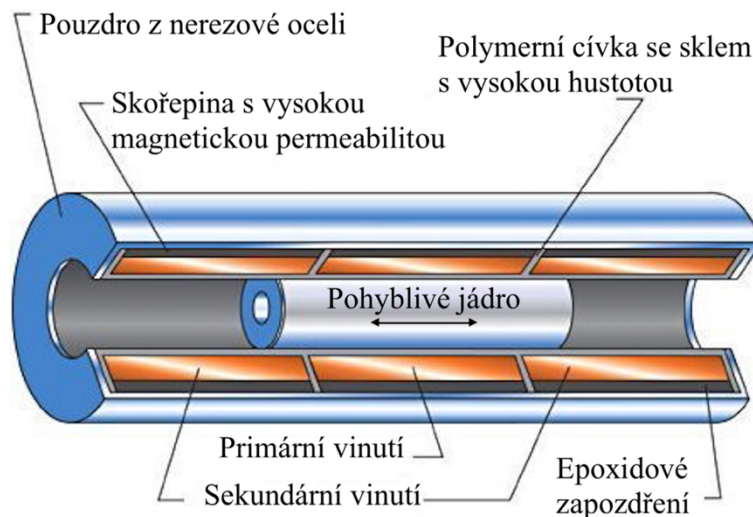
Obr. 13 Indukčnostní senzor s otevřeným magnetickým obvodem a jeho charakteristika

Jádro senzoru je připevněno k měřenému objektu a uvnitř cívky se pohybuje od středu ke krajům. Pohybem dochází ke změně intenzity magnetického pole a zároveň indukčnosti cívky. Nejčastěji se senzory s otevřeným magnetickým polem používají v diferenčním provedení.

2.3.4 LVDT

Zkratka LVDT (Linear Variable Differential Transformer) představuje senzor s otevřeným magnetickým obvodem v diferenčním provedení. Ze zkratky vyplývá, že senzor je transformátorového typu. V praxi se senzor skládá z pohyblivého jádra uvnitř válce tvořeného třemi cívkami. Jedna cívka tvoří primární vinutí a zbylé dvě sekundární. Sekundární cívky jsou zapojeny sériově v protifázi. Pohybem jádra se mění magnetický tok a velikost indukovaného napětí v sekundárních vinutích. Při vysunutí zasahuje jádro do jednoho sekundárního vinutí více, a tím lze na výstupu pozorovat střídavé napětí o frekvenci napětí

na primárním vinutí, avšak o amplitudě rovné rozdílů napětích sekundárních vinutí. Tím lze detekovat vzdálenost objektu. Díky fázovému posuvu o 180° lze elektricky rozeznat obě vinutí a určit směr posuvu. Rychlost změny amplitudy napětí na výstupu nám umožní měřit i rychlost pohybu objektu. Využití tyto senzory nalézají tam, kde nelze použít senzory s integrovanou elektronikou nebo v místech, kde jsou velmi náročné tepelné, radiační, tlakové a další podmínky [17], [18].



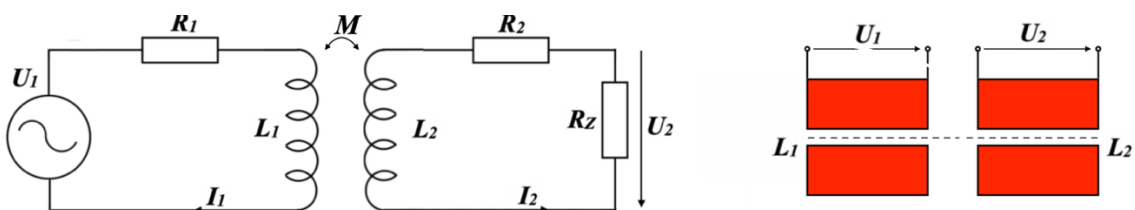
Obr. 14 LVDT senzor [18]

2.3.5 Indukčnostní senzory bez feromagnetika

Senzor bez feromagnetika se skládá nejméně ze dvou cívek. Jedná-li se o diferenční uspořádání, je snímač tvořen třemi cívkami. Uspořádání cívek musí umožňovat vzájemné přímočaré nebo úhlové posouvání. Snímač využívá transformátorového jevu, tedy napětí indukovaného vzájemným působením magnetických vazeb dvou obvodů. Výhodou snímače je nepřítomnost parazitních jevů vlivem absence feromagnetika v jádře. Díky tomu se dá senzor velmi přesně navrhnout podle matematických vzorců. Uplatnění senzory nacházejí při měření malých posuvů a malých rozměrů. Z náhradního schématu lze vypočítat výstupní napětí, které je nutné znát pro určení polohy objektu [17].

$$U_2 = U_1 \frac{n_2}{n_1} K \quad [V], \quad (6)$$

kde je n_2 [-] počet závitů sekundární cívky, n_1 [-] počet závitů primární cívky, K [-] konstanta závislá na parametrech cívky.



Obr. 15 Náhradní schéma senzoru a princip funkce

2.4 Kapacitní senzory

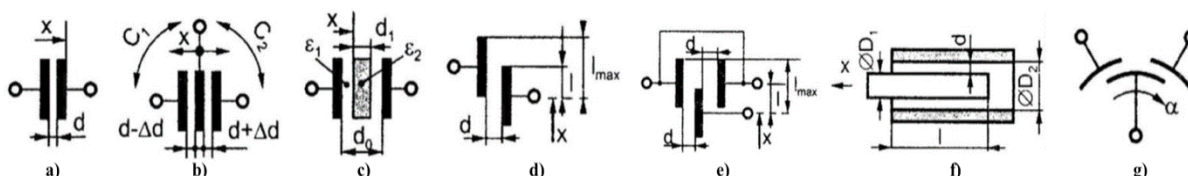
Kapacitní senzory se využívají v prostředích, kde měřené veličiny ovlivňují kapacitu kondenzátoru. Kapacita kondenzátoru se mění se změnou plochy elektrod S , vzdálenosti elektrod d nebo permitivitou prostředí ε . Kapacitní snímače vynikají malými rozměry a nízkou hmotností. Senzory mají malou kapacitu v řádech pikofaradů, a proto se zde vyskytuje problém při propojení senzoru s měřicími obvody. Ty totiž mají téměř totožnou kapacitu jako přívodní vodiče. Tento problém lze řešit zkrácením přívodů, ideálně umístit měřící obvod přímo do senzoru. V případech, kdy nelze obvod integrovat, se musí parazitní kapacity přívodu eliminovat speciálními obvody – můstkové a rezonanční metody nebo zpětnovazební obvody. Senzory se dělí do dvou základních skupin – kontaktní a bezkontaktní. Měřený objekt se u kontaktních snímačů připojuje přímo k elektrodě. U bezkontaktních senzorů je přítomnost měřeného objektu detekována pomocí deformace elektrického pole [1].

2.4.1 Kontaktní kapacitní senzory

Kontaktní kapacitní senzor tvoří kondenzátor s minimálně dvěma elektrodami. Jedna z těchto elektrod musí být pohyblivá a pevně spojená s měřeným objektem. Základní princip je založen na převodu měřené veličiny na kapacitu, která se dále převádí na zpracovatelný signál – napětí a proud. Stěžejním je obecně známý vzorec (7) pro výpočet kapacity deskového kondenzátoru s homogenním polem, podle kterého lze kontaktní senzory dělit a pozorovat jejich vlastnosti [1].

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} \text{ [F]}, \quad (7)$$

Kontaktní kapacitní snímače se používají v jednoduchém i diferenčním uspořádání a lze je třídit i podle tvaru elektrod na rovinné a válcové. Měřící rozsah těchto senzorů je v rozmezí mikrometrů až po stovky milimetrů. Rozdělení kontaktních snímačů je zobrazeno na Obr. 16. Pro odměřování polohy se jako nejvhodnější jeví deskový kondenzátor s proměnnou plochou překrytí [17].



Obr. 16 Kontaktní kapacitní senzory

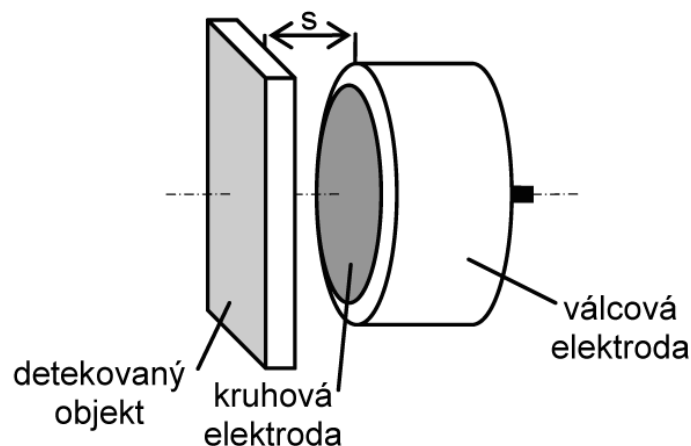
a) deskový jednoduchý s proměnnou mezerou, b) deskový diferenční s proměnnou mezerou, c) deskový s proměnnou tloušťkou dielektrika, d) deskový s proměnnou plochou překrytí, e) deskový diferenční s proměnnou plochou překrytí, f) válcový s proměnnou plochou překrytí, g) diferenční s proměnnou plochou překrytí [1]

2.4.2 Bezkontaktní kapacitní senzory

Výhodou bezkontaktních kapacitních senzorů je možnost detekce objektu z libovolného materiálu, tedy vodivé i nevodivé látky. Detekovat přiblížení předmětu dokáží snímače až na desítky mm. Uplatnění nacházejí při detekování nekovových materiálů (oproti indukčním, které detekují pouze vodivé materiály), v potravinářském průmyslu, strojním průmyslu, u textilních strojů, sledování hladiny v zásobnicích a v mnoha dalších aplikacích.

Ve válcovém provedení se obecně snímač skládá z několika bloků – RC oscilátor, vyhodnocovací obvody a výkonový stupeň [19].

Samotný senzor je tvořen válcovým pouzdem s kotoučovou elektrodou uvnitř. Kotoučová elektroda reprezentuje hlavní aktivní prvek kondenzátoru a válcové pouzdro slouží jako stínění. Společně tvoří kondenzátor o dané kapacitě, která se mění vlivem přiblížování objektu, tedy změnou dielektrika. V kombinaci s odporem vzniká RC oscilátor, který je rozladován kapacitou snímače. Z výstupního signálu oscilátoru je úpravami získána stejnosměrná složka, která se dále používá pro řízení výkonového spínacího stupně. Senzory jsou náchylnější na rušení elektromagnetickým střídavým polem (zářivky, rádiové vysílače atd.) a vykazují výraznou závislost na parametrech okolního prostředí (vlhkost, teplota) [19].



Obr. 17 Princip bezkontaktního kapacitního senzoru [19]

2.5 Optické senzory

Optické senzory se řadí mezi nejvyužívanější senzory pro detekci objektu nebo měření jeho posuvu, případně přiblížení. Díky schopnosti detekce většiny existujících materiálů, a možnosti měření až do 60 m u optických závor s laserovými diodami (u jednocestné optické závor až 350 m), nejvíce konkurují ultrazvukovým čidlům. Vezmeme-li v potaz možnost měření ve vakuu, mají optické snímače výrazně navrch, což lze vidět i na široké škále nabídky

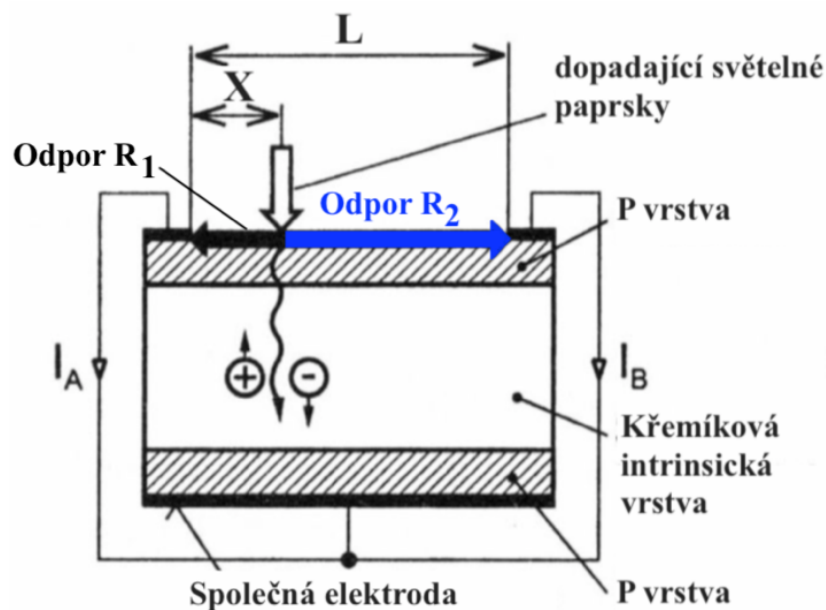
na trhu. V nabídkách výrobců lze nalézt různá provedení a podíl optických senzorů velmi často převyšuje ostatní typy senzorů [20].

Základní princip senzorů je založen na detekci intenzity paprsků světla dopadajícího na snímač, nebo pouze na detekci existence paprsků světla. Snímač tvoří přijímač a vysílač. Ve většině případů se obě části nachází v jednom pouzdře, kdy senzor pracuje na principu reflexe, ale není vyloučena konstrukce, kdy zdroj světla (vysílač) je oddělen od přijímače. Měřena je úroveň amplitudy nebo světelný výkon světla odraženého zpět do přijímače. Ten se následně porovnává s požadovanou hodnotou [20]. V následujících kapitolách budou stručně popsány nejvyžívanější snímače.

2.5.1 Polohově citlivé senzory (PSD)

Polohově citlivé detektory (Position Sensitive Detectors) lze považovat za zvláštní typ PIN fotodiody. Senzor určuje s přesností jednotek mikrometrů pozici dopadajícího světelného paprsku na rezistivní fotocitlivou plochu. Princip spočívá v generování párů elektron-díra v intrinsické (I) vrstvě velkoplošné fotodiody při dopadu světla na její čelní stranu. Na přechodu PI a NI dochází vlivem elektrického pole k posunu děr k vrstvě P a elektronů k vrstvě N. Generované páry nábojů lze chápat jako zdroj proudu v místě dopadu světelného paprsku. Porovnáním velikostí proudů ze svorek přijímače určujeme pozici. Velikost proudů se v závislosti na pozici dopadajícího paprsku spojitě mění [1], [2].

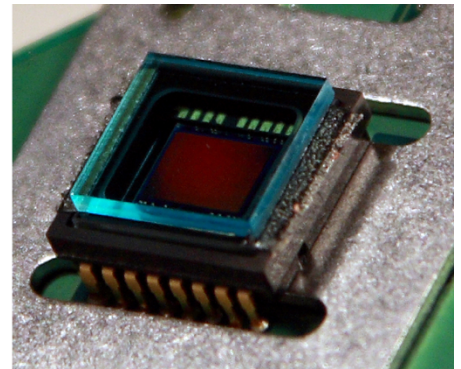
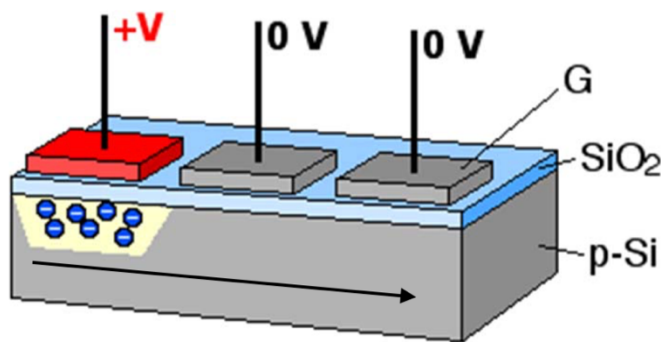
Snímače se využívají pro optické měření: předmětů (včetně 3D), pohybu a pozice, úhlů, výšky, dále pro kontrolu kvality povrchu a mnoho dalších aplikací [21].



Obr. 18 Princip PSD senzoru [1]

2.5.2 CCD senzory – senzory s nábojově vázanou strukturou

CCD (Charge-Coupled Devices) senzory jsou komerčně známy díky použití ve fotoaparátech a kamerách. Základem senzoru je MOS (Metal Oxide Semiconductor) kondenzátor, do kterého se akumuluje náboj vznikající při dopadu fotonů. Elektrodu směřující k dopadajícímu světlu tvoří vodivý polykrystalický křemík a odvrácenou elektrodu tvoří křemíková vrstva P nebo N. Dielektrikum je vyrobeno z vrstvy SiO_2 . Po připojení kladného napětí vznikají pod vrstvou dielektrika potenciálové jámy – místa ochuzená o díry. Každá jáma tvoří pixel senzoru. V jámách se ukládají elektrony generované dopadem fotonů. Velikost ukládaného náboje je úměrná intenzitě světelného paprsku a době, po kterou je senzor světlu vystaven. Náboj z pixelů se přenáší nábojovým posuvným registrem a následně je zesilován nábojovým zesilovačem [2].



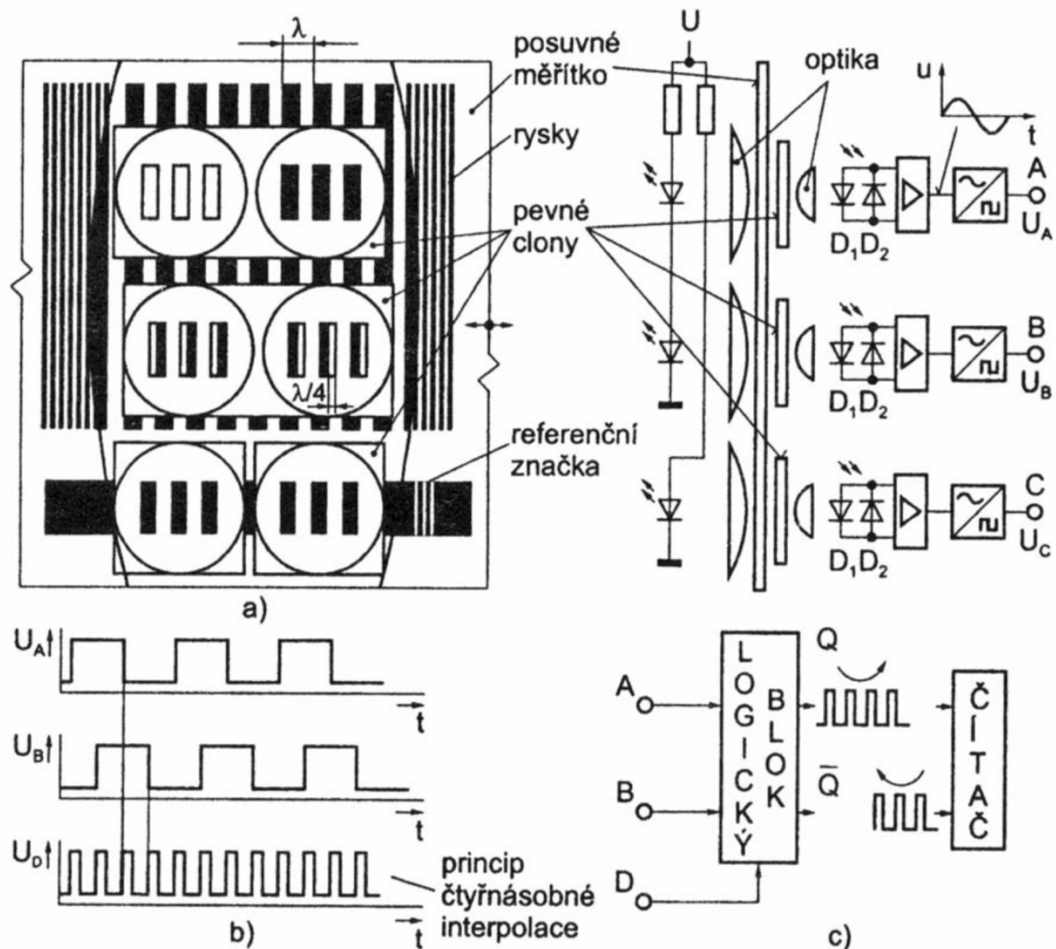
Obr. 19 Princip CCD snímače a komerčně dostupný CCD senzor [22]

2.5.3 Inkrementální optoelektronické senzory posuvu

Inkrementální (též přírůstkové) optoelektronické senzory snímají přírůstky dráhy z šachovnicových stupnic. Při čtení stupnice generují impulsy a počet načtených pulzů poté odpovídá vzdálenosti. Existují v lineárním a rotačním provedení. Senzor se skládá typicky ze zdroje světla v podobě LED (dioda emitující světlo), detektorů světla, optiky, skleněného pravítka a masek. Světlo ze světelného zdroje se upravuje optikou a dále směřuje k detektorům. Základní princip tkví ve clonění světelného paprsku mezi zdrojem a detektory – fotodiodami. Clonění se provádí pravítkem rozděleným na světlopropustné a reflexní části. Posunem o 1 krok (λ) nastane přerušování světelného paprsku dopadajícího po odrazu na detektor. Po úpravě výstupního signálu z detektoru na impuls unifikovaného tvaru dochází ke zvyšování obsahu čítače. Poloha je pak odvozena z obsahu čítače, který je nulován vždy v referenční pozici [2].

Pravítko se obvykle spojí s měřeným posuvem. Na pravítku je vytvořena stupnice z průsvitných a neprůsvitných pruhů a stejný motiv je vyneseno i na clonící masku. Senzor využívá tří soustav pruhů, clon a detektorů světla z důvodu určení směru posuvu a vynulování

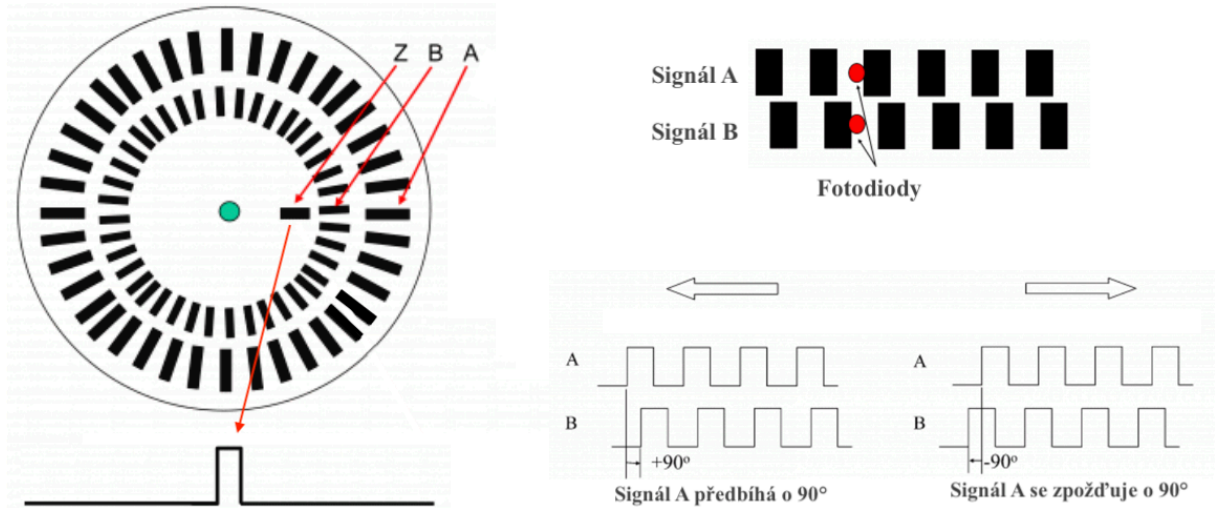
obsahu čítače při průchodu referenční pozicí. Všechny tři soustavy (kanály) mají jeden společný světelný zdroj. Při posuvu vzniká za zesilovacím blokem střídavý signál podobný sinusoidě vlivem antiparalelního zapojení fotodiod posunutých od $n\lambda + \lambda/2$. Směr posuvu se určí z posloupnosti signálů v kanálech A a B. Clona v kanálu B se posouvá o hodnotu $n\lambda + \lambda/4$. Signály napětí U_A a U_B , které jsou připojeny na vstupy klopného obvodu, nastavují výstup klopného obvodu Q do logické úrovně závislé na náběžných hranách obou kanálů. Směr čítání čítače řídí právě logický výstup Q. Pro zlepšení rozlišovacích schopností se využívá čtyřnásobná interpolace, která je vidět na Obr. 20. Třetí kanál (C) je využit pro určení referenčního bodu [1].



Obr. 20 a) uspořádání snímače, b) čtyřnásobná interpolace, c) určení směru posuvu [1]

Na totožném principu fungují i inkrementální rotační enkodéry. Obsahují disk s pravidelně se střídajícími reflexními a průhlednými obdélníky (úseky). Disk se otáčí zároveň s hřídelí motoru, ke které je připevněn. Jeden obdélník odpovídá jednomu kroku otočení. Světlo tak má umožněno průchod pouze přes průhledné úseky. Fotodiody se aktivují světelnými impulsy generovanými otáčením disku a dále se signály převádí na elektrické impulsy nebo obdélníkový signál [23].

Výstupem enkodéru jsou dva obdélníkové signály (kanál A a B), vzájemně posunuté o 90 elektrických stupňů. Z prvního signálu se určuje rychlost otáčení a z druhého signálu poté směr otáčení podle sekvence stavů z obou kanálů. Třetí signál určující nulovou polohu hřídele se značí Z a je obdélníkového tvaru a ve fázi se signálem A [23].

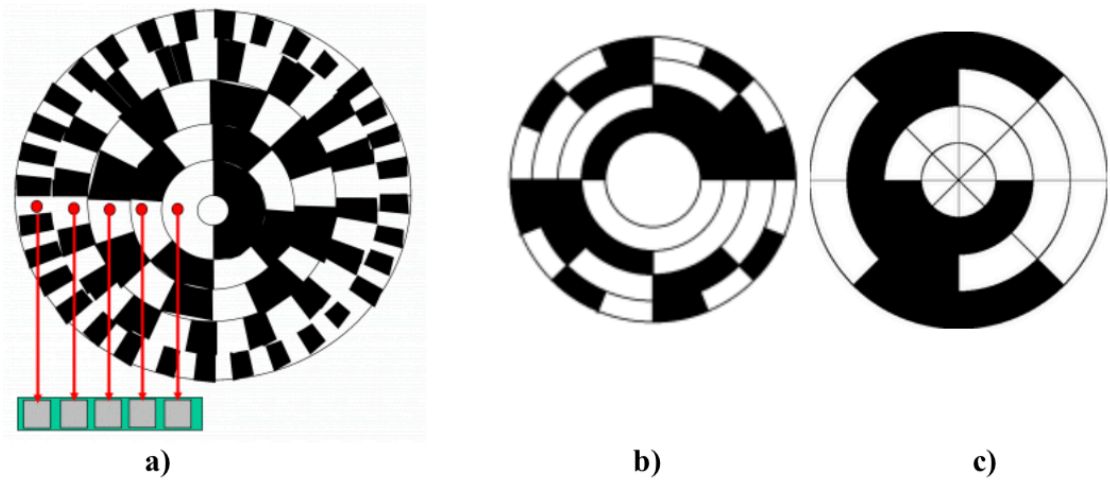


Obr. 21 Provedení inkrementálního enkodéru a princip detekce směru otáčení [23]

2.5.4 Absolutní optoelektronické senzory polohy s prostorovým kódem

Princip absolutních senzorů se od inkrementálních liší kódováním obrazců na kotouči. Díky tomu lze každé pozici přiřadit číselnou hodnotu. Pro kódování lze použít dva typy kódu: standardní binární a využívanější Grayův kód. Výhodou Grayova kódu je chyba hazardem maximálně 1 LSB (Least Significant Bit), protože při přechodu do následující pozice se kód mění pouze v 1 bitu [1].

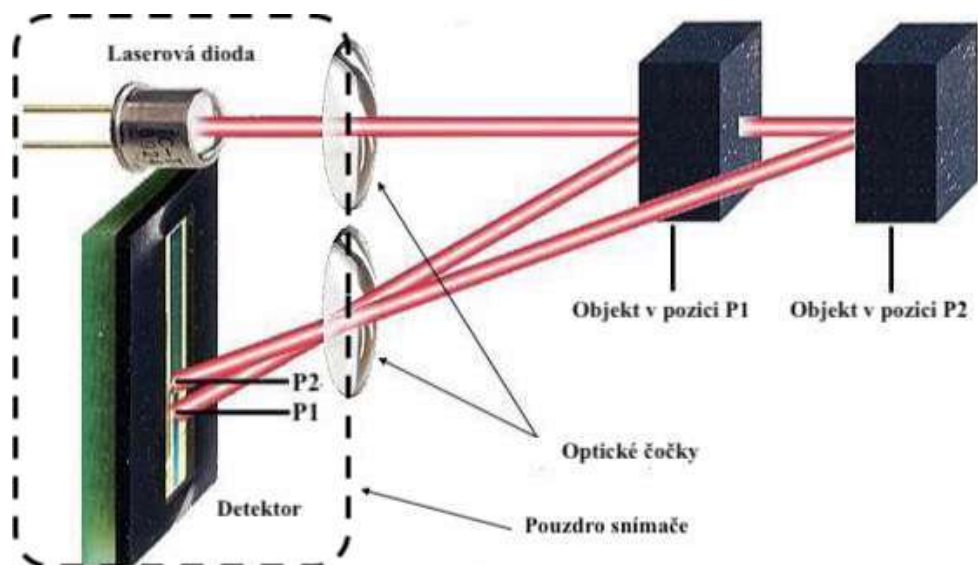
Na rozdíl od inkrementálních snímačů potřebují pro správné fungování více detektorů světla. Jejich počet se odvíjí od požadovaného rozlišení. Nejzákladnější je 8bitové rozlišení, což znamená, že obrazce na kotouči jsou v osmi paralelních dráhách. Pro prosvětlování se používá jeden světelný zdroj a každý z detektorů snímá jednu dráhu. Poté lze podat informaci o poloze v binárním kódu například posloupností 01010110. V případě většího počtu bitů se používá sériové čtení kódu [23]. Na následujícím obrázku Obr. 22 jsou zobrazeny příklady kódových kotoučů.



Obr. 22 a) kotouč s pěti snímači, b) 4bitový standardní kód, c) 3bitový Grayův kód [23]

2.5.5 Optoelektronické senzory polohy s triangulací

Senzory pracují s odraženým paprskem a pro jejich fungování je potřeba zajistit povrch s difúzním odrazem (do všech směrů). Senzor je tvořen přijímačem a vysílačem, který bývá nejčastěji realizován infračervenou laserovou diodou. Z vysílače se vysílá paprsek dopadající na měřený objekt, kde vytváří světelný bod. Z objektu se světlo odrazí a pod určitým úhlem dopadá na čočku přijímače. Úhel dopadu se mění se vzdáleností objektu od snímače. Detektor úhel dopadu paprsku vyhodnotí pomocí trigonometrie a tím se získá vzdálenost objektu od senzoru. Čočka snímače je tvořena PSD nebo CCD senzory. Z důvodu omezenosti velikosti snímačů je omezen měřící rozsah a udává se vždy v určitém rozsahu. Snímače díky režimům měření s potlačeným pozadím nebo popředím mohou měřit i tloušťku průhledných homogenních předmětů [1].



Obr. 23 Princip triangulačního senzoru [24]

3 Stanovení základních požadavků a výběr vhodných senzorů

Před samotnou realizací přípravku byly po konzultaci s vedoucím práce stanoveny jasné požadavky na přípravek, a to jak po mechanické části, tak i po elektronické.

Po mechanické stránce bylo potřeba umístit veškerou elektroniku se senzory na jednu základovou desku kompaktních rozměrů, aby byla zajištěna snadná manipulace s přípravkem a rovněž jeho bezproblémové uskladnění. Základová deska musí také odolávat poničení ze strany studentů (počmárání, vrypy, díry, škrábance atd.) a neobsahovat ostré hrany, aby nedošlo během měření k poranění. Na základové desce musí být dále umístěna pohyblivá část, pomocí které se bude nastavovat poloha.

Na elektronickou část přípravku byly kladeny poněkud nižší požadavky. Nejdůležitější roli hrála integrace čidla ALMEMO a využití optického snímače. Dále bylo důležité zabezpečit vhodné připojování měřících přístrojů. Přípravek nesmí být rušen nebo ovlivňován okolními zařízeními. Zároveň nesmí rušit tato zařízení.

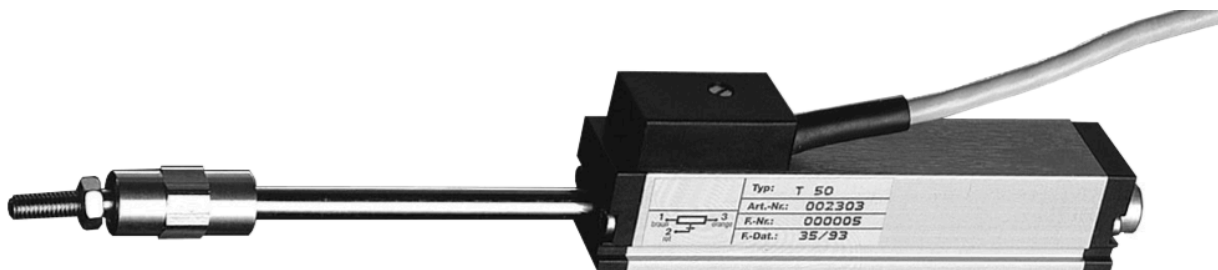
Na základě požadavků kladených na konstrukci měřícího přípravku byly vybrány čtyři vhodné typy senzorů: odporový potenciometr, indukčnostní snímač, libovolný typ optického senzoru a na závěr také senzor Ahlborn ALMEMO FWA100T. Po prozkoumání trhu a oslovení společností, zabývajících se měřicí a automatizační technikou, byly po obdržení cenových nabídek indukčnostní senzory z přípravku vyřazeny. Důvodem byly vysoké pořizovací náklady. Výběr senzorů se tak zúžil na ALMEMO snímač, odporový potenciometr a optický snímač. Vzhledem k použití čidla od firmy Ahlborn, které disponuje rozsahem 0-100 mm, byly vybrány snímače schopné pracovat minimálně se stejným rozsahem. Vybrané senzory jsou popsány v následujících třech podkapitolách.

3.1 Ahlborn ALMEMO FWA100T

Senzor německého výrobce Ahlborn byl vybrán z důvodu širokého uplatnění, a především kvůli jeho dostupnosti v laboratoři pro výuku měření mechanické polohy.

Firma Ahlborn se zabývá vývojem a výrobou vysoce kvalitní měřicí techniky pro výzkum, ochranu životního prostředí, průmysl a spoustu dalších již od roku 1996. Výhodu systému ALMEMO lze nalézt v nutnosti vlastnit jediný měřící přístroj a k němu inteligentní digitální konektor. Díky konektoru lze k přístroji připojit libovolný senzor nebo převodník a přístroj se automaticky nastaví na potřebné veličiny a rozsahy. Tento patentovaný systém firma využívá a inovuje více než 20 let a řadí se mezi špičku v oboru [25].

Senzor FWA100T se používá pro přímé měření v automatizačních aplikacích a metrologii. Jedná se o potenciometrický senzor, který tudíž pracuje na odporovém principu. Táhlo senzoru působí přes kuličkovou spojku na odporovou dráhu. Díky kuličkové spojce lze snímač obsluhovat bez sebemenší námahy. Pružící táhlo snímače je vyrobeno z ušlechtilé oceli a je tlumeno elastomerem pro kvalitní kontakt při otřesech a vibracích [26].



Obr. 24 Potenciometrický senzor FWA100T [26]

Základní parametry senzoru uvádí následující tabulka.

Tab. 2 Parametry senzoru FWA100T [26]

Parametr	Hodnota
Rozsah	0–100 mm
Rozlišení	0,01 mm
Opakovaná přesnost	0,002 mm
Provozní teplota	-30 °C až +100 °C
Linearita	±0,075 %
Izolační odpor	≥ 10 MΩ (pro 500 V DC, 1 bar, 2 s)
Elektrická pevnost	≤ 1 mA (50 Hz, 2 s, 1 bar, 500 V AC)
Životnost	> 100 x 10 ⁶ zdvihů
Druh krytí	IP 40

3.2 Odporový potenciometr Vishay UIPMA150I472XCB

Odporové čidlo firmy Vishay bylo vybráno jako náhrada klasického potenciometru. Firma senzor prezentuje jako řešení pro velmi náročná prostředí. Senzor vyniká vysokou odolností a opakovatelností. Čidlo se vyrábí v lineární UIPMA (Ultraflat Industrial Potentiometer Membrane) a rotační variantě UIPMC. Díky své konstrukci se nabízí aplikace například pro elektrické pohony a polohovací systémy sedadel letadel, telekomunikační antény, injekční čerpadla a nemocniční lůžka a mnoho dalších.

Jde o ultratenké voděodolné lineární odporové čidlo s adhezivní vrstvou a kolektorovou drahou tenkou pouhých 0,5 mm uzpůsobenou pro přitlačení vnějšího tělesa a potažmo změnu

dělicího poměru senzoru. Absolutní pozici tlakového bodu na senzoru lze při napájení čidla stejnosměrným napětím získat měřením napětí jezdce proti zemnímu potenciálu a následným přepočtem frakce napájecího napětí vůči celkové délce čidla. Po principiální stránce tak klasický potenciometr plně nahrazuje. Životnost čidla se udává vyšší než 3 miliony cyklů. Výrobce však udává, že lze na vyžádání vyrobit senzor s životností 10 nebo 20 milionů cyklů. Senzor je zobrazen na *Obr. 25* a jeho parametry uvádí *Tab. 3* [27].



Obr. 25 Ultratenký odporový senzor Vishay UIPMA [27]

Tab. 3 Parametry senzoru Vishay UIPMA150I472XCB [27]

Parametr	Hodnota
Rozsah	0–150 mm
Vůle	< 0,1 mm
Celkový odpor R_n	4,7 k Ω
Tolerance R_n	± 30 %
Provozní teplota	-10 °C až +50 °C
Linearita	± 2 %
Životnost	> 3 miliony cyklů
Druh krytí	IP 66

3.3 Optický senzor

Poslední snímač bude tvořen reflexní světelnou závorou Vishay CNY70. Pro snímač bude vyrobena šachovnicová stupnice, která bude pomocí čidla snímána. Pro lepší názornost budou použity dva snímače a dvě stupnice. Ty budou vzájemně fázově posunuté, aby bylo možné určovat kromě vzdálenosti rovněž směr posuvu. Čidla budou snímat změnu z tmavého obrazce na světlý a s každou změnou generovat jeden impuls. Pomocí těchto čidel se prakticky sestaví zjednodušený optický inkrementální senzor. Zjednodušený proto, že budou použity pouze tato dvě čidla a stupnice. Pro klasický inkrementální senzor by bylo potřeba využít kvalitní optiku na usměrnění světelného paprsku, polarizační filtry a další součástky, což by se podepsalo do celkových nákladů a časová náročnost konstrukce by přesahovala rámec diplomové práce.

Samotná optická závora se skládá ze světelné diody fungující jako zdroj světla a z fototranzistoru použitého jako detektor světla. Senzor vyniká miniaturními rozměry ($7 \times 7 \times 6$ mm) a lze jej tak využívat v různých aplikacích. Díky kompaktním rozměrům jsou zdroj i detektor světla orientovány ve stejném směru a detekují objekt pomocí infračerveného paprsku odraženého přímo z objektu. Optický snímač lze vidět na *Obr. 26* a jeho parametry poté v *Tab. 4* [28].

Tab. 4 Parametry senzoru CNY70, převzato z [28]

Parametr	Hodnota
Dosah	5 mm
Vlnová délka IR záření	950 nm
Závěrné napětí U_R	5 V
Procházející proud I_F	50 mA
Napětí U_{CE}	32 V
Kolektorový proud I_C	50 mA
Provozní teplota	-55 °C až +100 °C



Obr. 26 Optický senzor CNY70 [28]

4 Návrh měřícího přípravku

Návrh přípravku byl rozdělen na design mechanické a elektronické části. Základní vize počítala s umístěním senzorů na jezdec, který se bude pohybovat na závitové tyči s tím, že vzdálenost bude odměřována mezi jezdcem a referenčním bodem.

4.1 Návrh elektronické části

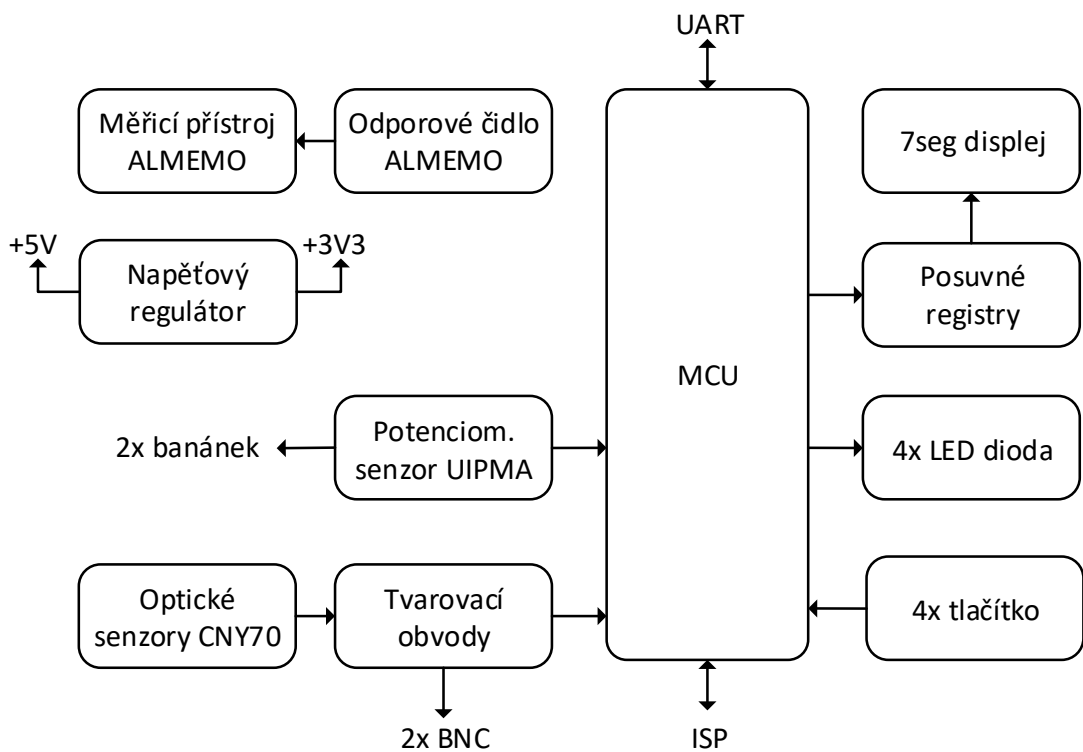
Pro plnohodnotně funkční přípravek je krom výběru vhodných senzorů kritické také korektní zpracování a vyhodnocení výstupních veličin ze senzorů. Z tohoto důvodu bylo navrženo obvodové řešení umožňující odpovídající zpracování signálů a jejich reprezentaci vhodnou pro čtení uživatelem. Z důvodu zajištění bezpečnosti uživatele (i samotného zařízení) bylo obvodové řešení rozděleno do třech DPS: řídicí deska, konektorová deska a deska se senzory.

Pro měření s odporovým čidlem Vishay UIPMA150I472XCB byl použit filtr typu dolní propust a připínací diody pro ochranu signálového vstupu MCU v případě měření integrovaným A/D převodníkem. Předpokladem však je, že filtrovaný signál z odporového čidla bude měřen multimetrem připojeným k DPS přes klasické konektory typu 4 mm banánek.

Dva optické senzory CNY70 jsou umístěny na separátní DPS a s řídicí deskou je propojuje kabel. Každý ze dvou signálů je filtrován dolní propustí. Filtrovaný signál je následně restaurován pomocí tvarovacího obvodu (Schmittův klopný obvod). Oba upravené signály jsou vyvedeny na BNC (Bayonet Neill Concelman) konektory pro připojení k osciloskopu a také připojeny do MCU na vstupy integrované periferie určené k práci s inkrementálními kodéry. V MCU by měl být vyhodnocován směr posuvu mechanického jezdce, se kterým budou všechny senzory polohy spřaženy, a dále také čítán počet pulzů generovaných optickými senzory při čtení měřicí stupnice. Počet pulzů načítaných mikrokontrolérem je zobrazován na třímístném sedmisegmentovém displeji, který je (z důvodu úspory signálových vodičů a zamezení nepříjemného problikávání displeje při přepínání jednotlivých číslic) připojen přes tři posuvné registry. Aktuální směr pohybu jezdce signalizují LED diody. K ovládání je k dispozici celkem pět tlačítek: ABS/REL (ABSolutní/RELativní), CALIB (CALIBration), RESET, GPB1 a GPB2 (General Purpose Button 1/2). Tlačítko ABS/REL umožňuje přepínání mezi absolutním měřením vzdálenosti (vůči výchozí poloze mechanického jezdce) a relativním měřením (vůči libovolně zvolenému aktuálnímu bodu na měřicí stupnici). Funkci lze přirovnat k digitálnímu posuvnému měřítku. S ohledem na možnou integraci chyby měření je na DPS umístěno i tlačítko CALIB, které slouží pro vynulování čítače pulzů v okamžiku, kdy se

mechanický jezdec nachází ve výchozí poloze. Pro případnou implementaci dalších funkcí zařízení jsou připraveny dvě LED diody (GPLED1, GPLED2) a dvě tlačítka (GPB1, GPB2) pro obecné použití a také UART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter) konektor pro komunikaci s PC (Personal Computer) přes sériový port.

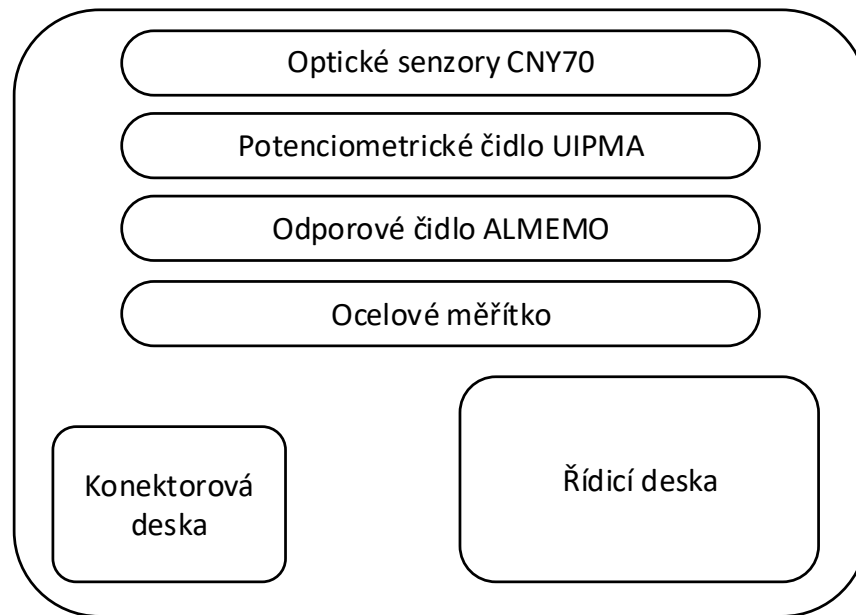
Pro napájení DPS je zamýšlen klasický 5V adaptér s DC jackem a výstupním proudem až 0,5 A. Přepólování napájení zařízení a ochrana proti nadproudu jsou řešeny rychlou tavnou pojistkou a usměrňovací diodou s dostatečnou proudovou schopností. Připojení 5V zdroje je signalizováno LED diodou. Na *Obr. 27* je k vidění blokové schéma obvodového řešení. Schéma zapojení řídicí desky lze nalézt v příloze A, konektorovou desku poté v příloze B a sensorovou desku v příloze C. Osazovací výkresy zobrazují přílohy D, E, F. Navržené DPS poté zobrazuje příloha G.



Obr. 27 Blokové schéma obvodového řešení

4.2 Návrh mechanické části

Pro splnění požadavků kladených na konstrukci přípravku byla vybrána dřevotřísková deska s povrchovou úpravou a laminátovými hranami. Po změření rozměrů jednotlivých snímačů byla deska vyrobena v rozměru 300 mm × 300 mm. Deska stojí na gumových nožičkách z důvodu zvýšení adheze k pracovnímu stolu. Na *Obr. 28* lze vidět blokové rozmístění jednotlivých DPS a snímačů.



Obr. 28 Blokové rozložení snímačů

Nejpodstatnější částí mechanické konstrukce je posuvník vybavený jezdcem nesoucím senzory. Základem jsou dva silonové domečky pro uložení ložisek. Skrze ložiska je upevněna závitová tyč, na jejímž konci je přišroubováno ovládací kolo. Na obou stranách závitové tyče se nacházejí dvě vodící tyče, které jsou použity pro zajištění stability jezdců při posuvu. Jezdec je vyroben ve tvaru kvádrů tak, že jsou po krajích otvory pro vodící tyče a uprostřed závit pro závitovou tyč. Z vrchní strany jezdců je připevněna deska se senzory.

Ultratenké potenciometrické čidlo je umístěno přímo pod závitovou tyč a přítlačný plech působící na kolektor čidla je upevněn k jezdcům. Mezi posuvníkem a řídicí deskou se nachází senzor ALMEMO, jehož táhlo je připevněno k desce umístěné na jezdcích. Před senzorem ALMEMO je pod úhlem přibližně 45° umístěno ocelové měřítko ověřující naměřenou vzdálenost. Pro snazší odečítání z měřítka směřuje z jezdců ručička ukazující na stupnici.

Řídicí deska se nachází v pravém rohu a konektorová deska v levém rohu. Umístění řídicí desky s ovládacími prvky do pravého rohu bylo zvoleno pro snazší ovládání pravou rukou. Propojovací kabely jsou vedeny ze spodní strany dřevotřískové desky, aby se zamezilo jejich případnému mechanickému poškození.

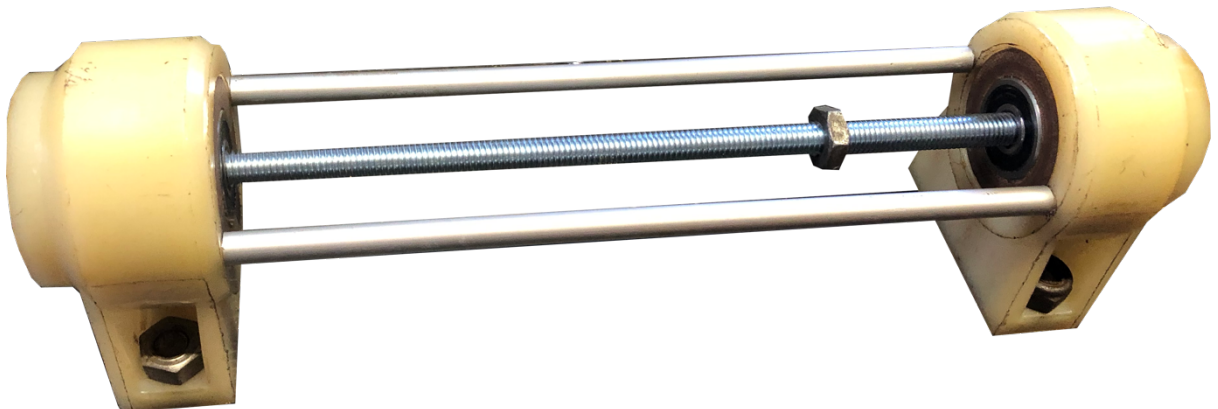
5 Realizace měřícího přípravku

Realizace přípravku byla rozdělena do čtyř kroků. Jako první byla realizována mechanická konstrukce přípravku. Po návrhu obvodového řešení a layoutu v programu Altium Designer následovalo osazení a oživení vyrobených DPS. V poslední fázi realizace byl vyvinut firmware pro MCU na řídicí desce.

5.1 Realizace mechanické části

Základní nosná deska byla vyrobena z povrchově upravené dřevotřísky, jak je uvedeno v kapitole 4.2. Deska stojí na nožičkách vysoustružených ze silonu, do kterých byly zapuštěny gumové nožičky o průměru 14 mm a výšce 5 mm. Celková výška nožiček činí 20 mm a byla zvolena s ohledem na rozvod propojovacích vodičů na spodní straně desky.

Mechanický posuvník se skládá ze silonových domečků s ložisky uloženými v pouzdrech z pertinaxu, závitové tyče M8 × 1,5 mm, dvou hliníkových vodících tyčí, bronzového jezdce, desky pro senzory z tvrzeného plastu a plastového ovládacího kola. Základní konstrukce mechanického posuvníku je na *Obr. 29*.

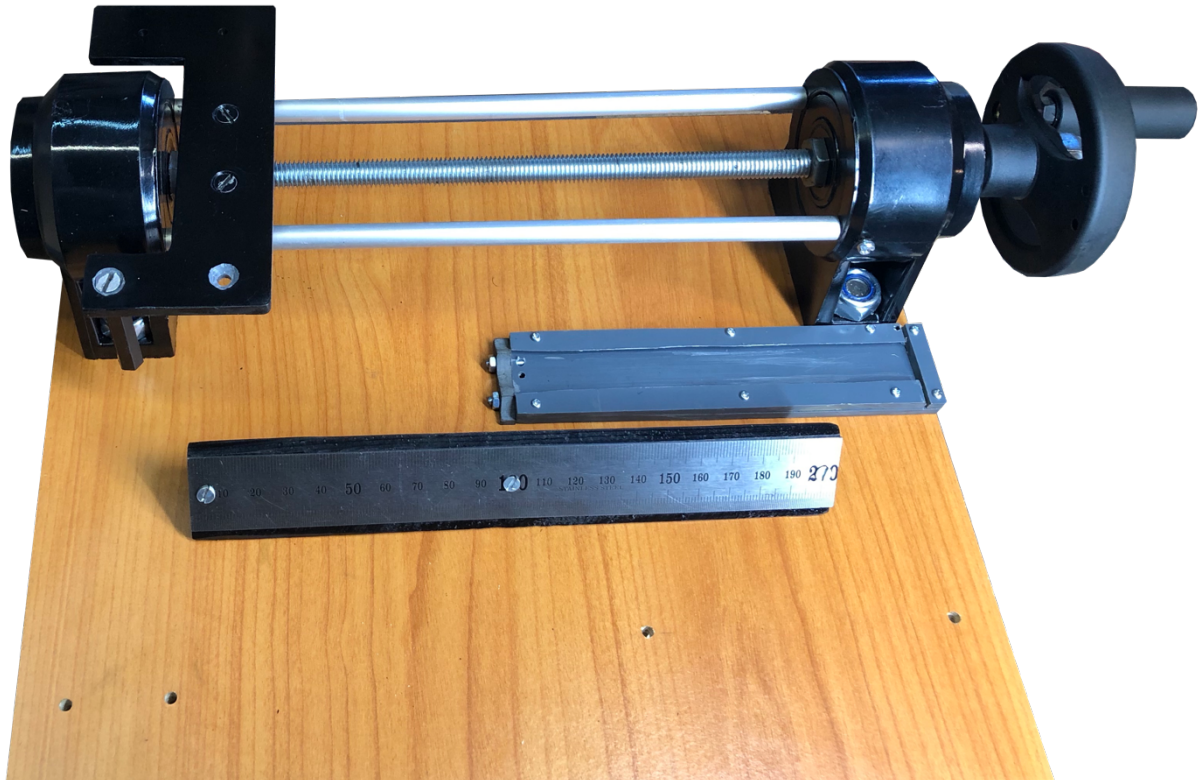


Obr. 29 Konstrukce mechanického posuvníku

Nosná destička pro senzory slouží i jako ukazatel odměřené vzdálenosti na ocelovém měřítku. Na straně k měřítku je k desce připevněna ocelová ručička, která se nachází nad čidlem ALMEMO. Táhlo tohoto čidla je připevněno k destičce pomocí distančního sloupku, který drží zároveň ručičku. Na protilehlé straně destičky je opět skrze distanční sloupky připevněna sensorová deska s čidly CNY70.

Pro čidlo ALMEMO byl vytvořen držák tak, aby se z něj čidlo dalo snadno vyjmout. Čidlo se do držáku jednoduše nasune a na konci se zabezpečí proti pohybu přepážkou pomocí dvou šroubů.

Ocelové měřítko je připevněno na dřevěném kvádru zkoseném tak, aby měřítko bylo v úhlu 45° a snadněji se z něj obsluze odečítaly hodnoty. Celkovou mechanickou konstrukci zobrazuje Obr. 30.



Obr. 30 Mechanická konstrukce přípravku

5.2 Realizace elektronické části

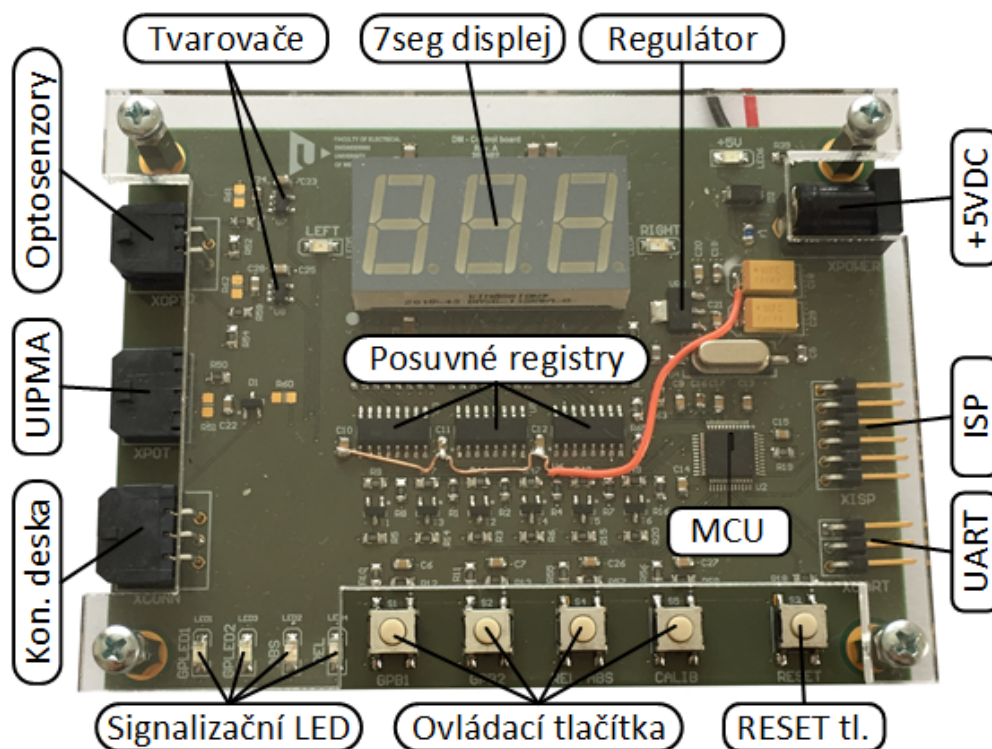
DPS byly vyrobeny po zvážení možnosti vzniku zemních smyček (a případného rušení sledovaných signálů) ve čtyřvrstvé variantě z důvodu zlepšení parametrů pro EMI/EMC (ElectroMagnetic Interference/ElectroMagnetic Compatibility), snížení impedance napájení a zkrácení zemních cest.

Řízení přípravku zabezpečuje 32bitový ARM mikrokontrolér STM32F030C8T6 od firmy STMicroelectronics dovybavený o krystalový rezonátor s frekvencí 16 MHz. Napájení je řešeno pomocí 5 V adaptéru s DC jackem. Jelikož většina součástek vyžaduje napájecí napětí 3,3 V, je použit lineární stabilizátor napětí LD1117S33TR od STM. Stabilizátor disponuje nízkým poklesem napětí (1,1 V) a výstupním proudem až 800 mA. DPS je chráněna proti přepólování napájecího zdroje pojistkou a usměrňovací diodou řazenou paralelně k napájecímu napětí.

Pro připojení odporového čidla je na desce připraven konektor a RC filtr jako dolní propust se zlomovou frekvencí 34 Hz pro odfiltrování rušivých kmitočtů. Plně využitému

rozsahu čidla (150 mm) by mělo odpovídat napětí 3,3 V. Jelikož využitelný rozsah představuje 100 mm, hodnota napětí na této vzdálenosti bude 2,2 V. Pomocí jezdce se mění dělicí odpor senzoru, z čehož lze vypočítat výslednou vzdálenost.

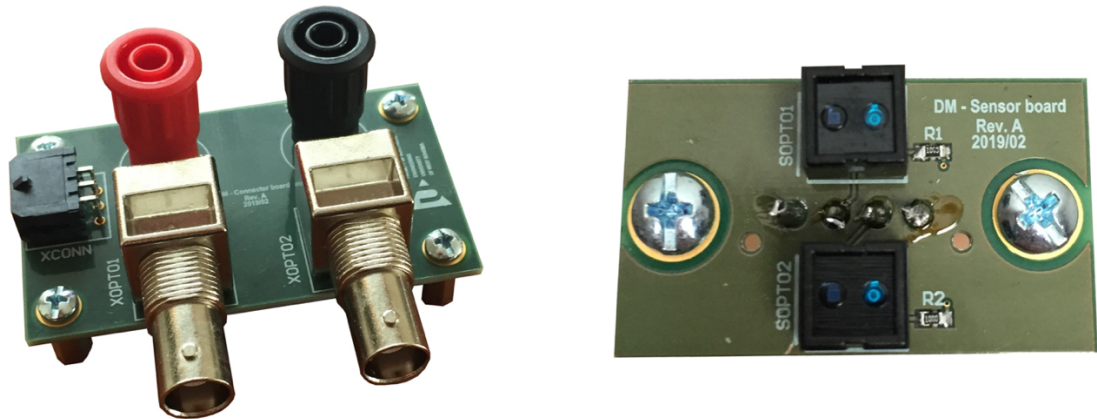
Generované pulzy z čidel CNY70 jsou zavedeny do MCU. Signál z čidla se nejprve vyfiltruje RC filtrem. Dále se pomocí Schmittova klopného obvodu zrestauruje tak, aby jeho hrany byly dostatečně strmé a vhodné pro zpracování mikrokontrolérem. Zobrazování načtených pulzů zařizuje sedmissegmentový displej zapojený přes tři posuvné registry. Celou desku kryje plexisklo z důvodu zamezení poškození desky dotykem. Výkres krycího plexiskla je přiložen v příloze I. Řídicí DPS osazená součástkami je zobrazena na *Obr. 31*.



Obr. 31 Řídicí deska

Separátní konektorová deska vznikla pouze z obavy, aby při připojování měřicích přístrojů nedošlo k poškození, například zkrat, zničení použitím hrubé síly (neúmyslně) a podobně. Deska obsahuje konektor pro připojení k řídicí desce, dva BNC konektory pro sledování signálů z čidel CNY70 a dva konektory typu 4 mm banánek pro připojení multimetru, kterým se bude měřit napětí na odporovém čidlu UIPMA. Konektorovou desku lze vidět vlevo na *Obr. 32*.

Senzorová deska obsahuje rovněž propojovací konektor, dvě optická čidla CNY70, přičemž ke každému čidlu náleží jeden pull-up rezistor, který poté s kondenzátorem na řídicí desce tvoří RC filtr. Desku lze vidět vpravo na *Obr. 32*.

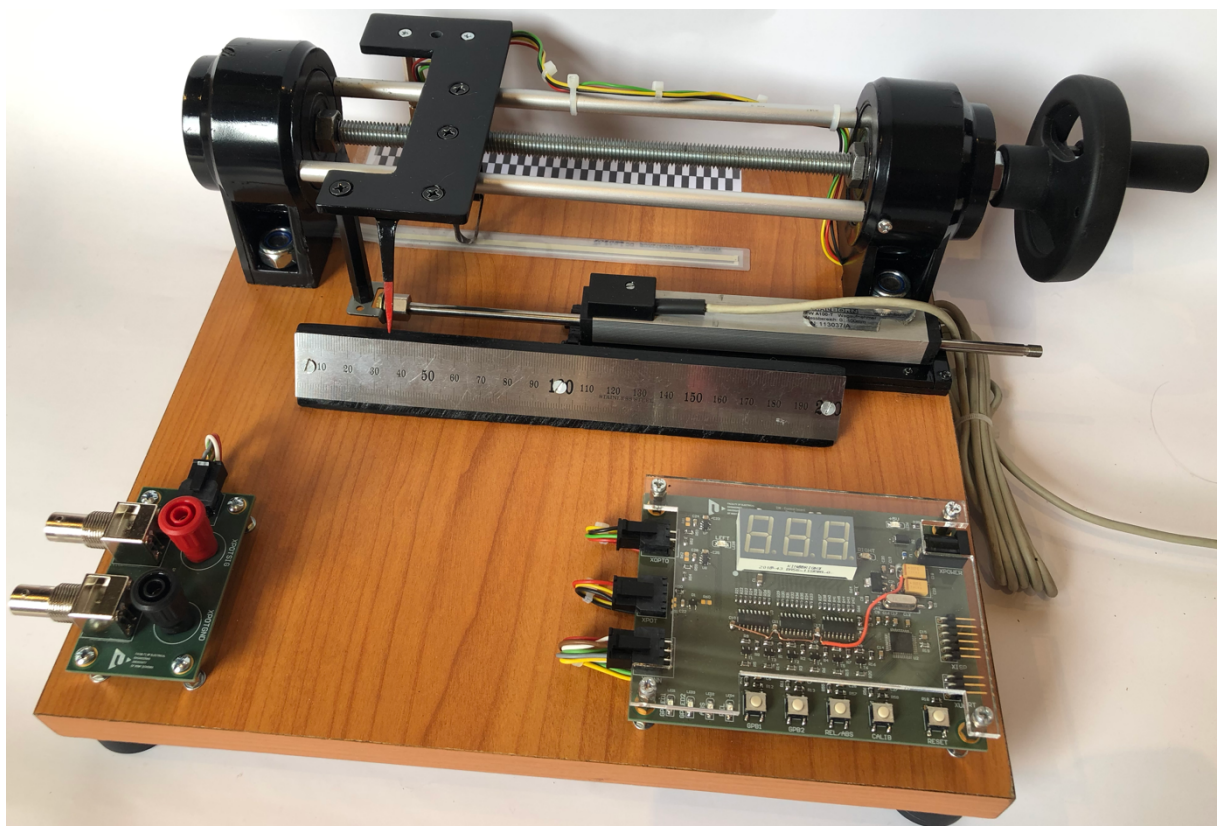


Obr. 32 Konektorová DPS (vlevo) a senzorová DPS (vpravo)

Pro optické senzory bylo nutné sestavit vhodnou stupnici, aby čidla správně snímala a následně mohla generovat signály. Po testování různých stupnic se dopracovalo k použití stupnice skládající se z černého podkladu překrytého kovovou šablonou, do které se laserem vypálily potřebné obrazce. Výkres šablony lze vidět v příloze J.

5.3 Finální podoba přípravku

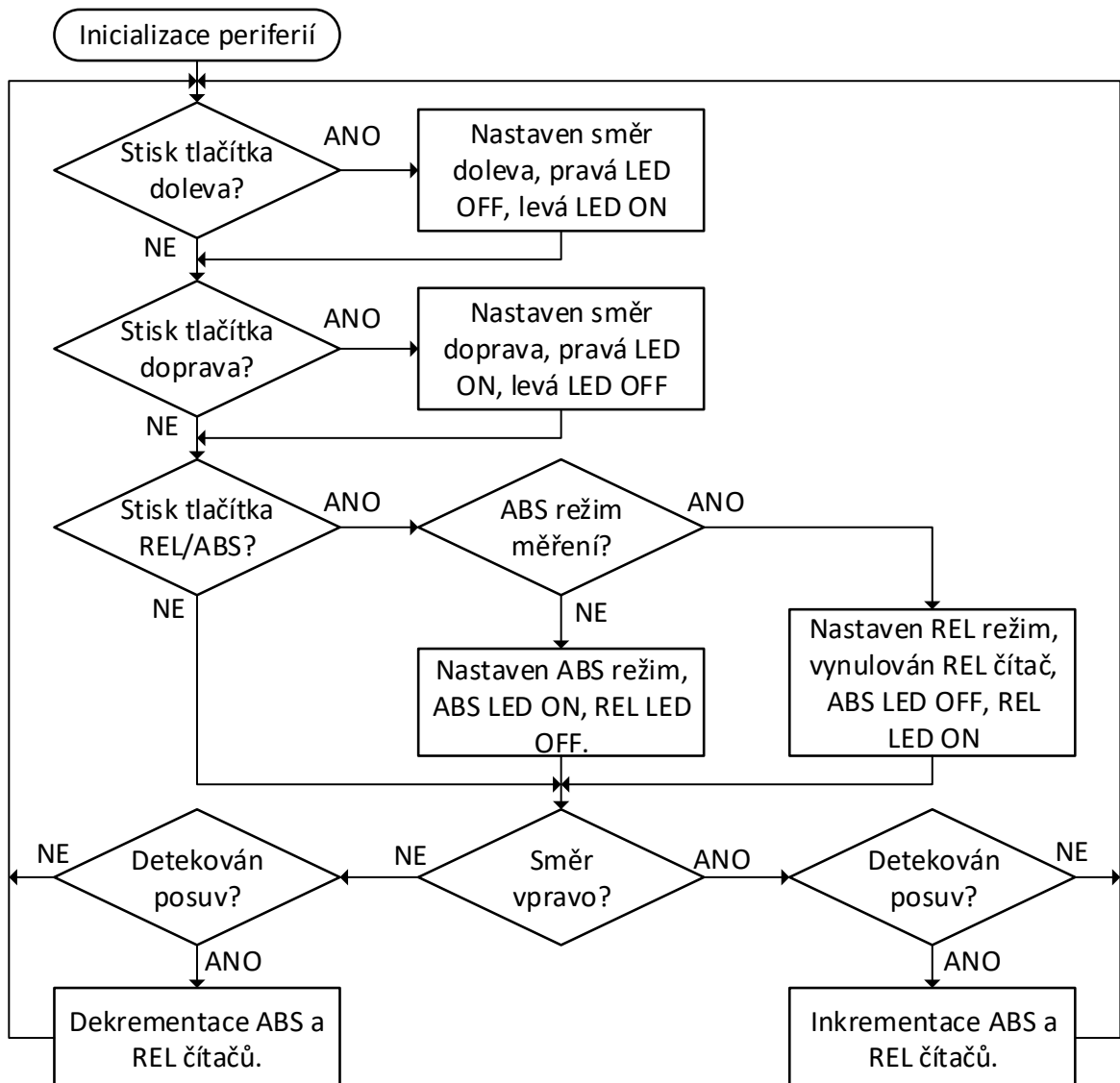
Finální podoba přípravku je uvedena na Obr. 33. Další fotky přípravku se nachází v příloze H.



Obr. 33 Finální podoba měřicího přípravku

5.4 Firmware

Pro vývoj firmware byl zvolen programovací jazyk C a prostředí KEIL ve verzi 5.



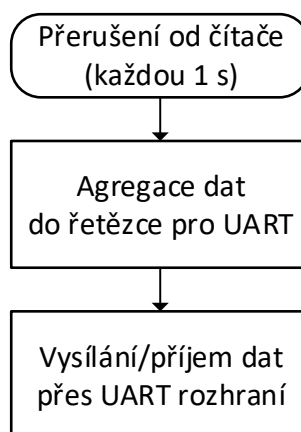
Obr. 34 Blokový diagram hlavní programové smyčky

Při startu programu proběhne inicializace periferních zařízení používaných pro řízení a obsluhu přípravku. Mezi tyto periferie patří GPIO (General Purpose Input/Output), RCC (Reset and Clock Control), UART, čítač/časovač a programový blok pro obsluhu 7segmentového displeje.

První podmínka v hlavní programové smyčce uvedené na Obr. 34 se dotazuje na aktivní stisk tlačítka GPB1 (vlevo). V případě jeho aktivace dojde k nastavení směru doleva, vypnutí pravé LED diody, a naopak k rozsvícení levé LED. Pakliže levé tlačítko nebylo aktivováno, či byla dokončena sekvence následující při pozitivní odpovědi na podmínku, dochází k vyhodnocení analogického dotazu i pro tlačítko GPB2 (vpravo).

Stisk tlačítka REL/ABS větví program na dvě části sloužící k alternaci mezi absolutním a relativním režimem měření. Při změně režimu dochází k přepnutí odpovídajících LED diod a v případě přechodu do relativního režimu také k vynulování hodnoty relativního čítače.

Po zodpovězení dotazu na aktuálně nastavený směr pohybu jezdce je v případě detekce posuvu inkrementován/dekrementován příslušný čítač a následuje návrat na začátek hlavní programové smyčky.



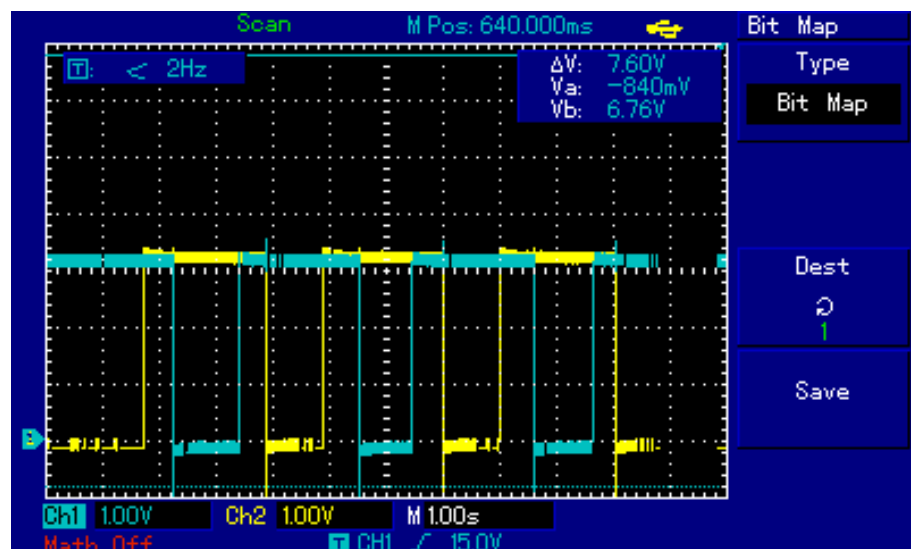
Obr. 35 Blokový diagram obsluhy přerušování cyklicky vyvolávaného čítačem

Použitý univerzální čítač/časovač je nakonfigurován tak, aby periodicky vyvolával přerušování s intervalem 1 s. V rutině pro obsluhu přerušování dochází k agregaci dat a jejich spojení do řetězce, který je určen pro přenos přes rozhraní UART. V tomto řetězci se nachází aktuálně nastavený režim (absolutní/relativní), směr pohybu (vpravo, vlevo), hodnota čítače (ať už absolutního či relativního) a vzdálenost.

6 Ověření funkce přípravku

Pro testovací měření byl vytvořen manuál k laboratornímu cvičení, který se bude využívat ve výuce a lze jej nalézt v příloze L.

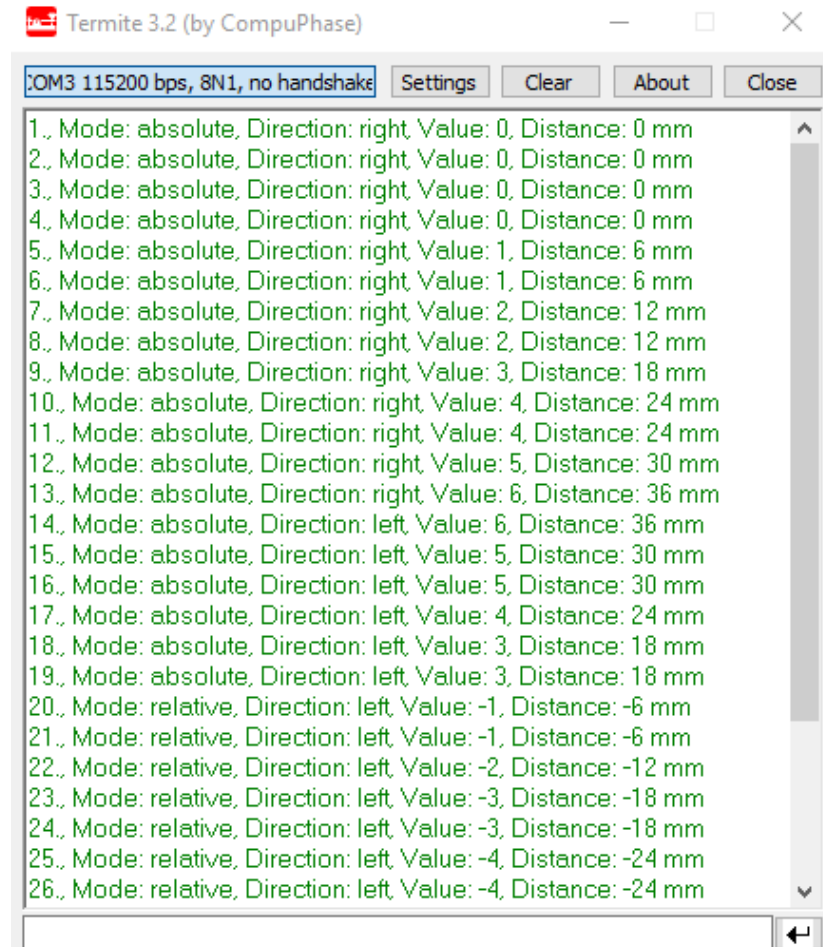
Pro realizaci stupnice byly vyzkoušeny různé vzory a materiály, například stupnice vytisknutá tiskárnou na různé materiály (folie, kancelářský papír, fotopapír), stupnice z černé izolační pásky či stupnice nakreslená lihovým fixem. Žádný z těchto pokusů nevedl k uspokojivým výsledkům, a to z důvodu nedostatečné absorpce záření z vysílače (motiv z tiskárny, lihový fix) či případně problematické realizace přesné stupnice (černá izolační páska). Jako relativně spolehlivá metoda pro vytvoření šablony s dobře odlišitelnými reflexními absorpčními plochami se jeví přilepení šachovnicového motivu z kancelářského papíru na černou izolační pásku. Testy ukázaly, že současná konfigurace použitých optických čidel bez použití optiky není schopna rozlišovat dílky menší než cca 6 mm. I při vzájemném posunutí dvou šachovnicových motivů o 90° mechanických nebylo možné z důvodu odlišné reakce čidla na přechod černá/bílá a bílá/černá z výstupních signálů vyčíst směr pohybu jezdce. Tyto fakty vedly ve výsledku k návrhu ocelové šablony s fázovým posuvem motivů 180° mechanických a šířkou okénka motivu 6 mm. Tyto závěry byly zpětně aplikovány při úpravě firmware v řídicím MCU tak, aby po zvolení směru pohybu jezdce jedním z tlačítek (GPB1/GPB2) docházelo k adekvátní inkrementaci či dekrementaci čítače, jehož obsah je zobrazován na 7segmentovém displeji a také odesílán přes rozhraní UART.



Obr. 36 Výstupní signály z tvarovačů určených pro senzory CNY70

Signály OPTO1 (modrý) a OPTO2 (žlutý), které jsou snímány za Schmittovými klopnými obvody, ukazuje Obr. 36. I při maximální snaze o zachování konstantní rychlosti otáčení ovládacím kolem spřaženým s jezdcem je patrné, že vlivem již zmíněné nesymetrie

při přechodu mezi dílky motivu dochází ke generování pulzního signálu se střídou neodpovídající 50 %, což je důvodem problematického vyhodnocování signálů.



Obr. 37 Ukázka dat přijímaných na PC v programu Termite

S využitím externího převodníku UART/USB (Universal Serial Bus) byl přípravek propojen s PC komunikační rychlostí 115,2 kbit/s. Obr. 37 ukazuje data přijímaná počítačem v terminálovém okně programu Termite. Po indexu značícím číslo měřicího cyklu, který proběhl od startu zařízení, následuje informace o režimu, směru, hodnotě čítače a vzdálenosti od referenčního bodu.

Závěr

První část práce se zabývala teoretickým popisem senzorů, jejich rozdělením, typickými parametry a také měřicími řetězci používanými pro zpracování signálu. Po této kapitole následoval přehled vybraných skupin senzorů používaných pro měření mechanické polohy. Třetí kapitola je věnována výběru a popisu senzorů vhodných pro návrh a konstrukci přípravku zaměřeného na výuku měření mechanické polohy.

Jádrem práce byl návrh a realizace mechanické konstrukce a obvodového řešení s ohledem na zadané požadavky – tři různé senzory (potenciometrický senzor ALMEMO, ploché odporové čidlo a dvojice optických senzorů), dostatečně kompaktní, ale robustní konstrukce, odolnost vůči neúmyslnému poškození a bezpečnosti uživatelů při manipulaci se zařízením. Mechanická konstrukce, založená na laminované dřevotřískové desce s rozměry 30 cm × 30 cm, byla doplněna o vhodně situovanou závitovou tyč s ovládacím kolem, které posunuje mechanický jezdec s připevněnými senzory pro měření polohy. Při návrhu elektronické části bylo třeba definovat odlišné přístupy pro jednotlivé senzory. Senzor ALMEMO nevyžadoval (vzhledem k nutnosti použití dedikovaného měřicího přístroje téže značky) žádné další podpůrné obvody a jeho zapracování do celkové konstrukce přípravku je tedy ryze mechanickou záležitostí. Pro zpracování signálu z plochého odporového čidla provozovaného v potenciometrickém zapojení byl použit RC filtr typu dolní propust následovaný dvěma konektory typu banánek pro připojení voltmetru použitého ke sledování aktuální velikosti napětí na kolektoru senzoru proti zemnímu potenciálu. Sofistikovanější přístup si vysloužila dvojice optických senzorů použitých pro čtení fázově posunutých šachovnicových motivů. Jejich signály, generované vždy fototranzistorem a pull-up rezistorem, byly po filtraci dolní propustní zrestaurovány pomocí Schmittových klopných obvodů a následně vyvedeny na BNC konektory a propojeny na vstupy MCU použitého k jejich vyhodnocení. MCU zde kromě čtení impulzů z optických senzorů slouží také k zobrazení stavu čítače na 7segmentovém displeji a také ke změně režimu a směru pohybu zařízení pomocí tlačítek. Jednotlivé režimy a směry posuvu jsou signalizovány LED diodami. Periodicky také dochází k odesílání dat získaných při použití optických senzorů na rozhraní UART.

Výsledky funkčních testů a ladění prokázaly funkčnost zařízení dostatečnou pro výuku měření mechanické polohy. Robustní konstrukce umožňuje praktické experimentování se třemi typy senzorů. Vzhledem k použitému nízkonákladovému řešení s optickými senzory nebylo možno dosáhnout automatizované detekce směru pohybu jezdce a vhodným vylepšením přípravku by tedy mohlo být zdokonalení této části.

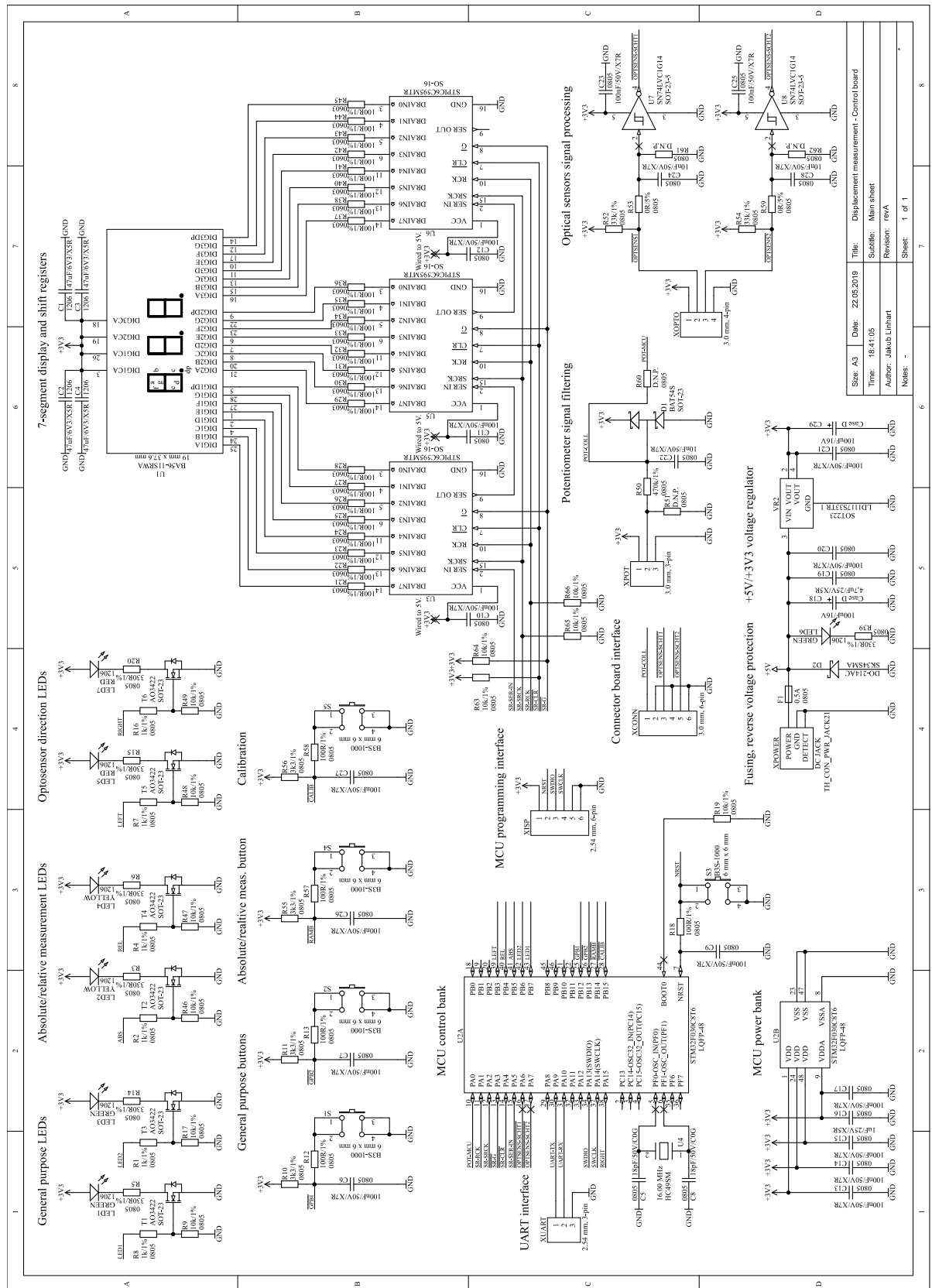
Použitá literatura

- [1] RIPKA, Pavel, Stanislav ĎAĎO, Marcel KREIDL, Jiří NOVÁK. *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [2] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02057-6
- [3] FORMÁNEK, Josef. *Výukové texty* [online]. 2012 [cit. 5. 10. 2018]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvvyuka/Data/ivk-mt-soubory/01-F.pdf>
- [4] *Základní parametry senzorů* [online]. [cit. 5. 10. 2018]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_1_3.htm
- [5] HUSÁK, Miroslav. 2. *Parametry senzorů* [online]. [cit. 7. 10. 2018]. Dostupné z: <https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=131>
- [6] *15 senzory* [online]. [cit. 7. 10. 2018]. Dostupné z: http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/html_tree/node16.html
- [7] *Senzory polohy* [online]. [cit. 9. 10. 2018]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/93170/mod_resource/content/1/07_Poloha_text.pdf
- [8] RIPKA, Pavel. *Měření lineární a úhlové polohy. Optoelektronické a ultrazvukové senzory* [online]. [cit. 12. 10. 2018]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/93169/mod_resource/content/2/SME_Prednaska_07_Poloha.pdf
- [9] *Principy kapacitních snímačů II Měřicí obvody kapacitních senzorů Typy odporových potenciometrů* [online]. [cit. 13. 10. 2018]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/9834662-Obsah-principy-kapacitnich-snimacu-ii-merici-obvody-kapacitnich-senzoru-typy-odporovych-potenciometru.html>
- [10] *Magnetické senzory přiblížení* [online]. [cit. 3. 11. 2018]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-priblizeni.html>
- [11] *Magnetické senzory s Halloovým efektem* [online]. [cit. 9. 11. 2018]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-2-pouziti>
- [12] *Integrované AMR senzory magnetického pole* [online]. [cit. 9. 11. 2018]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/integrované-amr-senzory-magnetickeho-pole>
- [13] *Bezkontaktní indukční snímače přiblížení – obecný popis* [online]. [cit. 10. 11. 2018]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/indukcni-snimace-priblizeni-obecny-popis.html>
- [14] *Functionality and technology of inductive sensors* [online]. [cit. 10. 11. 2018]. Dostupné z: https://www.baumer.com/it/en/service-support/know-how/function-principle/functionality-and-technology-of-inductive-sensors/a/know-how_function_inductive-sensors
- [15] *Snímače polohy* [online]. [cit. 10. 11. 2018]. Dostupné z: <http://automatizace-issnp.wz.cz/Soubory/Indukcnostni%20%20snimace%20polohy.pdf>
- [16] *Senzory* [online]. [cit. 12. 12. 2018]. Dostupné z: <http://senzory.aspone.cz/lvdt.htm>

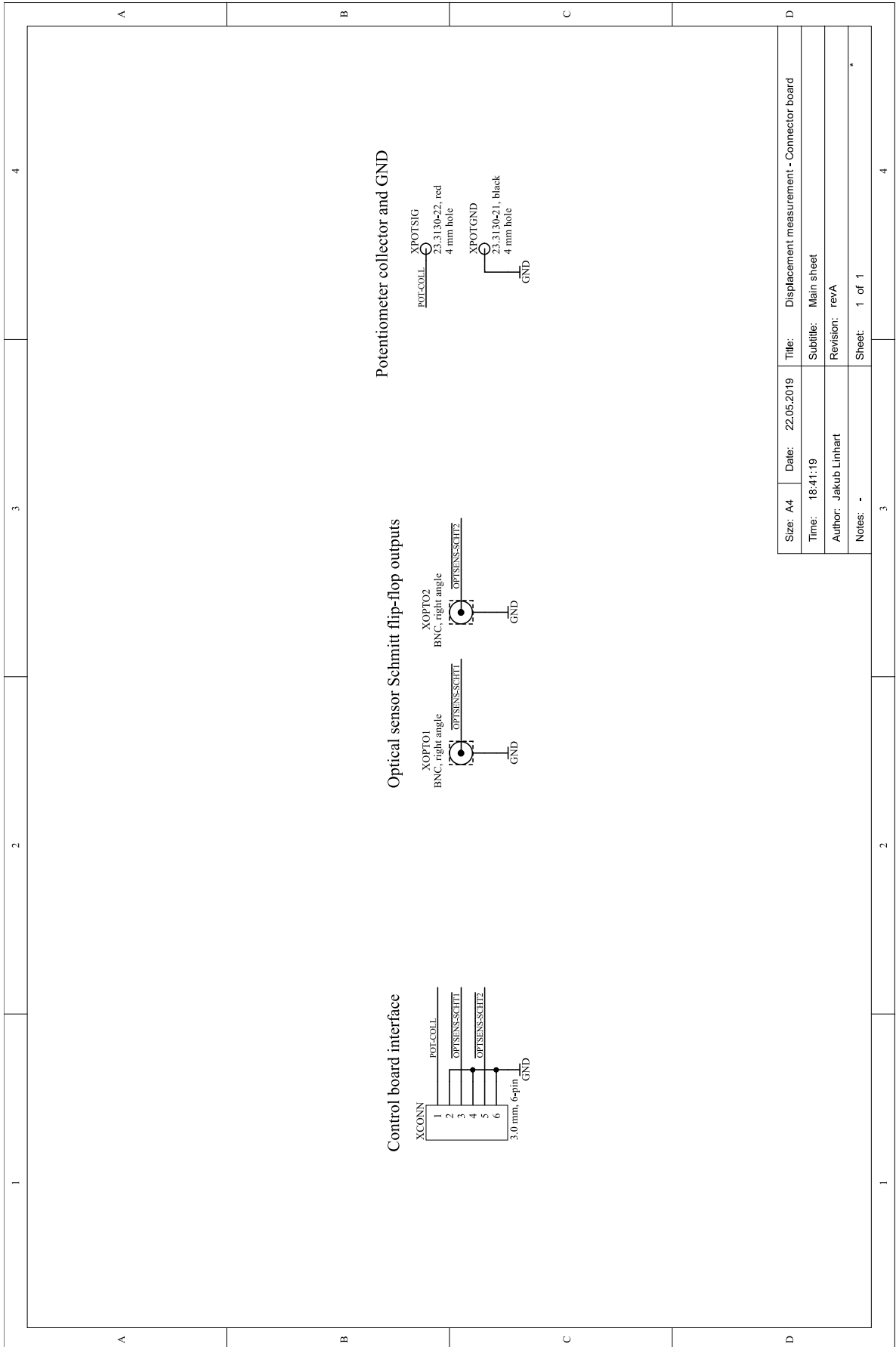
- [17] HRUŠKA, František. *SENZORY. Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití*. [online]. [cit. 28. 1. 2019]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/17879918-Zlin-2011-senzory-fyzikalni-principy-upravy-signalu-prakticke-pouziti-frantisek-hruska.html>
- [18] MATLACK, John. Modern LVDTs in New Applications in the Air, Ground, and Sea. *Sensors Magazine* [online]. [cit. 3. 2. 2019]. Dostupné z: <https://www.sensorsmag.com/components/modern-lvdt-new-applications-air-ground-and-sea>
- [19] VOJÁČEK, Antonín. Bezkontaktní kapacitní snímače přiblížení – obecný popis. *Automatizace.HW.cz* [online]. [cit. 8. 4. 2019]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-mereni-a-regulace/bezkontaktni-kapacitni-senzory-priblizeni-obecny-popis.html>
- [20] VOJÁČEK, Antonín. Optické senzory přiblížení – obecný popis. *Automatizace.HW.cz* [online]. [cit. 8. 4. 2019]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2005121901>
- [21] VOJÁČEK, Antonín. PSD – Position Sensitive Detector. *Automatizace.HW.cz* [online]. [cit. 8. 4. 2019]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2005031001>
- [22] Charge-coupled device. *Wikipedia, the free encyclopedia* [online]. [cit. 8. 4. 2019]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device
- [23] VOJÁČEK, Antonín. Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu. *Automatizace.HW.cz* [online]. [cit. 8. 4. 2019]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/rotacni-enkodery-pro-rizeni-pohonu-a-pohybu.html>
- [24] SCHRÖRS, Dipl.-Ing. Bernd a Dipl.-Ing. Marko HEPP. *Fast optical distance sensing through System-on-Chip integration* [online]. [cit. 8. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.embedded.com/print/4397394>
- [25] *AHLBORN Mess – und Regelungstechnik GmbH* [online]. [cit. 18. 4. 2019]. Dostupné z: https://www.ahlborm.com/en_UK/almemo
- [26] *Displacement Sensor, Data sheet* [online]. [cit. 18. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.ahlborm.com/download/pdfs/kap10/eng/wege.pdf>
- [27] *Vishay – Displacement Sensor* [online]. [cit. 18. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/product?docid=32537&tab=specifications>
- [28] CNY70 PRODUCT INFORMATION. *Vishay – Optical Sensors – CNY70* [online]. [cit. 18. 4. 2019]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/optical-sensors/list/product-83751/>

Přílohy

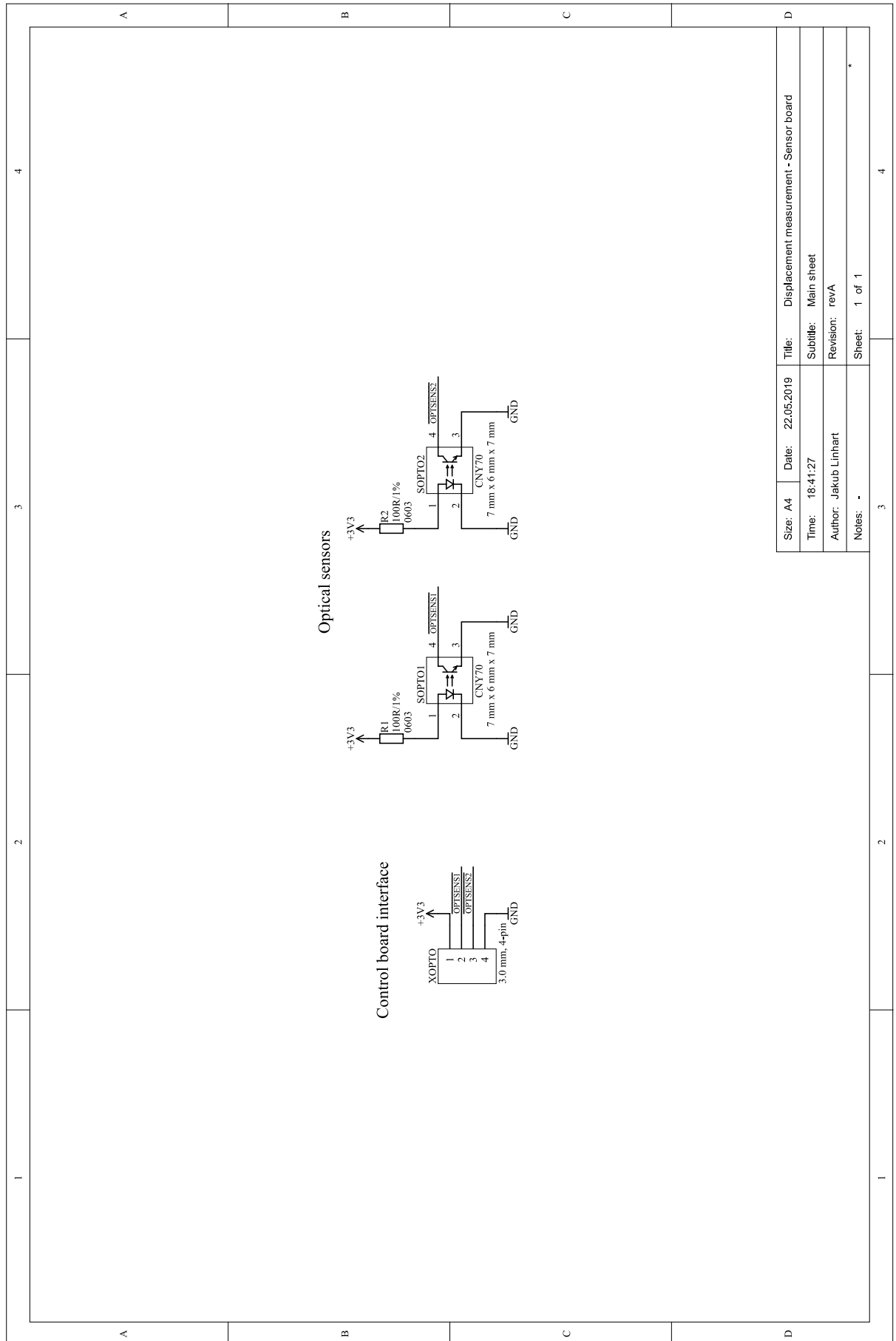
Příloha A – Schéma řídicí DPS



Příloha B – Schéma konektorové DPS

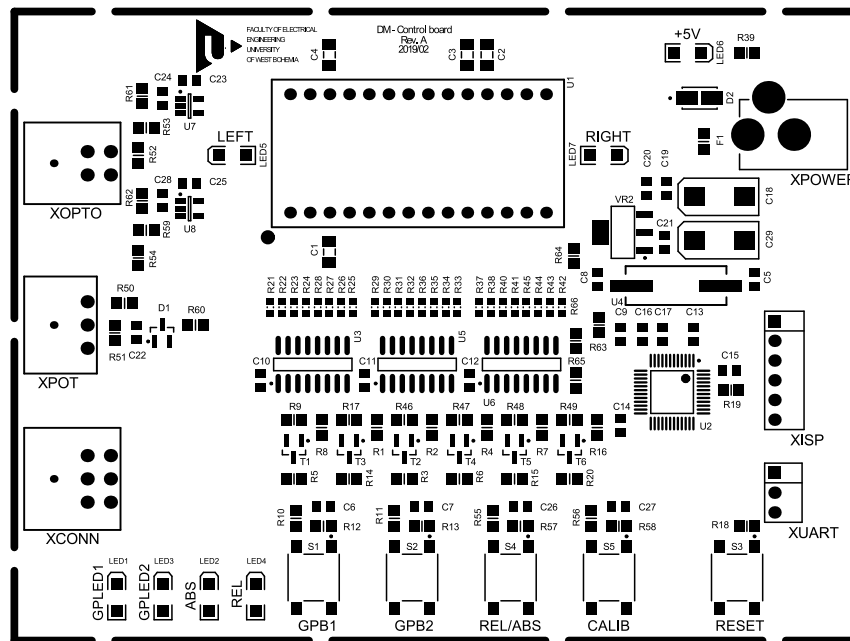


Příloha C – Schéma sensorové DPS

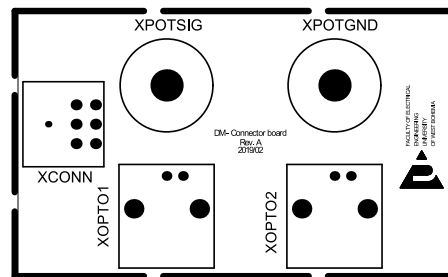


Size: A4	Date: 22.05.2019	Title: Displacement measurement - Sensor board
Time: 18:41:27		Subtitle: Main sheet
Author: Jakub Linhart		Revision: revA
Notes: -		Sheet: 1 of 1

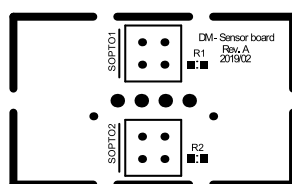
Příloha D – Osazovací výkres řídicí DPS



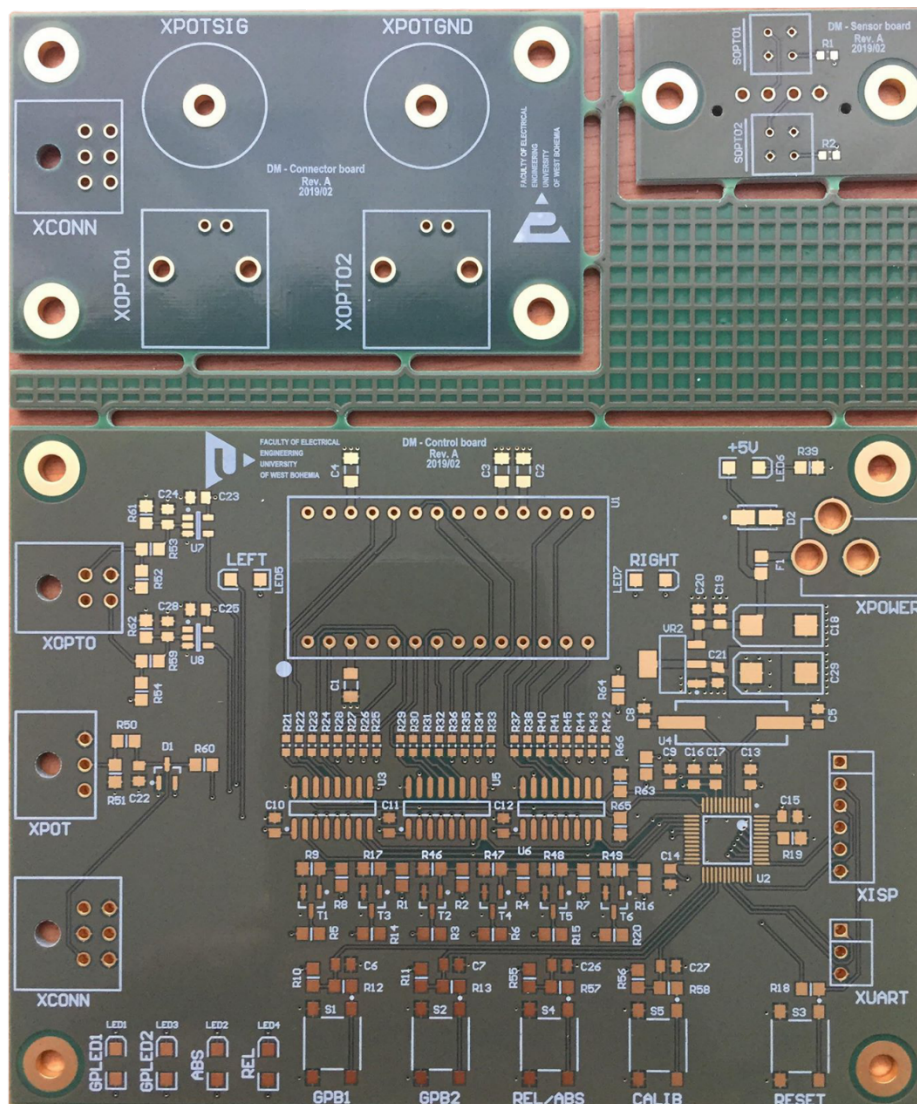
Příloha E – Osazovací výkres konektorové DPS



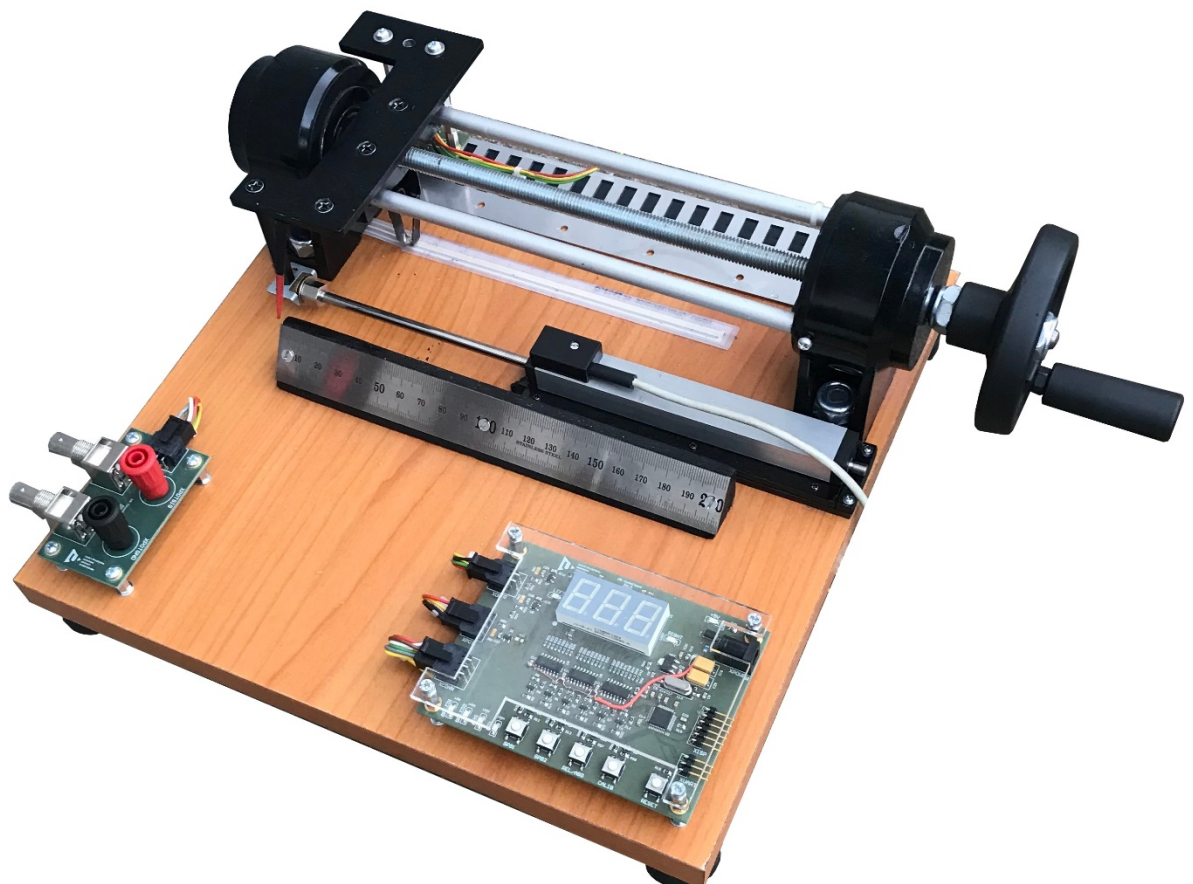
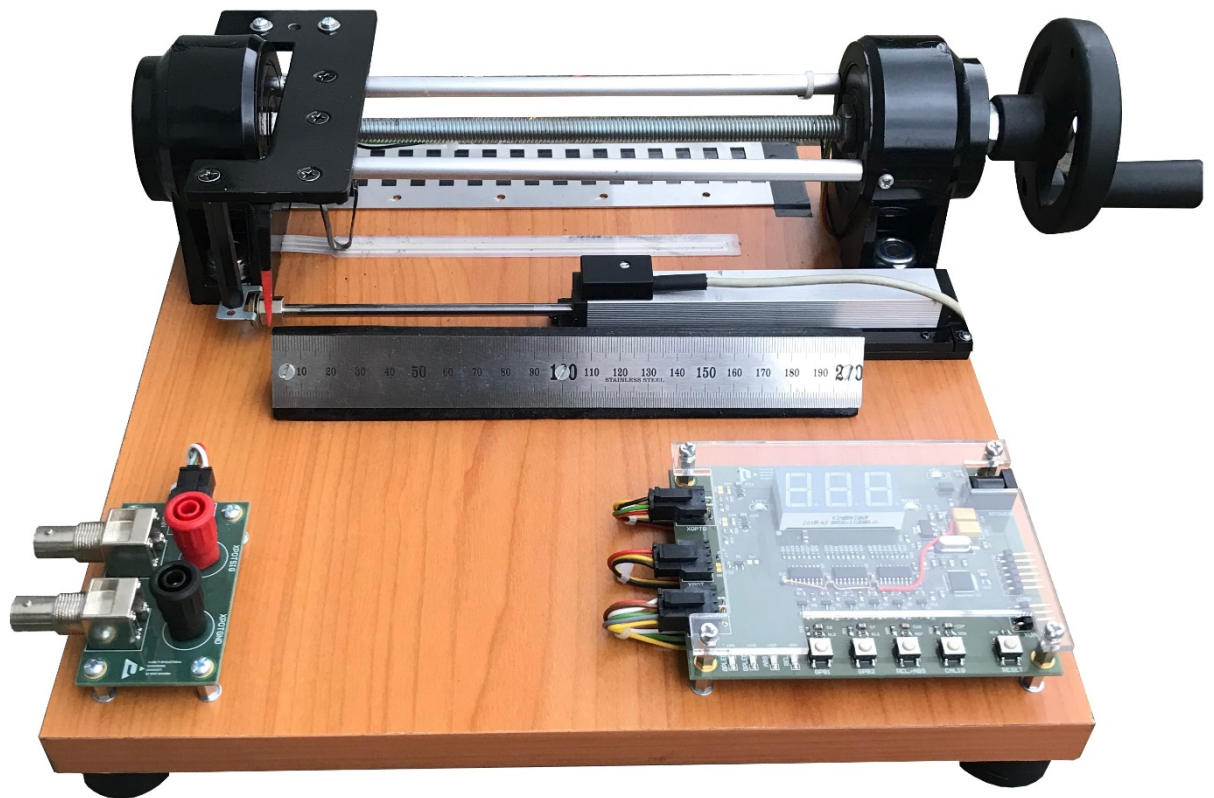
Příloha F – Osazovací výkres sensorové DPS



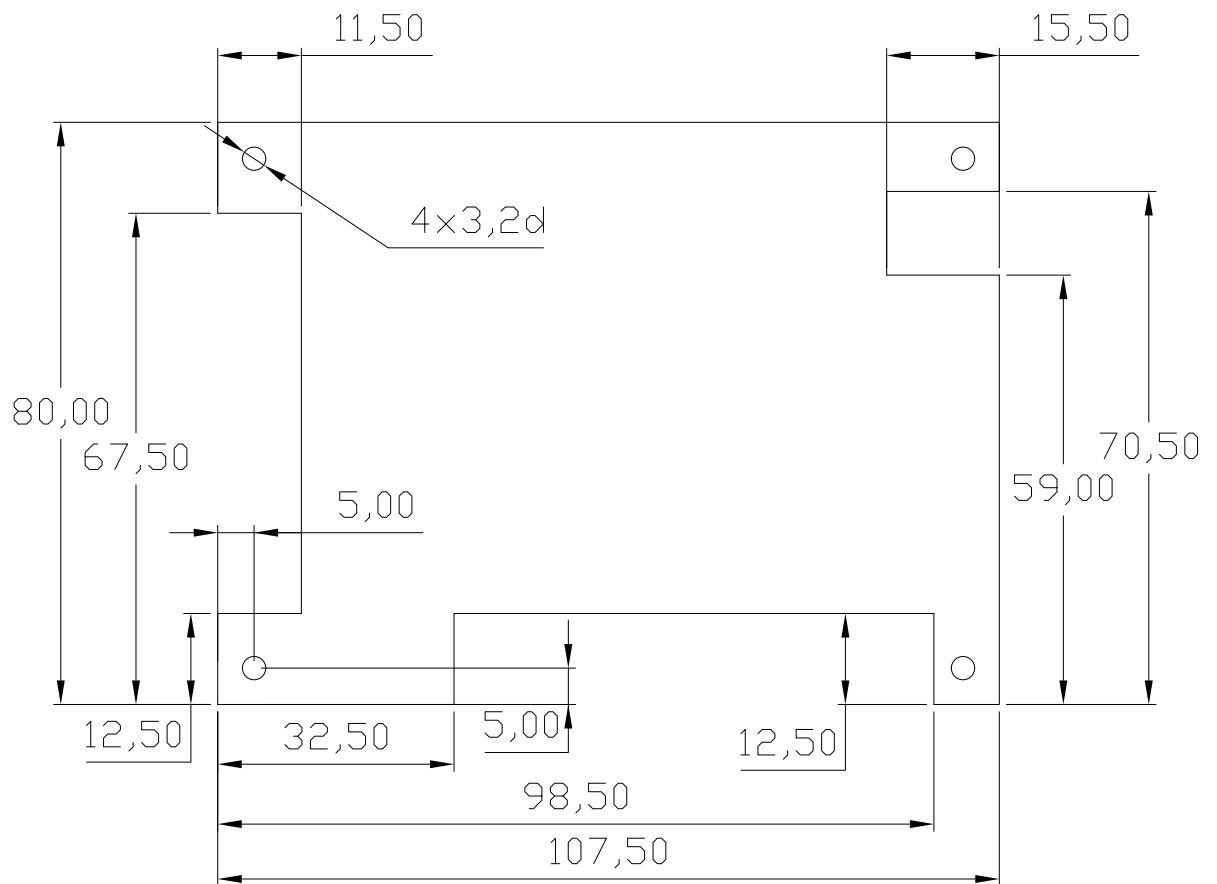
Příloha G – Vyrobené DPS – panel



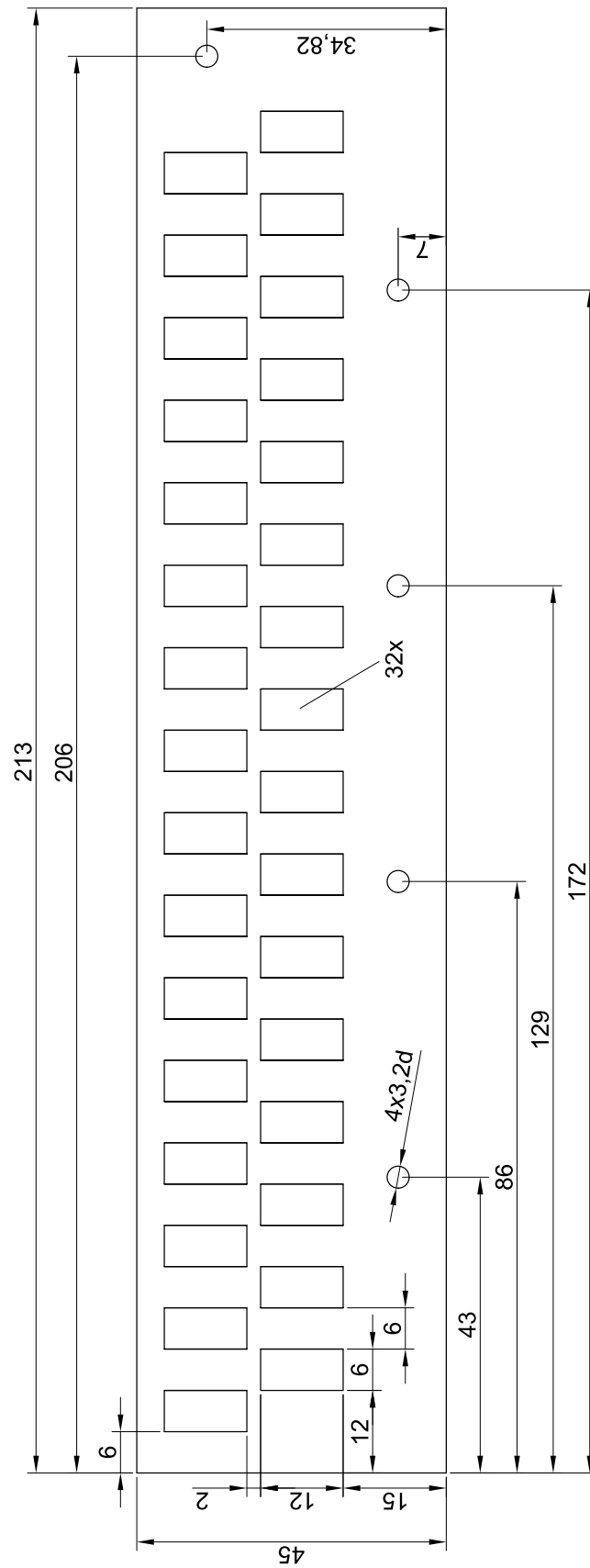
Příloha H – Hotový přípravek



Příloha I – Výrobní výkres plexiskla



Příloha J – Výrobní výkres stupnice



Příloha K – Kusovník součástek

	Qty	Součástka	Hodnota	Pouzdro	Distr.	Obj. číslo
Řídicí deska	4	C1, C2, C3, C4	47uF/6V3/X5R	CAP_1206	TME	CL31A476MQHNNNE
	2	C5, C8	18pF/50V/C0G	CAP_0805	TME	CC0805JRNPO9BN180
	16	C6, C7, C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15, C17, C20, C21, C23, C25, C26, C27	100nF/50V/X7R	CAP_0805	TME	CC0805KRX7R9BB104
	1	C16	1uF/25V/X5R	CAP_0805	TME	08053D105KAT2A
	2	C18, C29	100uF/16V	CAP_Tan_D	TME	TAJD107K016RNJ
	1	C19	4,7uF/25V/X5R	CAP_0805	TME	CL21A475KAQNNNG
	3	C22, C24, C28	10nF/50V/X7R	CAP_0805	TME	CL31B103KBCNNNC
	1	D1	BAT54S	SOT-23	TME	BAT54S
	1	D2	SK34SMA	DO-214AC	TME	SK34SMA
	1	F1	0.5A	FUSE_0805	TME	FUSE 0805-FF PW 0A5
	3	LED1, LED3, LED6	GREEN	LED_1206	TME	LL-S150GC-2A
	2	LED2, LED4	YELLOW	LED_1206	TME	LL-S150YC-2Y
	2	LED5, LED7	RED	LED_1206	TME	LL-S150SC-2S
	6	R1, R2, R4, R7, R8, R16	1k/1%	RES_0805	TME	CRCW08051K00FKTABC
	7	R3, R5, R6, R14, R15, R20, R39	330R/1%	RES_0805	TME	0805S8F3300T5E
	11	R9, R17, R19, R46, R47, R48, R49, R63, R64, R65, R66	10k/1%	RES_0805	TME	RC0805FR-0710KL
	4	R10, R11, R55, R56	3k3/1%	RES_0805	TME	0805S8F3301T5E
	5	R12, R13, R18, R57, R58	100R/1%	RES_0805	TME	RC0805FR-07100RL
	24	R21, R22, R23, R24, R25, R26, R27, R28, R29, R30, R31, R32, R33, R34, R35, R36, R37, R38, R40, R41, R42, R43, R44, R45	100R/1%	RES_0603	TME	0603SAF1000T5E
	1	R50	470k/1%	RES_0805	TME	CRCW0805470KFKTABC
	4	R51, R60, R61, R62	D.N.P.	RES_0805		
	2	R52, R54	33k/1%	RES_0805	TME	RC0805FR-0733KL
	2	R53, R59	0R/5%	RES_0805	TME	0805S8J0000T5E
	5	S1, S2, S3, S4, S5	B3S-1000	B3S-1000	TME	B3S-1000
	6	T1, T2, T3, T4, T5, T6	AO3422	SOT-23	TME	AO3422
	1	U1	BA56-11SRWA	BA56	TME	BA56-11SRWA
	1	U2	STM32F030C8T6	LQFP48_N	TME	STM32F030C8T6
	3	U3, U5, U6	STPIC6C595MTR	SOIC16	TME	STPIC6C595MTR
	1	U4	16.00 MHz	HC49SM	TME	16.00M-SMDHC49S
	2	U7, U8	SN74LVC1G14	SOT-23-5	TME	SN74LVC1G14DBVR
	1	VR2	LD1117S33TR	SOT223	TME	LD1117S33TR
	1	XCONN	6-pin, 3.0 mm, edge, female	430450600	TME	43045-0600
	1	XISP	Header 6, 2.54 mm, right angle	Pin_Header_1x6	TME	90121-0766
	1	XOPTO	4-pin, 3.0 mm, edge, female	430450400	TME	43045-0400
	1	XPOT	3-pin, 3.0 mm, 90°	436500300	TME	43650-0300
	1	XPOWER	DC JACK	CON_PWR	TME	NEB 21 R
1	XUART	Header 3, 2.54 mm, right angle	Pin_Header_1x3	TME	90121-0766	
Konekt. deska	1	XCONN	6-pin, 3.0 mm, edge, female	430450600	TME	43045-0600
	2	XOPTO1, XOPTO2	BNC, right angle	BNC	TME	1-1337494-0
	1	XPOTGND	23.3130-21, black	SEB4-R-21	TME	SEB4-R-21
	1	XPOTSIG	23.3130-22, red	SEB4-R-22	TME	SEB4-R-22
Senz. deska	2	R1, R2	100R/1%	RES_0603	TME	0603SAF1000T5E
	2	SOPTO1, SOPTO2	CNY70	CNY70	TME	CNY70
	1	XOPTO	4-pin, 3.0 mm, straight	43650-0429	TME	43650-0429

Příloha L – Manuál k laboratornímu cvičení

KET/MNV

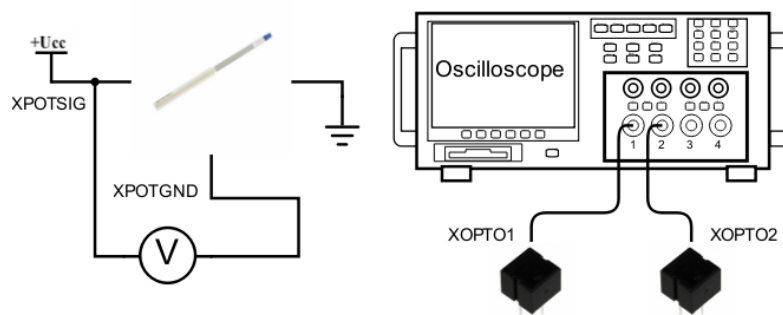
Měření polohy

**Návod k laboratornímu cvičení
Měření mechanické polohy****1) Zadání**

- 1) Prostudujte různé způsoby měření mechanické polohy dostupné v laboratoři.
- 2) Proveďte měření na přípravku s odporovým snímačem:
 - a) Pomocí ultratenkého odporového snímače změřte závislost $X = f(U)$.
 - b) Krok měření určete vhodně vzhledem celkové délce dráhy. Vzdálenost kontrolujte snímačem polohy připojeným k přístroji ALMEMO. Proměřte celý rozsah snímače, tedy 0–100 mm.
 - c) Závislost graficky znázorněte, aproximujte vhodnou funkcí a vysvětlete, proč jste se pro daný typ funkce rozhodli.
- 3) Proveďte měření pomocí inkrementálního optického snímače:
 - a) Pomocí optického snímače proměřte závislost vzdálenosti na počtu pulzů. Pomocí přístroje ALMEMO zjistěte převod vzdálenosti na pulzů (1 pulz odpovídá X mm).
 - b) Závislost graficky znázorněte.
 - c) Pomocí osciloskopu zaznamenejte průběhy signálů z obou čidel.
- 4) V závěru zhodnoťte přesnost jednotlivých měření a určete, čím je přesnost ovlivněna.

2) Teoretický úvod

Stručně popište, jakými metodami lze mechanickou polohu měřit. Detailněji vysvětlete princip senzorů použitých v této úloze (UIPMA150I472XCB, CNY70, ALMEMO FWA100T).

3) Schéma zapojení

KET/MNV

Měření polohy

4) Postup měření

Před začátkem měření připojte přípravek pomocí napájecího adaptéru do sítě.

Měření pomocí odporového senzoru

- 1) Připojte čidlo polohy k přístroji ALMEMO.
- 2) Přístroj ALMEMO zapněte a případně nastavte do režimu měření polohy.
- 3) K výstupům přípravku XPOTSIG a XPOTGND připojte multimetr a nastavte jej na měření stejnosměrného napětí ve vhodném rozsahu vzhledem k napájení +3,16 V.
- 4) Nastavte jezdec přípravku do výchozí polohy. Přístroj ALMEMO ukazuje 0 mm.
- 5) Změřte hodnotu napětí v dané poloze.
- 6) Jezdcem nastavte další polohu.
- 7) Body 5 a 6 opakujte pro celý rozsah měření.
- 8) Naměřené hodnoty převed'te na vzdálenost s využitím níže uvedeného vzorce a získané hodnoty porovnejte s hodnotami z přístroje ALMEMO.

$$X_{ODP} = X_{DRÁHA} \frac{U_{CC} - U_{ODP}}{U_{CC}}$$

Ve vzorci značí U_{CC} napětí na odporovém senzoru s jezdcem v nulové poloze a jeho velikost je 3,16 V. Celková délka dráhy senzoru $X_{DRÁHA}$ je pak 15 cm.

Měření pomocí optického čidla

- 1) Od přípravku odpojte multimetr a připojte osciloskop. Na první kanál osciloskopu připojte signál XOPTO1 a na druhý kanál připojte signál XOPTO2.
- 2) Nastavte jezdec do výchozí polohy a na přípravku stiskněte tlačítko CALIB pro kalibraci. Přístroj ALMEMO ukazuje 0 mm.
- 3) Nastavte vhodnou hodnotu, odečtete počet pulzů na segmentovém displeji a vzdálenost zobrazovanou přístrojem ALMEMO. Ze získaných hodnot určete poměr mezi vzdáleností a počtem pulzů.
- 4) Nyní nastavte jezdec do výchozí polohy, proved'te kalibraci a s vhodným krokem proměřte celou závislost.
- 5) Naměřený počet pulzů převed'te na vzdálenost a porovnejte s hodnotami z přístroje ALMEMO.
- 6) Na jednom oscilogramu zaznamenejte vícenásobnou změnu signálů XOPTO1 a XOPTO2 při změně polohy jezdece.

KET/MNV

Měření polohy

5) Naměřené hodnoty

Tabulka 1 - Naměřené hodnoty pomocí odporového snímače

U [V]									
X_{ALM} [mm]									
X_{ODP} [mm]									

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty pomocí optického snímače

Pulzy [-]									
X_{ALM} [mm]									
X_{OPT} [mm]									

6) Použité přístroje

Přístroj	Typ	Inv. číslo

7) Závěr