



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky

Diplomová práce

**Aktuátor s řízeným náklonem v ose x,y ovládaný
pohybem akcelerometru**

Autor: Bc. Aron Primas

Studijní program: Elektronika a komunikace

Specializace: Elektronika

Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Primas** Jméno: **Aron** Osobní číslo: **483568**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Elektronika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Aktuátor s řízeným náklonem v ose x,y ovládaný pohybem akcelerometru

Název diplomové práce anglicky:

Actuator with Controlled Tilt in the x,y Axis Controlled by the Movement of the Accelerometer

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši současného stavu řešení systémů pro ovládání 2D náklonu aktuátoru řízeného vzdáleně pomocí akcelerometru.
2. Navrhněte model aktuátorového náklonoměrného systému ovládaného např. servy v ose x,y (0-180o), řízeného na dálku pohybem akcelerometru. Systém doplňte displejem pro kontrolu náklonu. Rozhodněte o formě řízení náklonu (digitální nebo analogové), vyberte vhodný typ akcelerometru. Navržený model realizujte s drátovým propojením.
3. Zjistěte dosažené parametry realizovaného systému, porovnejte s parametry komerčních systémů, navrhněte možná vylepšení systému.

Seznam doporučené literatury:

1. Puccio, M. R. Tilt sensor provides accurate elevation angle measurement in Satellite Antenna Systems. Spectron sensors [online], <https://www.spectronsensors.com/articles/TiltSensor.pdf>
2. Looking for a Superior Form Fit Function Clinometer or Inclinator? Spectron sensors [online]. <https://spectronsensors.com/inclinometers.php>
3. Fisher, Ch. J. AN-1057 Using an Accelerometer for Inclination Sensing. <https://www.analog.com/en/app-notes/an-1057.html>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc. katedra mikroelektroniky FEL

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **13.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

V Praze 16. května 2024

.....

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce, prof. Ing. Miroslavu Husákovi, CSc. za vstřícný a věcný přístup. Poděkování patří též panu Miroslavu Horníkovi za výrobu mechanického modulu k navrhovanému zařízení. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Vilímovi za cenné rady při tvorbě desky plošných spojů, panu Ing. Jiřímu Hájkovi, Ph.D. za technologickou výpomoc a Laboratoři pro vývoj a realizaci za přístup k technologiím pro realizaci modelu. Též bych chtěl poděkovat svým nejbližším za trpělivost, kterou ke mně po toto náročné období měli.

Aron Primas

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá snímáním náklonu a jeho převodem na akční členy. Jsou uvedeny oblasti jejich použití a též příklad komerčního výrobku. Základní prvek je *akcelerometr*, který je klíčovou komponentou, umožňující přesné snímání úhlu náklonu v ose x a y. Jsou představena jeho různá technologická provedení a následně je proveden stručný úvod do výpočtu náklonu senzoru z měřených dat zrychlení, sejmutých ve dvou či třech osách.

Jádrem praktické části práce je návrh a realizace zařízení pro měření náklonu ve dvou osách a jeho indikaci pomocí displeje a mechanického modelu se servomotory. Elektrické zapojení je realizováno vlastní deskou plošných spojů. Následně je provedena diskuze o dosažených kvalitách realizovaného zařízení, finanční rozbor nákladů na výrobu i možnosti zlepšení jeho funkčních vlastností.

Klíčová slova

Náklonoměr, úhel, akcelerometr, ESP 32, servomotory, displej

Abstract

This diploma thesis deals with tilt sensing and tilt actuators. Tilt sensing field of application and an example of commercial product are presented. Furthermore, an accelerometer is introduced along with its different technological solutions. It is a key component used for accurate tilt sensing in the x and y axes. This is followed by an introduction to calculation of sensor tilt from acceleration data measured in two or three axes.

Practical part of thesis consists of a design and realisation of a device for dual-axis tilt measurement. The device uses LED display and mechanical model with servo motors for indication of measured tilt angles and integrates the electronic circuitry using a printed circuit board. Lastly, qualities of the constructed device are discussed followed by an analysis of financial costs of the device realization. Several points are made about options of improvement of the measuring device characteristics.

Klíčová slova

Inclinometer, angle, accelerometer, ESP 32, servo motors, display

Obsah

Úvod.....	11
1 Elektronické náklonoměry	12
1.1 Aplikace elektronických náklonoměrů.....	12
1.2 Příklad profesionálního náklonoměru	13
2 Akcelerometr	14
2.1 Aplikace akcelerometru.....	14
2.2 Typy akcelerometrů	14
2.3 Měření náklonu pomocí akcelerometru.....	17
3 Náklonoměr se servomotory – koncepce	19
3.1 Blokové schéma zařízení	19
3.2 Provizorní model	19
3.3 Mechanická část náklonoměru	20
3.4 Měření zrychlení a výpočet úhlu náklonu ve dvou osách.....	20
4 Hardware	22
4.1 Funkční bloky zařízení	22
4.1.1 Ochrana a nabíjení baterie.....	22
4.1.2 Step-up měniče.....	23
4.1.3 Senzor – akcelerometr.....	25
4.1.4 Servomotory.....	27
4.1.5 Sedmissegmentový displej pro zobrazení náklonu	28
4.1.6 Modul LoLin32	29
4.2 Návrh DPS.....	31
4.3 Osazení a finální podoba zařízení.....	31
5 Software	32
6 Zhodnocení realizovaného zařízení	34
7 Závěr.....	35
7.1 Finanční rozbor realizace	35
7.2 Zhodnocení dosažených výsledků, možnosti zlepšení	35
Literatura.....	37
Přílohy	41
Příloha 1	41
Příloha 2	42
Příloha 3	43
Příloha 4	44
Příloha 5	45

Seznam použitých zkratek

ADC	<i>Analog-Digital Converter</i> , analogově-digitální převodník
DPS	Deska plošných spojů
GPIO	<i>General-Purpose Input/Output</i> , univerzální vstupní/výstupní pin
LDO	<i>Low Drop Out Regulator</i> , regulátor s nízkým úbytkem napětí
LED	<i>Light Emitting Diode</i> , svítivá dioda
Li-ion	Lithium-iontová technologie akumulátorů
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> , pulzně šířková modulace
QFN	<i>Quad Flat No-lead</i> , typ pouzdra součástky pro povrchovou montáž
SMD	<i>Surface Mounted Devices</i> , součástky pro povrchovou montáž
THT	<i>Through Hole Technology</i> , součástky s drátovými vývody
USB	<i>Universal Serial Bus</i> , univerzální sériová sběrnice
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i> , univerzální asynchronní přijímač-vysílač

Seznam použitých symbolů

a_g	g	Gravitační zrychlení
C	F; Ah	Kapacita
f	Hz	Frekvence
I	A	Proud
L	H	Indukčnost
R	Ω	Odpor
U	V	Napětí

Seznam obrázků

1.2 Náklonoměr Spectrotilt.....	13
2.2 Princip funkce kapacitního akcelerometru	14
2.2 Struktura tříosého piezoelektrického akcelerometru.....	15
2.2 Princip funkce piezorezistivního akcelerometru	16
2.2 Princip funkce tunelujícího akcelerometru	17
2.3 Jednoosý náklon akcelerometru.....	17
2.3 Průběh měřeného zrychlení na úhlu náklonu.....	18
3.1 Blokové schéma konstruovaného zařízení.....	19
3.4 Náskres náklonu zařízení v prostoru.....	20
4.1.1 Elektrické schéma bloku ochrany a nabíjení baterie.....	22
4.1.2 Elektrické schéma step-up měniče pro servomotory.....	24
4.1.2 Elektrické schéma step-up měniče pro modul LoLin32.....	25
4.1.3 Elektrické schéma akcelerometru.....	26
4.1.4 Fotografie použitého servomotoru.....	27
4.1.5 Elektrické schéma LED displeje.....	28
4.1.6 Fotografie vývojového modulu LoLin32.....	29
4.1.6 Elektrické schéma zapojení modulu LoLin32.....	30
5 Blokové schéma zpracování měřených dat.....	32

Úvod

Zjišťování náklonu je bezesporu velmi důležitým odvětvím měření, které dnes nachází velmi široké uplatnění: zabezpečení automobilu, sledování stability budov, přesný náklon antény vůči satelitu či intuitivnější ovládání herních zařízení. Ať již jde o archaický bublinkový náklonoměr či moderní akcelerometr s vyhodnocovacím obvodem, který téměř každý z nás nosí denodenně v kapse v mobilním telefonu.

V diplomové práci se budu věnovat oblastem využití náklonoměru a uvedu příklad profesionálního komerčního náklonoměru. Následně uvedu úzce související senzor akcelerometr, který se dnes stal dominantní součástí pro měření náklonu, včetně jeho různých typů a uvedu též základní princip vyhodnocení náklonu ze změřených dat akcelerace – zrychlení.

Součástí bude vlastní návrh a sestavení dvouosého náklonoměru na desce plošných spojů doplněného o dva servomotory, které změřený náklon budou ilustrovat na mechanickém modelu. Zařízení bude dále doplněné o LED displej, který bude zobrazovat náklon v obou osách.

1 Elektronické náklonoměry

1.1 Aplikace elektronických náklonoměrů

Měření náklonu je nezbytné v řadě technických odvětví. V následujících odstavcích budou popsány ty nejvýznamnější.

Moderní automobily obsahují velké množství senzorů, mezi které též patří senzor náklonu vozidla. Údaj o výchylce (náklonu) auta je využit například při jízdě do kopce, kdy řídicí elektronika může sklopit světla a tím zamezit oslnění protijedoucích vozidel či naopak při jízdě z kopce světla namířit výše a tím lépe osvětlit vozovku před řidičem.

Tento senzor je i velmi důležitým elektronickým zabezpečovacím prvkem, například pokud se zloděj pokusí automobil zvednout na heveru ve snaze odcizit kola či auto odtáhnout ve zdvihnuté poloze, alarm automobilu na toto může zareagovat. Velmi důležitá je ovšem i záchranná funkce, kdy v kombinaci s dalšími senzory v automobilu může pomoci identifikovat případnou nehodu a kontaktovat příslušné záchranné složky.

Sledování náklonu je též důležitou výbavou moderních lodí, umožňující kontrolu a prevenci přílišného náklonu, který by mohl způsobit jejich převrácení. Též ve stavebnictví je náklon budov důležitým prvkem, jehož sledování může včas odhalit nebezpečné změny ve stabilitě budovy [1].

Náklonoměr nachází též uplatnění v situacích, kdy je pro optimální příjem signálu pomocí antény nutné její orientaci soustředit na vysílač žádaného signálu v přesném směru. Při přijímání signálu ze satelitu na oběžné dráze pomocí mobilního přijímače (a též naopak pro vysílání signálu) je často nutné korigovat směr antény dle jejího aktuálního umístění vůči danému satelitu. To se týká například televizních výjezdových dodávek, které pokaždé mohou vysílat z jiného místa či přenosných vysílacích stanic pro využití například v hůře dostupných lokalitách. Tato zařízení snímají pomocí elektronického kompasu svou polohu vůči severu a pomocí náklonoměru svůj úhel vůči vodorovné rovině a následně obojí upraví pro optimální přenos dat [2].

Náklonoměr obsahuje v neposlední řadě velké množství herní elektroniky, kde umožňuje hráči ovládání své herní postavy, auta či jiného předmětu pomocí naklánění ovládacího zařízení – chytrého telefonu, tabletu či herní konzole, čímž často nahrazuje použití herního příslušenství, například volantu.

1.2 Příklad profesionálního náklonoměru

Následující obrázek znázorňuje průmyslový náklonoměr Spectrotilt firmy Spectron:



Obrázek 1: Náklonoměr Spectrotilt [3]

Tento jednoosý náklonoměr se vyrábí v provedení pro měření náklonu v horizontálním či vertikálním směru. Díky zatěsnění a mechanické odolnosti je předurčen k využití v náročném prostředí. Úhel náklonu je měřen v intervalu -60 až 60 stupňů, kdy přesnost ve výchylce do 10 stupňů činí 0,1 stupně a od 10 do 60 stupňů činí přesnost 1 % údaje. Odběr senzoru činí 26 mA [4].

2 Akcelerometr

Tato elektromechanická součástka slouží k měření zrychlení, které na ni působí, což může být měřeno v jedné, dvou či třech vzájemně ortogonálních osách. Konstrukčně se jednotlivé technologie realizace akcelerometru do značné míry liší, nicméně všechny v základu obsahují hmotu, která je úměrně působícímu zrychlení vychýlena, což je dále různými způsoby vyhodnoceno.

2.1 Aplikace akcelerometru

Akcelerometr nachází široké uplatnění v mnoha technických odvětvích. Při správné interpretaci dat, získaných z akcelerometru, lze identifikovat různé frekvenční složky zrychlení, které detekuje. Toho lze využít například v seismologii při detekci zemětřesení nebo i v průmyslových aplikacích, kde se takto detekuje porucha mechanických částí strojů, jako jsou třeba ložiska. Při aplikaci strojového učení lze inteligentní systém „naučit“ na frekvenční spektrum, detekované u ložiska bez defektu, a ten případnou poruchu pak může rozpoznat dle odchylek detekovaných spekter měřeného a nového ložiska.

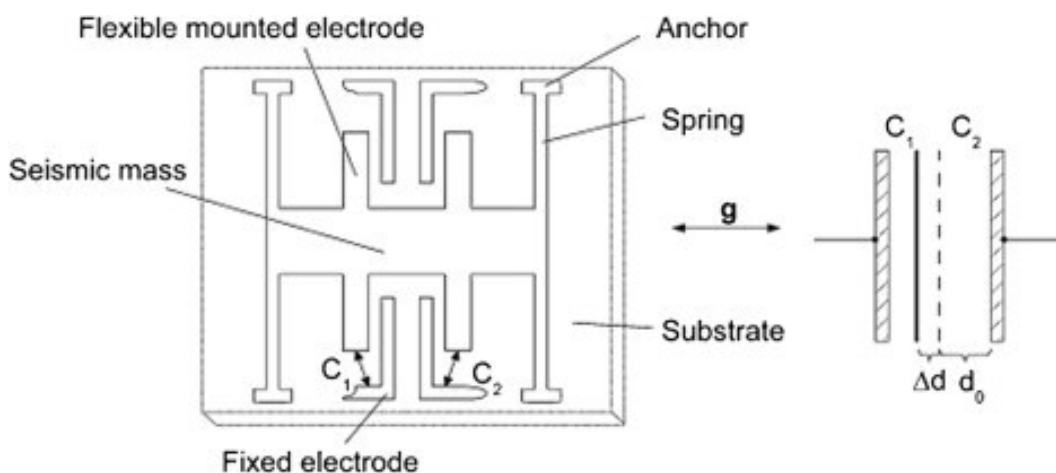
Dále lze měřením průniku gravitačního zrychlení Země do os akcelerometru velmi přesně sledovat náklon takového senzoru vůči vodorovné rovině, což z akcelerometru činí velmi rozšířenou součástku pro výrobu náklonoměrů.

2.2 Typy akcelerometrů

Akcelerometry jsou rozšířeny v několika provedeních, která jsou založena na různých fyzikálních principech a každé z nich nabízí své specifické vlastnosti.

Jedním z nejrozšířenějších a též finančně dostupných akcelerometrů je kapacitní typ, založený na principu změny kapacity při přiblížení či oddálení elektrod kondenzátoru.

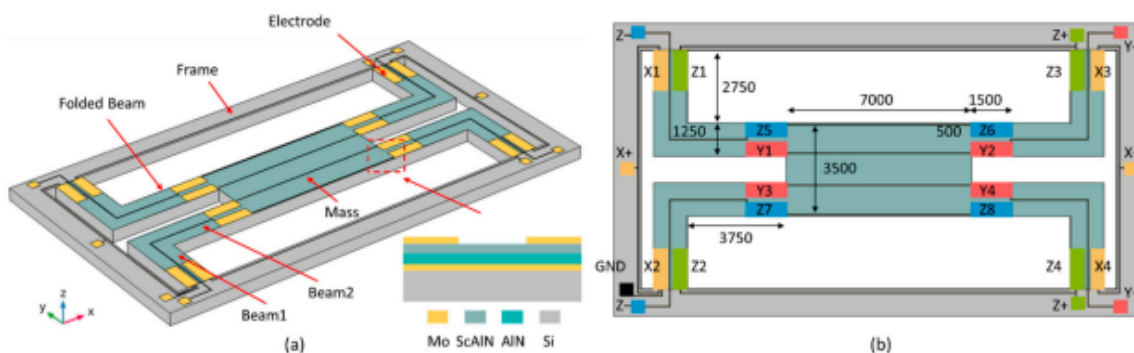
Následující obrázek ilustruje princip funkce kapacitního akcelerometru:



Obrázek 2: Princip funkce kapacitního akcelerometru [5]

Pro měření zrychlení je využita seismická hmota, upevněná na pružině, umožňující pohyb v jedné ose. Součástí jsou pevně umístěné elektrody, které dohromady se zmíněnou hmotou tvoří kondenzátory C_1 a C_2 , které se v systému dále periodicky opakují. Pokud se pohyblivá hmota přiblíží k jedné z elektrod, dojde ke zvýšení vzájemné kapacity. Naopak kapacita s vedlejší elektrodou je tím snížena, čímž je zajištěna vyšší citlivost senzoru. Vyhodnocování změny kapacity všech kondenzátorů struktury pak zajišťuje integrovaný elektronický obvod.

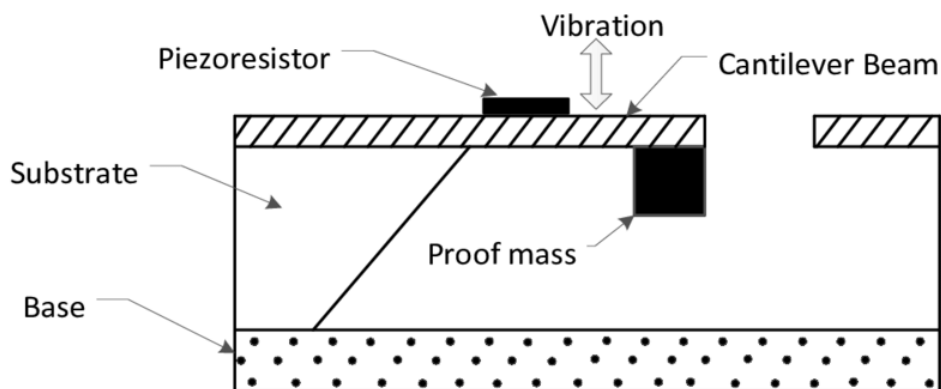
Další typ akcelerometru využívá piezoelektrický jev, kdy při deformaci krystalu dochází ke generování elektrického napětí. Příklad struktury tříosého piezoelektrického akcelerometru znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 3: Struktura tříosého piezoelektrického akcelerometru [6]

Tento akcelerometr využívá hmotu, umístěnou na 4 nosnících, na nichž jsou v několika místech umístěny piezoelektrické elementy v různých orientacích dle snímané osy zrychlení (x, y či z). Piezoelektrické akcelerometry nabízí široký rozsah měřeného zrychlení, vysoký frekvenční rozsah, poměrně snadnou konstrukci a též stabilní snímání zrychlení s dobrou linearitou [7].

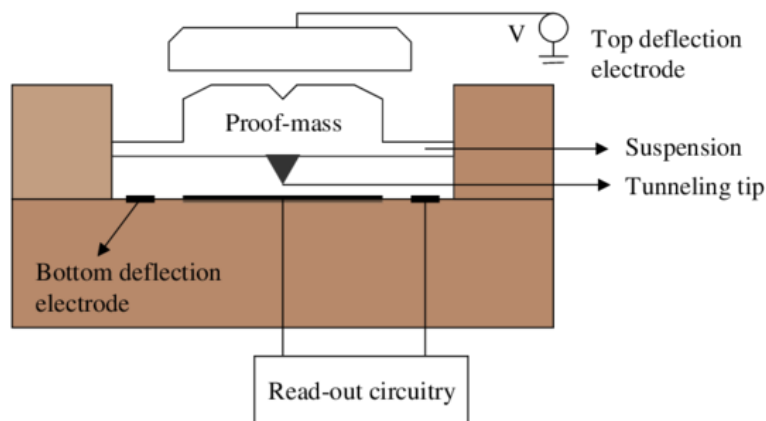
Podobnou skupinou akcelerometrů jsou ty, jež využívají piezoresistivní jev, kdy vlivem mechanické deformace piezoresistivního materiálu dochází ke změně jeho elektrického odporu, viz následující obrázek:



Obrázek 4: Princip funkce piezoresistivního akcelerometru [8]

Jak je patrné, zrychlení hmoty způsobí prohnutí nosníku s piezoresistivním elementem, což se projeví změnou jeho elektrického odporu. Piezoresistivní akcelerometry jsou schopné fungovat ve vysokých hodnotách g a jejich výroba i zpracování měřených dat není zvlášť komplikované. Mají nicméně několik nevýhod, primárně jde o nízkou citlivost či vysokou teplotní závislost [8][9].

Poměrně speciálním druhem jsou akcelerometry, jež využívají tunelování, používané pro *scanning tunneling microscope* [10]. Princip funkce znázorňuje následující obrázek:

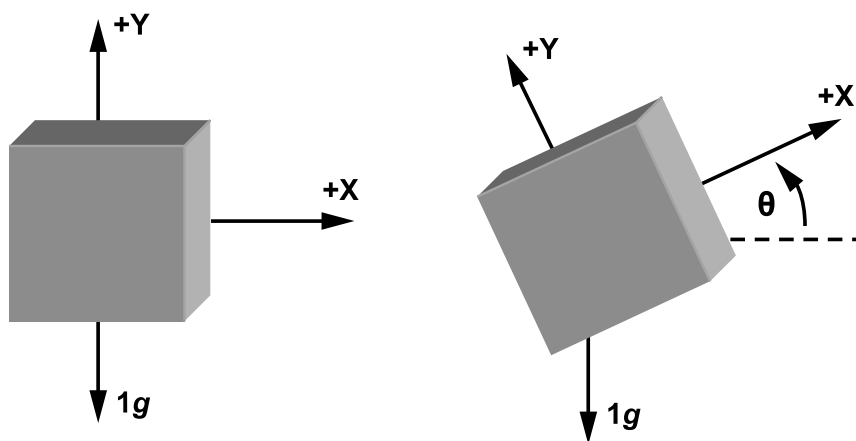


Obrázek 5: Princip funkce tunelujícího akcelerometru [11]

Mezi hrotem, upevněným na seismické hmotě, a spodní elektrodou teče tunelující proud, úměrný jejich vzájemné vzdálenosti. Do spodní vychylovací elektrody je připojeno napětí, nutné k udržení hmoty v konstantní vzdálenosti pomocí elektrostatického jevu během změn působícího zrychlení. Z hodnoty tohoto napětí je získávána informace o působícím zrychlení a jeho směru. Tento typ akcelerometrů nabízí velmi vysoké rozlišení měření (pod $1 \mu\text{g}$) [12].

2.3 Měření náklonu pomocí akcelerometru

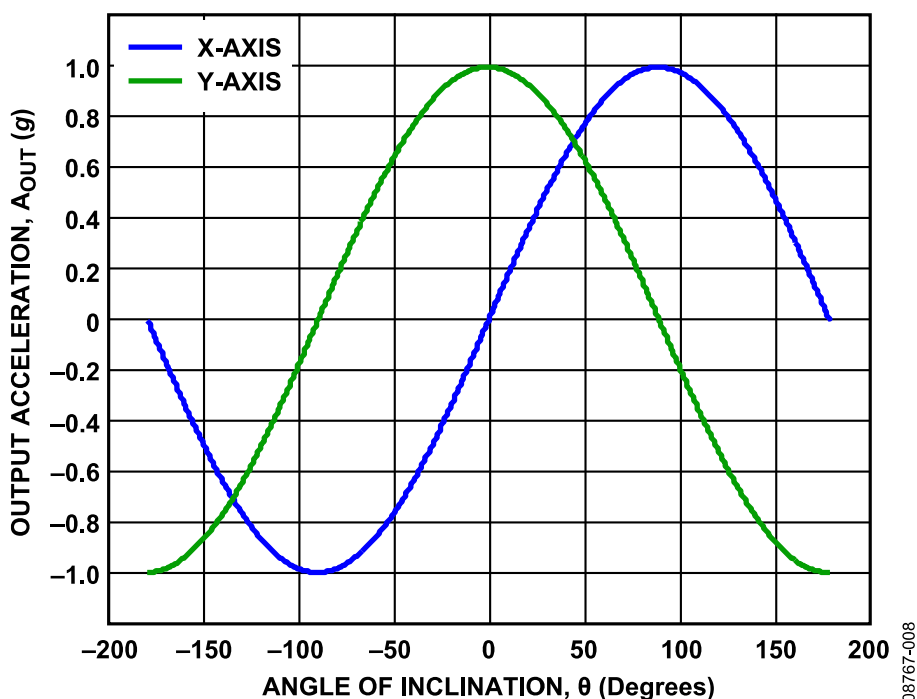
Tento obrázek ilustruje jednoosý náklon senzoru a působící gravitační zrychlení:



Obrázek 6: Jednoosý náklon akcelerometru [13]

08767-007

Průběh závislosti měřeného gravitačního zrychlení (A_{OUT}) na úhlu náklonu (θ) vykazuje sinusovou, resp. kosinovou (pro následující kolmou osu) funkci, jak je patrné z následujícího grafu:



Obrázek 7: Průběh měřeného zrychlení na úhlu náklonu [13]

Je evidentní, že citlivost měření zrychlení není konstantní a kolem extrémů funkce bude výrazně horší. Nicméně, pokud vezmeme do úvahy 90stupňové fázové posunutí průběhu zrychlení v obou osách, kolmých na osu otáčení, vidíme, že pokud v jedné ose je v jistém úhlu náklonu citlivost velmi nízká, druhá osa bude naopak vykazovat citlivost o to vyšší. Pokud pro výpočet úhlu náklonu θ využijeme vzorce [13]

$$\theta = \frac{360}{2\pi} \arctg\left(\frac{a_x}{a_y}\right), \quad (1)$$

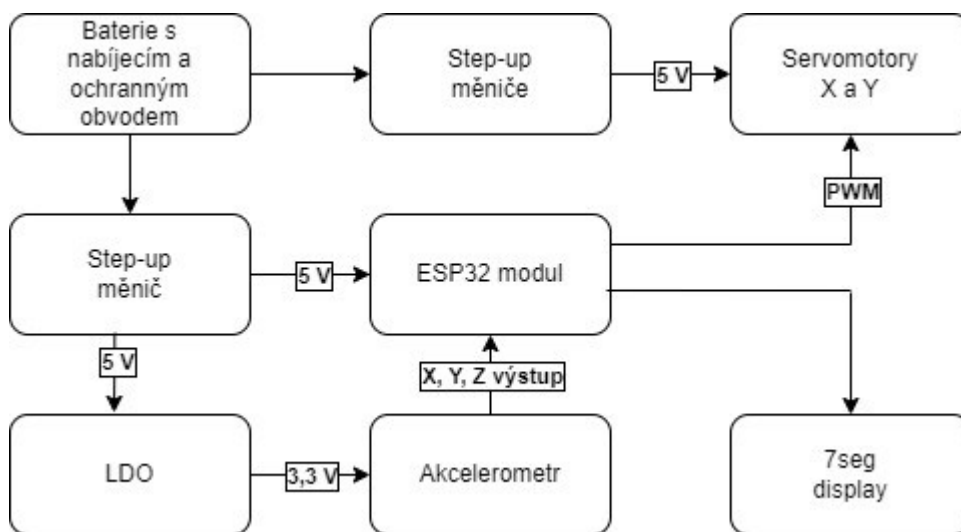
kde a_x a a_y jsou změřené údaje zrychlení v osách x, resp. y, získáme konstantní citlivost měření úhlu náklonu [13].

3 Náklonoměr se servomotory – koncepce

Navrhované zařízení si klade za cíl snímat náklon ve dvou horizontálních rotačních osách, zobrazovat jej na displeji a náklon indikovat pomocí dvou servomotorů, instalovaných na mechanickém modelu. Základní koncepce je rozvržena v následujících kapitolách.

3.1 Blokové schéma zařízení

Mechanismus funkce zařízení je znázorněn na následujícím blokovém schématu:



Obrázek 8: Blokové schéma konstruovaného zařízení

Zařízení bude řízeno modulem s mikrokontrolerem ESP32, který bude zajišťovat zpracování měřených dat z akcelerometru a následně ovládání servomotorů a LED displeje. Napájení bude zajištěno lithium-iontovou baterií velikostní řady 18650 s nabíjecím a ochranným obvodem. Pro napájení servomotorů a modulu mikrokontroleru ESP32 bude dále využít step-up měnič napětí (výstupní napětí je vyšší, než napětí vstupní).

3.2 Provizorní model

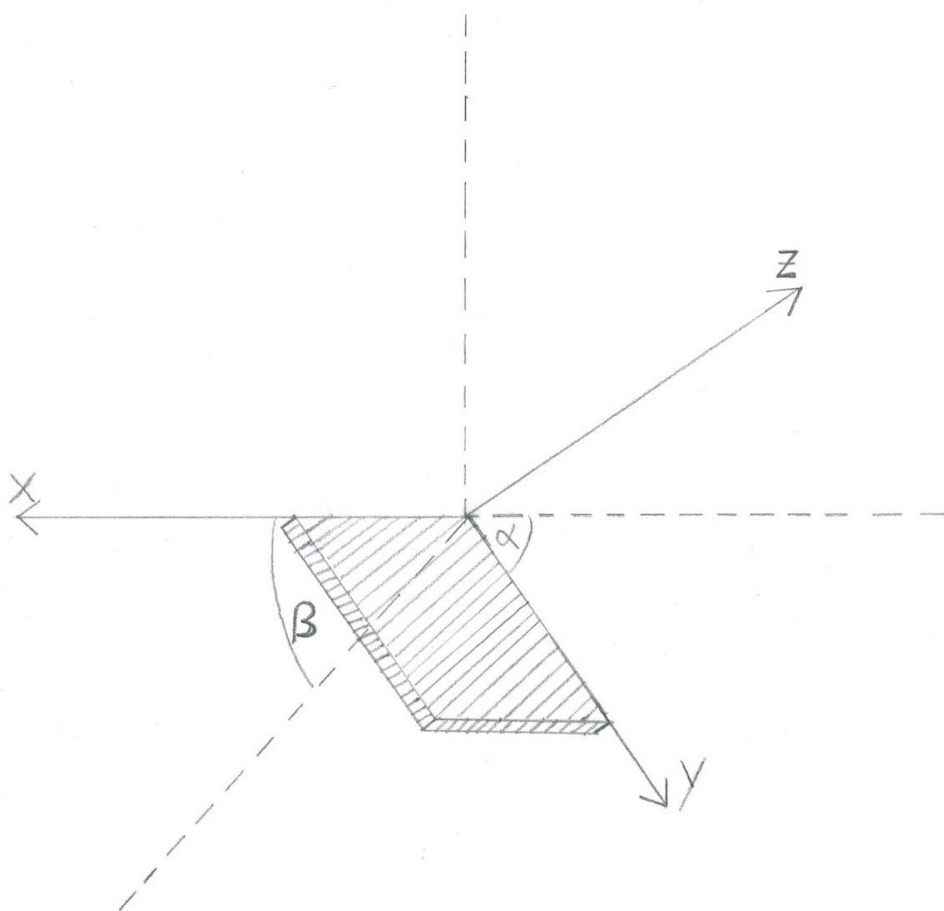
Finálnímu provedení zařízení, desce plošných spojů – dále DPS, předcházelo sestavení uvedeného obvodu s pomocí upravených, běžně dostupných funkčních modulů, doplněných o několik součástek a spojených dohromady pomocí drátového propojení, kde se ověřila prvotní funkčnost zapojení, viz fotografie v příloze 1.

3.3 Mechanická část náklonoměru

Servomotory, použité v tomto zařízení, budou pohánět mechanický model, který bude kopírovat náklon ve dvou osách. Tento mechanický model pro pokusné zařízení vyrobí strojní specialista, pan Miroslav Horník z Fakulty elektrotechnické.

3.4 Měření zrychlení a výpočet úhlu náklonu ve dvou osách

Pokusné zařízení ke snímání zrychlení bude využívat tříosý akcelerometr. Ze změřených hodnot následně bude počítán náklon dle os x a y . Následující náskres znázorňuje náklon zařízení s vyznačením obou zájmových úhlů rotace – α (náklon podle osy x) a β (náklon podle osy y):



Obrázek 9: Náskres náklonu zařízení v prostoru

Orientace úhlu náklonu je koncipována způsobem, kdy v případě, že osa rotace míří směrem k pozorovateli a náklon je ve směru hodinových ručiček, jde o kladnou hodnotu úhlu, pokud je náklon proti tomuto směru, úhel nabývá záporné hodnoty.

Pro výpočet úhlu náklonu bude vždy využito dvou na sebe kolmých os, které dohromady tvoří rovinu, kolmou na danou rotační osu. Tedy například pro výpočet náklonu podle osy x (úhel α) budou využity hodnoty zrychlení v osách y a z dle vzorce:

$$\alpha = \frac{360}{2\pi} \operatorname{arctg}\left(-\frac{a_y}{a_z}\right) \quad (2)$$

Pro úhel β pak platí:

$$\beta = \frac{360}{2\pi} \operatorname{arctg}\left(\frac{a_x}{a_z}\right) \quad (3)$$

Maximální hodnota nabíjecího proudu činí 1 A. Vzhledem k faktu, že navržené zařízení bude využívat Lithium-iontovou baterii o kapacitě 3450 mAh, je možné nastavit nabíjecí proud na maximální úroveň – baterie bude nabíjena pouze proudem 0,3 C (proud odpovídající 0,3násobku nominální kapacity, tedy zhruba 1 A). Napětí na rezistoru U_{PROG} činí ve vzorci 1 V. Pak z výše uvedeného vzorce vychází hodnota $R_{PROG} = 1200 \Omega$ [16].

Obvod DW01A zajišťuje proudovou a napětovou ochranu při nabíjení a vybíjení akumulátoru. V tomto schématu je použit dvakrát, poprvé pro obvod TP4056 jako proudová a napětová ochrana proti přebíjení a podruhé jako nadproudová ochrana při vybíjení a proti podvybití. V prvním případě je použit v kombinaci s duálním N-kanálovým MOSFET tranzistorem 8205A. V případě vybíjecí ochrany je použito dvou tranzistorů CMD1402. Maximální proudový odběr protékající tranzistory je dán úbytkem napětí na pinu *Current Sense* (CS), který činí 150 mV, a odporem tranzistorů $R_{DS(ON)}$ dle Ohmova zákona [17]. Tranzistory CMD1402 mají tento odpor rovný $0,0055 \Omega$ [18]. Pak lze spočítat maximální špičkový proudový odběr jako:

$$I = \frac{U}{2R_{DS(ON)}} = \frac{0,15}{0,011} \cong 13,6 \text{ A} \quad (5)$$

V rámci zařízení se nepočítá s konstantním odběrem vyšším než několik A, nicméně pro pokrytí špičkových odběrů následně použitých dvou servomotorů bylo potřebné dimenzovat proudovou ochranu na vyšší hodnoty ampér.

Nabíjení je napájeno prostřednictvím microUSB konektoru. Modrá LED indikuje připojení napájení, červená LED signalizuje stav nabíjení, po dokončení nabíjecího cyklu zhasne.

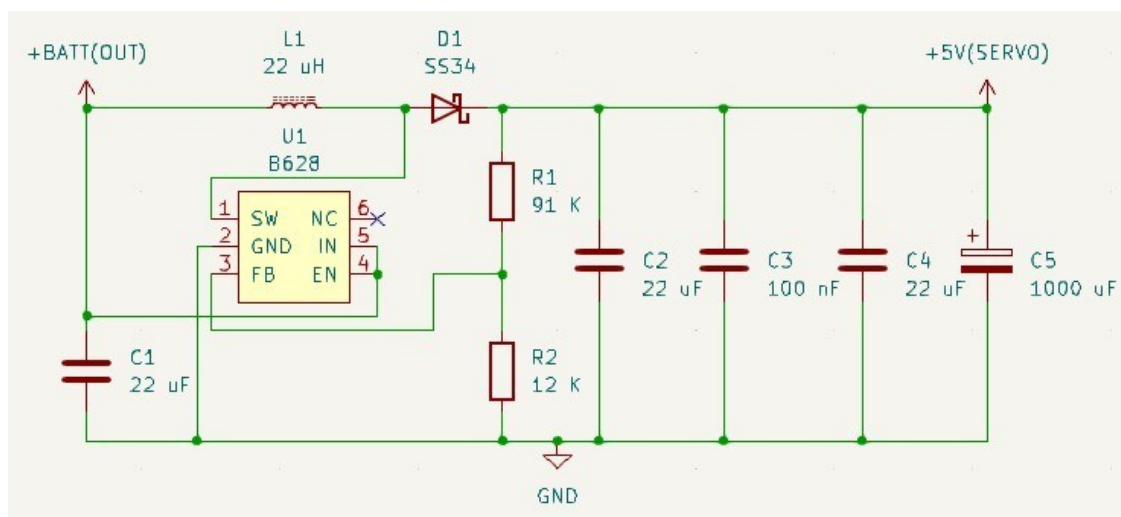
4.1.2 Step-up měniče

Servomotory, které tvoří součást navrhovaného zařízení, jsou napájeny 5 V. Z tohoto důvodu je nutné napětí 3,7 V, které poskytuje akumulátor, zvýšit na tuto úroveň. Též použitý modul LoLin32 vyžaduje napájení zhruba 5 V či 3,3 V (modul má v sobě integrovaný LDO, *Low Dropout Regulator*, který napětí 5 V snižuje na čipem ESP32 vyžadovaných 3,3 V). Zde jsou dvě možnosti:

První varianta znamená napájet modul přímo na napájecí větev 3,3 V pomocí LDO z akumulátoru, čímž je vynechán LDO v modulu, nicméně toto je poměrně omezující, protože by rozdíl napětí na vstupu a výstupu obvodu činil 0,4 V, což omezuje výběr těchto obvodů s dostatečným proudovým zásobením.

Druhé řešení, pro které jsem se nakonec rozhodl, znamená použití step-up měniče, který napětí zvýší na 5 V, které jsou následně vedeny do LDO v modulu LoLin32. Toto řešení sice znamená dvojnásobnou konverzi napětí s větším počtem komponent, nicméně lze zde použít snadno dostupné komponenty a též bezproblémově zajistit dostatečný proud pro mikrokontroler a další periferie (LED diody displeje, akcelerometr). Pro dostatečné proudové zásobení a lepší odrušení je měnič navržen zvlášť pro oba servomotory a samotný modul LoLin32.

Následující elektronické schéma znázorňuje elektronické zapojení napájecího měniče, použitého pro každý ze servomotorů:



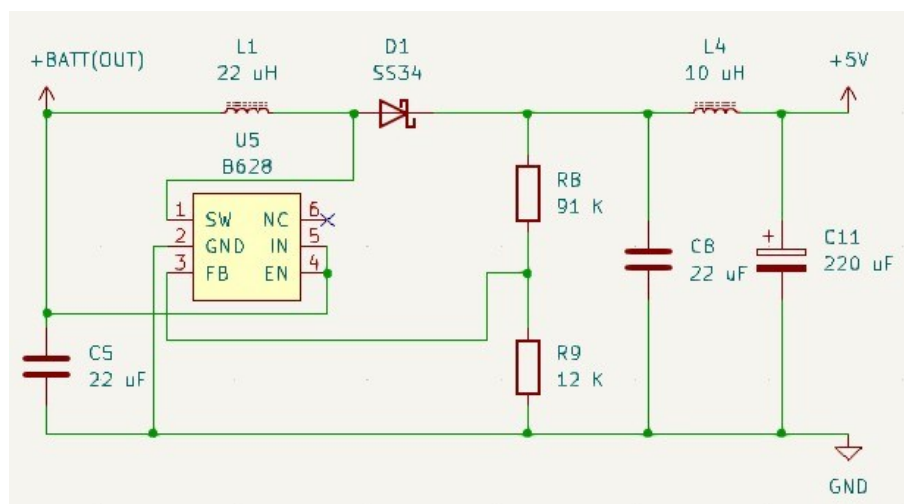
Obrázek 11: Elektrické schéma step-up měniče pro servomotory

Step-up měnič je založen na čipu MT3608 v kombinaci s několika pasivními součástkami (inspirace komerčním modulem s nastavitelným výstupním napětím, viz [19]). Výstupní napětí U_{OUT} je dáno rezistorovým děličem složeným z odporů R_1 a R_2 . Dle [20] je napětí U_{R2} (zpětná vazba FB – pin 3) udržováno na 0,6 V pomocí odpovídající střídy sepnutí obvodu přes pin 1 (SW). Pro výstupní napětí platí rovnice [20]:

$$U_{OUT} = U_{R2} \cdot \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) \cong 5 V \quad (6)$$

Co nejlíže konektoru servomotoru je použit elektrolytický kondenzátor o kapacitě 1000 μ F, který napomáhá ke snížení fluktuace napájecího napětí daného špičkovými odběry servomotoru společně s odrušovacími keramickými kondenzátory o kapacitě 100 nF a 22 μ F.

Následující schéma znázorňuje měnič napětí pro modul LoLin32:



Obrázek 12: Elektrické schéma step-up měniče pro modul LoLin32

Mimo základní součástky, použité též v předešlém obvodu, obsahuje výstupní filtr napětí (dolní propust) pro eliminaci vyskytujících se nežádoucích vysokofrekvenčních složek na výstupu, neboť tento zdroj napájí přes LDO obvod dále modul s čipem ESP32 a též sensorovou část zařízení – akcelerometr [21].

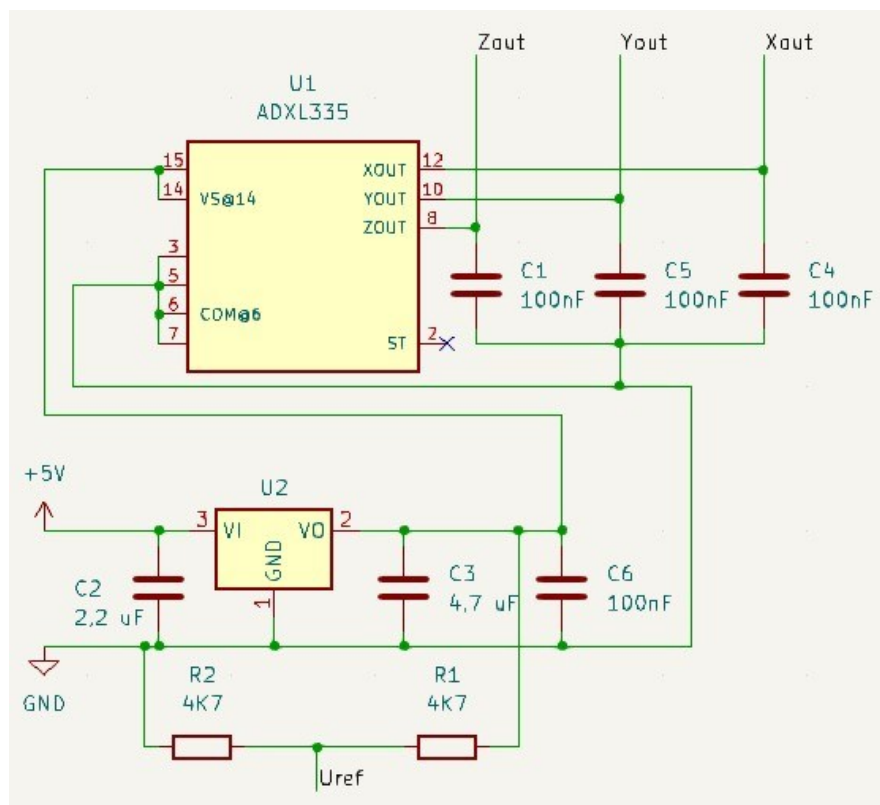
Filtr je složen ze serio-paralelního zapojení cívky o indukčnosti 10 μH a elektrolytického kondenzátoru o kapacitě 220 μF . V tomto uspořádání omezují stropní kmitočet f na zhruba 3400 Hz.

4.1.3 Senzor – akcelerometr

Pro snímání náklonu zařízení využívá 3osý analogový akcelerometr ADXL335 firmy Analog Devices. Tento akcelerometr využívá kapacitní technologii [22]. Získaná data – výstupní napětí každé osy – jsou centrována na polovinu napájecího napětí akcelerometru.

Volba analogového akcelerometru oproti digitálnímu nebyla jednomyslná a je spíše praktického charakteru, kdy předpokládám benefit možnosti snadné kontroly funkce akcelerometru pouhým změřením výstupního napětí voltmetrem. Vhodnost této volby zhodnotím po zkompletování zařízení na desce plošných spojů a otestování funkčnosti.

Následující schéma znázorňuje zapojení akcelerometru s dalšími pasivními součástkami, inspirované běžně dostupným modulem s tímto akcelerometrem [23]:



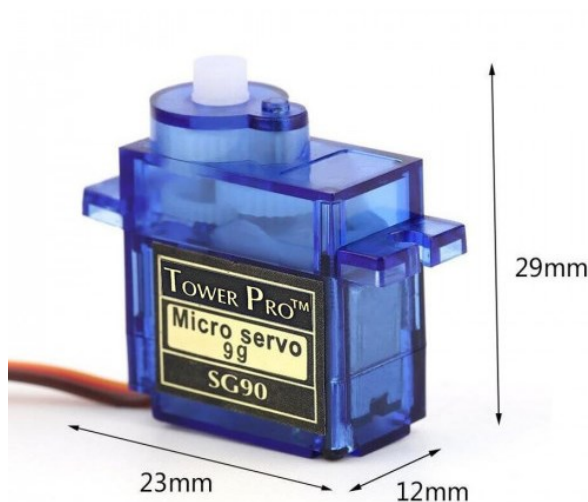
Obrázek 13: Elektrické schéma akcelerometru

Blok akcelerometru je připojen na napětí 5 V, které je pomocí lineárního stabilizátoru napětí sníženo na 3,3 V, kterými je poté napájen akcelerometr. Toto napětí je též snímáno pomocí odporového děliče, kdy polovina tohoto napětí (U_{REF}) je čtena A/D převodníkem mikrokontroleru ESP32. Tím je zajištěna informace o přesném stavu hodnoty poloviny napájecího napětí akcelerometru, potřebná pro následný výpočet úhlu náklonu.

Na každém ze 3 měřících výstupů akcelerometru je připojen keramický kondenzátor o kapacitě 100 nF. Tato hodnota odpovídá hodnotě použité v referovaném modulu a omezí výstupní šířku pásma na 50 Hz, neboť v náklonoměrné aplikaci se vyšší frekvence obvykle neuvažují a tím zajistí snížení šumu na výstupu akcelerometru [24][25].

4.1.4 Servomotory

Pro indikaci náklonu jsou v navrženém zařízení použity dva servomotory SG90 firmy Tower Pro s rozměry viz následující fotografie:



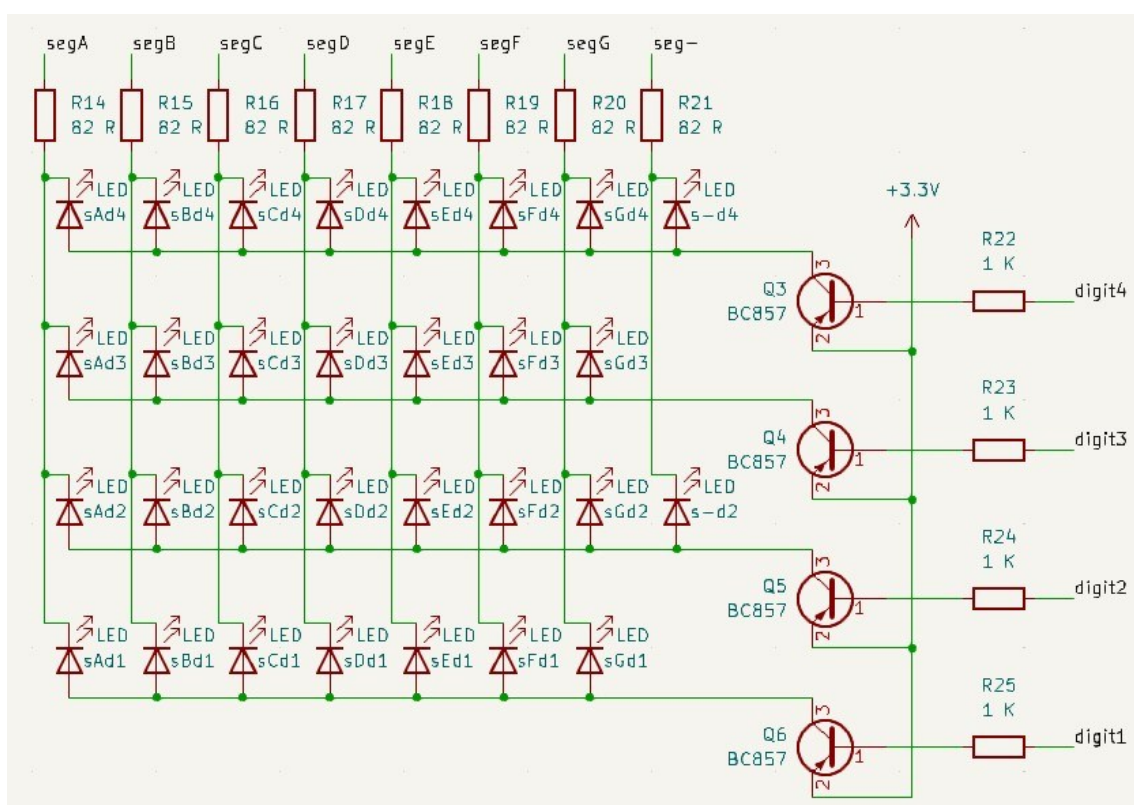
Obrázek 14: Fotografie použitého servomotoru [26]

Servomotor umožňuje otáčení ve 180° a bude napájen pomocí výše uvedeného měniče na 5 V. Mimo dva napájecí vodiče je ze servomotoru vyveden i vodič PWM, kterým je zajištěna internímu elektronickému obvodu informace o žádané výchylce.

Uvedené servomotory budou ovládat mechanický systém, který bude zajišťovat náklon ve dvou osách. Tento systém bude pro práci vyroben panem Miroslavem Horníkem z Fakulty elektrotechnické.

4.1.5 Sedmisegmentový displej pro zobrazení náklonu

Zobrazení náklonu v obou rotačních osách ve stupních bude prováděno prostřednictvím dvou displejů – diskrétních hranatých LED, uspořádaných do tvaru běžného dvoudigitového sedmisegmentového displeje, doplněného o znaménko “-“, neboť měřený úhel náklonu může dosáhnout až -90° . LED budou zapojeny v konfiguraci se společnou anodou, viz následující schéma:



Obrázek 15: Elektrické schéma LED displeje

Samotné spínání – multiplexování jednotlivých digitů zajišťují PNP tranzistory BC857. 4 piny pro ovládání digitů a 8 pinů pro ovládání segmentů displeje jsou připojeny na GPIO piny mikroprocesoru ESP32.

Displej je napájen 3,3 V. LED v obvodu budou napájeny $U_F = 1,95$ V, čemuž odpovídá proudový odběr $I_F = 10$ mA, což je pro GPIO piny bezpečná hodnota [27]. Pro výpočet bazových a předřadných rezistorů je uvažováno průměrné rozsvícení 5 segmentů na digitu, z čehož získáváme:

$$I_C = -5 \cdot I_F = -50 \text{ mA} \quad (7)$$

Pak proud bázi $I_B = -2,5$ mA, čemuž odpovídá $U_{BE} = -0,8$ V a $U_{CE} = -0,5$ V [28].

Následně hodnota předřadného odporu LED diody odpovídá

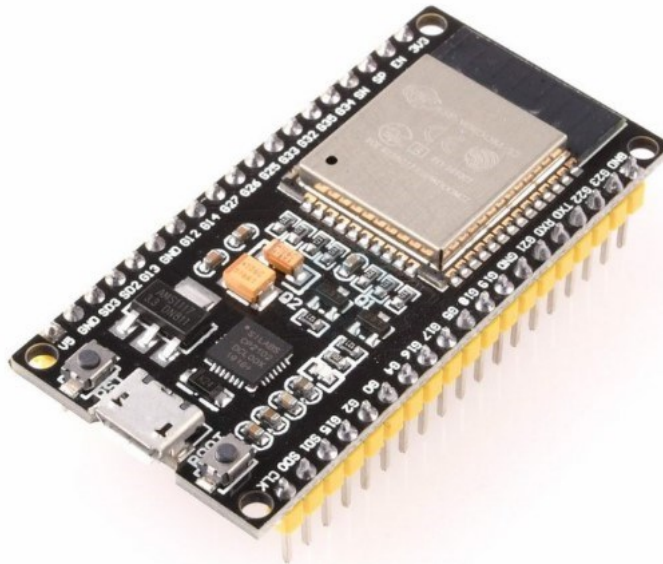
$$R_{LED} = \frac{3,3 + U_{CE} - U_F}{I_F} = 85 \Omega \quad (8)$$

V sadě E24 je nejbližší hodnota $R = 82 \Omega$, která je následně použita v navrženém obvodu. Pro bazový rezistor platí

$$R_B = \frac{3,3 + U_{BE}}{-I_B} = 1000 \Omega \quad (9)$$

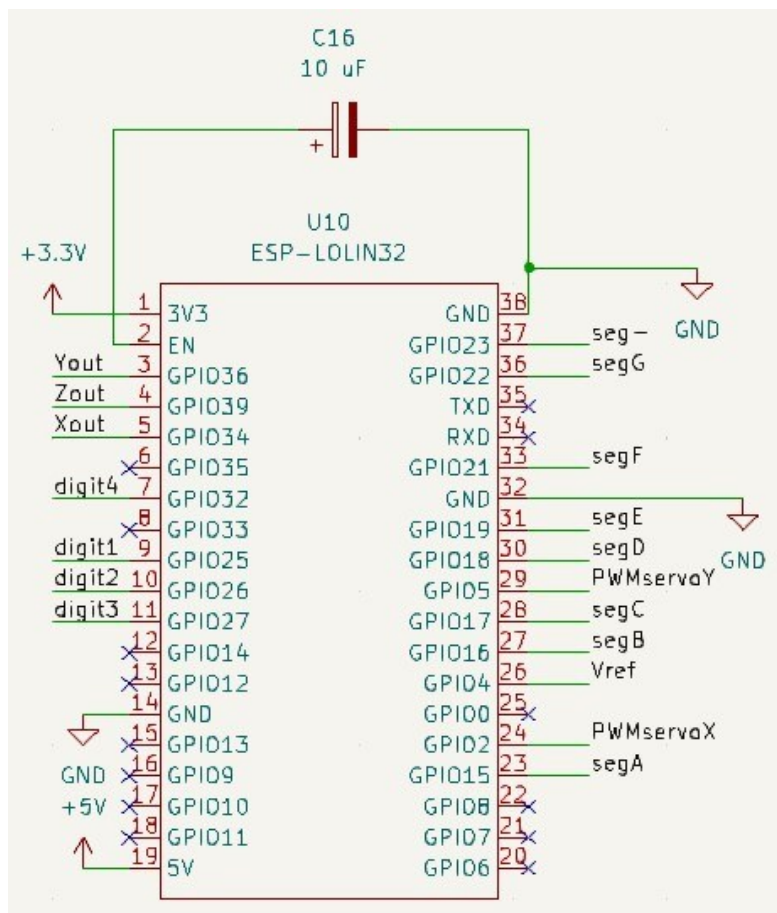
4.1.6 Modul LoLin32

Ovládání připojených periférií a zpracovávání měřených dat zajišťuje vývojová deska LoLin32, obsahující mimo mikrokontroler ESP-WROOM-32 též LDO pro napájení např. z 5 V, microUSB konektor pro nahrávání kódu, převodník CP2102 USB-UART pro komunikaci s mikrokontrolerem, LED či několik tlačítek, viz následující fotografie:



Obrázek 16: Fotografie vývojového modulu LoLin32 [29]

Pro bezproblémové nahrávání kódu do modulu je nutné připojit externě mezi piny *enable* a *ground* elektrolitický kondenzátor o kapacitě 10 μF [30]. Schéma zapojení tohoto bloku, včetně popisu připojení jednotlivých GPIO, znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 17: Elektrické schéma zapojení modulu LoLin32

Mikrokontroler spíná logickou úroveň 0/3,3 V na 12 pinech pro displej, pomocí ADC měří hodnotu napětí na 4 pinech (*Xout*, *Yout*, *Zout* a *Vref*) a pomocí PWM na 2 pinech ovládá náklon servomotorů.

4.2 Návrh DPS

Návrh desky plošných spojů probíhal ve volně dostupném programu KiCAD. Na počátku bylo potřebné vymezit rozměr desky, která je dvouvrstvá. Bylo nutné vzít v úvahu odhadované rozměry jednotlivých funkčních bloků a zajistit si adekvátní rezervu, aby například indukory nebyly příliš blízko sebe, signálové cesty byly dostatečně daleko od potenciálních zdrojů rušení či aby bylo propojení všech komponent v rámci desky proveditelné. Vzhledem k plánované instalaci DPS do krabičky bylo potřeba na desce uvažovat i montážní díry, které pracovní prostor dále omezí.

Po rozhodnutí o rozměru DPS 150x100 mm byl proveden návrh propojení a děr s ohledem na zajištění dobrého odrušení spínaných zdrojů od signálové části obvodu.

4.3 Osazení a finální podoba zařízení

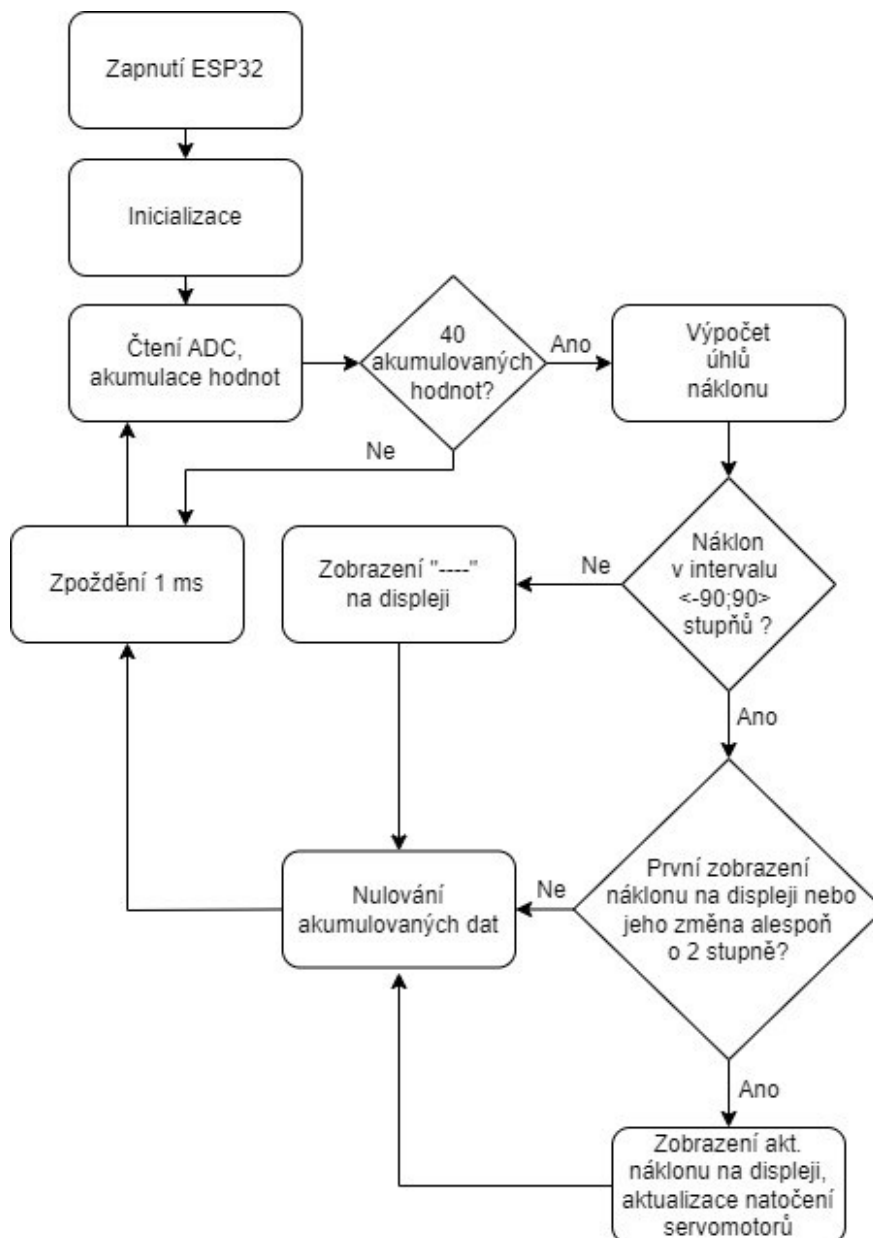
Fotografie kompletního zařízení je možné shlédnout v přílohách 2-5. Pájení komponent jsem provedl v Laboratoři pro vývoj a realizaci při Fakultě elektrotechnické. SMD součástky byly zapájeny kombinací klešťové mikropájky a horkovzduchu. Bylo nutné dbát zvýšené opatrnosti při osazování čipu akcelerometru typu QFN-16, aby bylo pouzdro co nejlépe zarovnané a senzor nebyl vůči DPS nakloněn. Toto bylo následně zkontrolováno pomocí laboratorního mikroskopu.

Následně bylo zařízení instalováno do krabičky vytištěné na 3D tiskárně. Montáž do krabičky má vedle zvýšení mechanické odolnosti i velký význam v zajištění vodorovnosti DPS vůči ploše, na kterou bude zařízení položeno, neboť spodní strana desky kvůli nedokonalé zkráceným vývodům THT součástek tvoří zcela rovnou plochu.

5 Software

Kód je napsán ve vývojovém prostředí ArduinoIDE 1.8.19 a využívá knihovny *ESP32Servo.h* či *SevSeg.h*, pro kterou je následně i využita část dostupného kódu pro ovládání 7segmentového displeje [31][32][33].

Obsluha celého zařízení probíhá v několika krocích, které jsou znázorněny v následujícím blokovém schématu programu, který je dostupný na přiloženém CD:



Obrázek 20: Blokové schéma zpracování měřených dat

Po zapnutí dochází k inicializaci použitých funkcí, proměnných a GPIO. Následně jsou měřeny hodnoty vstupního napětí na 12bitových ADC pro osy x, y, z a též referenční hodnoty napětí U_{REF} s periodou 1 ms. Po akumulování 40 hodnot v intervalu 0-4095 dochází k jejich zprůměrování. Tímto je velmi výrazně eliminováno zarušení měřených dat, avšak na úkor akceptovatelného zpoždění v jejich vyhodnocení. Pro přepočítání na skutečnou hodnotu napětí je využit vzorec:

$$U_{REF} = ADC_{Uref} \cdot 0,000792 + 0,125 \quad (10)$$

Člen ADC_{Uref} představuje hodnotu napětí v intervalu 0-4095, kde číslo 0 zastupuje nulové napětí a 4095 teoretickou horní mez – 3,3 V. Koeficient 0,000792 reprezentuje lineární člen přepočtu na napětí a bylo nutné jej zjistit experimentálně (porovnání výsledku s referenčním voltmetrem) pro daný ADC vstup vývojového modulu, neboť AD převodníky ESP32 vykazují znatelný offset měření napětí, který je zde kompenzován konstantním členem 0,125 [34]. Pro osy x, y a z se konstantní člen liší:

$$U_{x,y,z} = ADC_{Ux,y,z} \cdot 0,000792 + 0,14 \quad (11)$$

Přepočítání napětí na výstupu akcelerometru (pro osy x, y a z) na odpovídající hodnotu zrychlení vychází z následujícího vzorce:

$$a_{x,y,z} = \frac{U_{x,y,z} - U_{ref} - U_{co}}{k_{scale}} \quad (12)$$

Tento vztah bere do úvahy, že by při nulovém měřeném zrychlení výstup měl být (v ideálním případě) roven polovině napájecího napětí akcelerometru – U_{REF} . Nicméně v reálném případě je nutné též odečíst hodnotu napětí U_{CO} , tzv. *center offset*, tedy posunutí tohoto „klidového“ výstupního napětí oproti U_{REF} . Pro normování na interval $\langle -1; 1 \rangle$, který odpovídá měřenému rozsahu zrychlení, je výsledek dělen koeficientem k_{scale} , jenž odpovídá polovině rozdílu maximální a minimální hodnoty výstupního napětí. Hodnoty napětí U_{CO} i koeficientu k_{scale} se liší pro každou z os x, y a z.

Přepočítání získaných hodnot zrychlení na úhly náklonu je poté provedeno dle vzorců 2 a 3, uvedených v kapitole 3.4.

Dle rozhodovacího diagramu výše pak dochází k aktualizaci údaje na displeji (náklonu servomotorů) či k indikaci informace o přílišném naklonění zařízení. Následně jsou data nulována a dochází k dalšímu měřicímu cyklu, který trvá zhruba 40 ms.

6 Zhodnocení realizovaného zařízení

Po nahrání kódu do paměti mikrokontroleru byla zjištěna bezchybná funkčnost zařízení včetně indikace náklonu na mechanickém modelu. Statický odběr zařízení činí 165 mA s připojenými servomotory a 145 mA bez servomotorů.

Při testování zařízení ve vodorovné poloze jsou hodnoty zobrazovaného náklonu nulové, popřípadě s jedностupňovou odchylkou. V mezních hodnotách (-90 stupňů a 90 stupňů) náklonu se odchylka údaje též pohybuje kolem uspokojivého 1 stupně. V intervalu těchto mezí byla pozorována přesnost měření na 2 stupně.

Je důležité podotknout, že při náklonu nad zhruba ± 70 stupňů v jedné ose vykazuje zobrazovaná hodnota náklonu v druhé ose již odchylku přes 2 stupně. Při naklonění nad 80 stupňů začíná nestabilita tohoto údaje s odchylkou kolem 5 stupňů a při 90stupňovém náklonu na bok již je změřený náklon ve druhé ose prakticky nesmyslný s téměř 90stupňovou odchylkou.

Jedním s podstatných a snadno sledovatelných cílů při vytváření kódu pro výpočty byla stabilita zobrazovaného údaje na displeji (a tedy i polohy servomotoru) při statickém naklonění zařízení. Mimo výše zmíněné extrémní hodnoty náklonu jsem s výsledky spokojen. Podstatným se pro tento cíl stalo za prvé průměrování měřených dat (40 posledních vzorků), ale velmi důležité bylo i aplikování změny hodnoty na displeji (polohy servomotorů) pouze v případě, že se nový údaj liší o alespoň 2 stupně. Nápomocné též bylo zapojení odrušovacích kondenzátorů u použitých servomotorů, což snížilo jejich interferenční vliv.

7 Závěr

7.1 Finanční rozbor realizace

Následující tabulka uvádí finanční rozbor sestaveného zařízení:

Součástky	DPS	Osazení	Krabička	Celkem
1300	100	600	100	2100

Tabulka 1: Finanční rozbor

V kalkulaci nejsou zahrnuty náklady na vývoj zařízení a výdaje na mechanický model, který byl laskavě dodán panem Miroslavem Horníkem. V případě sériové výroby zařízení by bylo očekávatelné snížení nákladů na součástky, které by byly nakoupeny levněji ve velkoobchodě a též zlevnění osazování, které v tomto případě bylo prováděno ručně bez využití pastovacího sítotisku, osazovacího automatu či pece.

7.2 Zhodnocení dosažených výsledků, možnosti zlepšení

V práci jsem uvedl oblasti měření náklonu a jeho význam, dále pak příklad komerčního náklonoměru. Následně je popsán princip funkce akcelerometru včetně jeho různých technologických provedení. Dále je přiblížena podstata výpočtu úhlu náklonu z měřeného zrychlení v několika osách, která je podstatná pro následující praktickou část práce.

V praktické části jsem provedl návrh a realizaci vlastního měřiče náklonu ve dvou osách, doplněného o displej a servomotory, které byly instalovány na obdrženy mechanický model a s ním tvoří praktickou ilustraci změřeného náklonu.

Realizované zařízení hodnotím jako úspěšné s dobrou přesností měření náklonu v rozsahu -70 až 70 stupňů, kdy maximální odchylka od skutečné hodnoty náklonu nepřesahuje 2 stupně. Jak bylo uvedeno v kapitole 7, nad tyto hodnoty již zařízení vykazuje jistou nestabilitu měření. Nicméně v porovnání s komerčním náklonoměrem Spectrotilt, uvedeným v kapitole 1.2, lze vidět podobnost v omezeném funkčním (relevantním) rozsahu. Ten činí pro Spectrotilt -60 až 60 stupňů a v případě vlastního zařízení zhruba -70 až 70 stupňů. Komerční výrobek vykazuje lepší vlastnosti s udanou přesností $0,1$ stupně při výchylce do 10 stupňů a 1% údaje při výchylce do 60 stupňů. Spotřeba konstruovaného zařízení činí 145 mA (bez zapojeného aktuátoru – servomotorů) oproti 26 mA pro Spectrotilt [4].

Lze uvést několik směrů, ve kterých by mohl být náklonoměr optimalizován. Použití digitálního akcelerometru by mohlo zlepšit odolnost jeho výstupních dat vůči zdrojům rušení (servomotory). Možností by též bylo fyzické oddělení senzorické a aktuátorové části zařízení (resp. jejich napájení), kdy by data byla přenášena bezdrátově pomocí Bluetooth či Wi-Fi. To by ovšem přinášelo úskalí, spočívající ve zpožděné reakci servomotorů a displeje na změnu

v náklonu senzoru. Také by bylo užitečné optimalizovat algoritmus pro zpracování měřených dat některou z pokročilých metod filtrace signálu (např. Kalmanův filtr).

Literatura

- [1] Why and Where to Use Tilt and Inclination Sensors? *Milesight* [online]. ©2024 [cit. 30. dubna 2024]. Dostupné z:
<https://www.milesight.com/company/blog/inclination-sensor-usage>
- [2] PUCCIO, Michael R. Tilt sensor provides accurate elevation angle measurement in Satellite Antenna Systems. *Spectron Sensors* [online]. ©2024 [cit. 8. ledna 2024]. Dostupné z:
<https://www.spectronsensors.com/articles/TiltSensor.pdf>
- [3] Spectrotilt™. *Spectron Sensors* [online]. ©2024 [cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
<https://spectronsensors.com/sds-133-3803>
- [4] Spectrotilt™. *Spectron Sensors* [online]. ©2024 [cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
<https://static1.squarespace.com/static/62f2cc4a7245952cf228a8e7/t/64f0febe13c2af41a161970e/1693515454696/SDS-133-3808.pdf>
- [5] VENKATANARAYANAN, A. and SPAIN, E. Sensor Materials, Technology and Applications. Online. *Comprehensive Materials Processing*, 2014. [cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/capacitive-accelerometer>
- [6] LIU, Yan; HU, Bohao; CAI, Yao; LIU, Wenjuan; TOVSTOPYAT, Alexander et al. A Novel Tri-Axial Piezoelectric MEMS Accelerometer with Folder Beams. Online. *Sensors*, 2021, s. 3 [cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
<https://doi.org/10.3390/s21020453>
- [7] WU, Tianqiong; YOU, Di; GAO, Huayun; LIAN, Pinghua; MA, Weigang et al. Research Status and Development Trend of Piezoelectric Accelerometer. Online. *Crystals*, 2023, s. 2 [cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
<https://doi.org/10.3390/cryst13091363>
- [8] ESU, Ozak. A typical MEMS piezoresistive accelerometer using cantilever design. *Research Gate* [online]. duben 2016 [cit. 8. ledna 2024]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/figure/A-typical-MEMS-piezoresistive-accelerometer-using-cantilever-design-adapted-from-19_fig28_338697474
- [9] MOHAMMED et al. Advantages and disadvantages of various transduction schemes. *Research Gate* [online]. listopad 2018 [cit. 8. ledna 2024]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/figure/Advantages-and-disadvantages-of-various-transduction-schemes_fig2_329007197

- [10] Tunneling accelerometer. *Micromachine Stanford* [online]. [cit. 8. ledna 2024].
Dostupné z:
http://micromachine.stanford.edu/projects/tunneling_sensors/Accel/AccelSummary.html
- [11] KRISHNAN et al. Working principle of a tunneling accelerometer [online].
červenec 2007 [cit. 8. ledna 2024]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/figure/Working-principle-of-a-tunneling-accelerometer-25_fig2_239542403
- [12] PYI: An Integrated Tunneling Accelerometer. *U.S. National Science Foundation* [online].
[cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
https://www.nsf.gov/awardsearch/showAward?AWD_ID=9157844&HistoricalAwards=false
- [13] FISHER, Christopher J. AN-1057 Using an Accelerometer for Inclination Sensing.
Analog Devices [online]. [cit. 5. ledna 2024]. Dostupné z:
<https://www.analog.com/en/app-notes/an-1057.html>
- [14] TP4056: Your Essential guide to the LiPo Battery Charger IC. *Best Microcontroller Projects* [online]. [cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
<https://www.best-microcontroller-projects.com/tp4056.html>
- [15] Ochranný obvod XHYP-1S-4012. *Hadex* [online]. ©2011-2014 [cit. 8. května 2024].
Dostupné z:
<https://www.hadex.cz/m402q-ochranny-obvod-xhyp-1s-4012-pro-1-li-ion-clanek-proud-do-12a/>
- [16] TP4056. *NanJing Top Power ASIC Corp.* [online]. s. 2 [cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
<https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>
- [17] DW01A. *Fortune Semiconductor Corporation.* [online]. červen 2010, s. 4
[cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
https://cxem.net/master/files/97_DW01A-DS-11_EN.pdf
- [18] CMD1402. *DIANZIAIHAOZHE.* [online]. [cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
<https://www.dianziahaozhe.com/transistor/?model=CMD1402>
- [19] MT3608 Mini Adjustable DC-DC Boost Module. *ProtoSupplies.* [online]. ©2023
[cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
<https://protosupplies.com/product/mt3608-mini-adjustable-dc-dc-boost-module/>
- [20] MT3608. *Aerosemi.* [online]. s. 6 [cit. 8. května 2024]. Dostupné z:
<https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-PWR-3608/resources/MT3608.pdf>

- [21] Efficiency & noise of an MT3608 boost module. *EmbedBlog*. [online]. 15. říjen 2020 [cit. 9. května 2024]. Dostupné z: <https://embedblog.eu/?p=712>
- [22] HUSÁK, Miroslav. Užití MEMS v průmyslu. Online. *Automa*. Roč. 2008, č. 12, s. 15 [cit. 9. května 2024]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/38277.pdf>
- [23] Akcelerometr ADXL335 3-osy Analogový vstup. *LaskaKit*. [online]. ©2024 [cit. 9. května 2024]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/akcelerometr-adxl335-3-osy-analogovy-vystup/?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMI2YPP-f_hQMVIrCDBx0keAz9EAQYAiABEgLOu_D_BwE
- [24] ADXL335. *Analog Devices*. [online]. Rev. B, s. 11 [cit. 9. května 2024]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>
- [25] GHANBARI, Milad; JAVAD YAZDANPANAHI, Mohammad. Delay Compensation of Tilt Sensors Based on MEMS Accelerometer Using Data Fusion Technique. Online. *IEEE Sensors Journal*. březen 2015, č. 3, abstrakt [cit. 9. května 2024]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2366874>
- [26] Plastové micro servo SG90 9g (180°). *Pájeničko.cz*. [online]. ©2024 [cit. 9. května 2024]. Dostupné z: <https://pajenicko.cz/plastove-micro-servo-sg90-9g-180>
- [27] L-153IDT. *Kingbright*. [online]. ver. 3, s. 3 [cit. 9. května 2024]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/1446115.pdf>
- [28] BC856...BC860. *Semtech Electronics Ltd*. [online]. 29. října 2009, s. 2 [cit. 9. května 2024]. Dostupné z: https://img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/6/912-021/dsh.912-021.2.pdf
- [29] IoT ESP-WROOM-32 2.4GHz Dual-Mode WiFi+Bluetooth rev.1. *LaskaKit*. [online]. ©2024 [cit. 10. května 2024]. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/iot-esp-32s-2-4ghz-dual-mode-wifi-bluetooth-rev-1--cp2102/?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIxbyUs7KyhQMVSJWDBx1ZKQJjEAQYAiABEgIFl_D_BwE

[30] Failed to connect to ESP32: Timed out waiting for packet header. *Random Nerd Tutorials*. [online]. ©2013-2024 [cit. 10. května 2024]. Dostupné z:

<https://randomnerdtutorials.com/solved-failed-to-connect-to-esp32-timed-out-waiting-for-packet-header/>

[31] HARRINGTON, Kevin; BENNET, John K. ESP32Servo (ver. 1.1.1). [Arduino library]. Online. [cit. 10. května 2024]. Dostupné z:

<https://www.arduino.cc/reference/en/libraries/esp32servo/>

[32] READING, Dean. SevSeg (ver. 3.7.0). ©2020. [Arduino library]. Online. [cit. 10. května 2024]. Dostupné z:

<https://github.com/DeanIsMe/SevSeg>

[33] DEANISME. SevSeg. *GitHub*. [online]. ©2020 [cit. 10. května 2024]. Dostupné z:

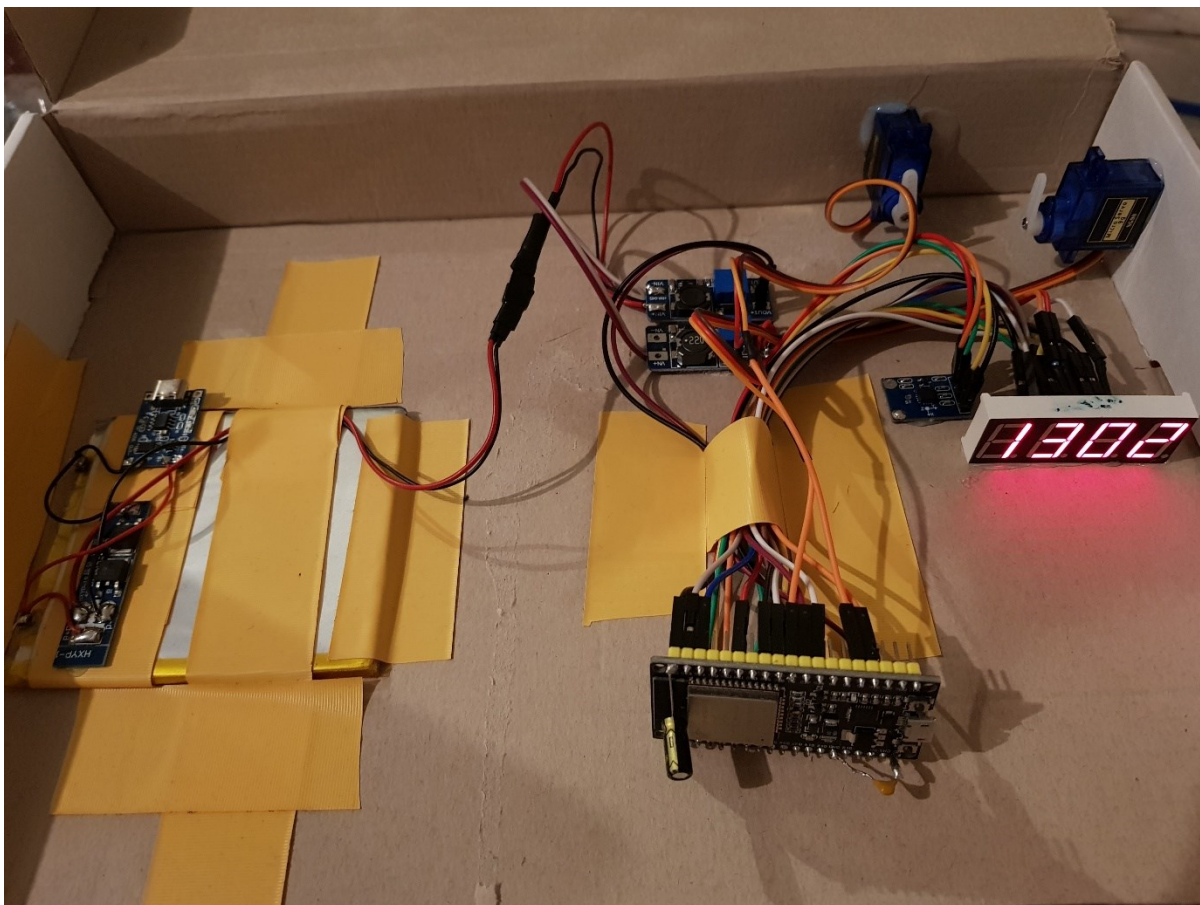
<https://github.com/DeanIsMe/SevSeg>

[34] ADMIN. ESP32 Analog To Digital Conversion Accuracy. *IoT Kits*. [online]. 2. června 2020 [cit. 10. května 2024]. Dostupné z:

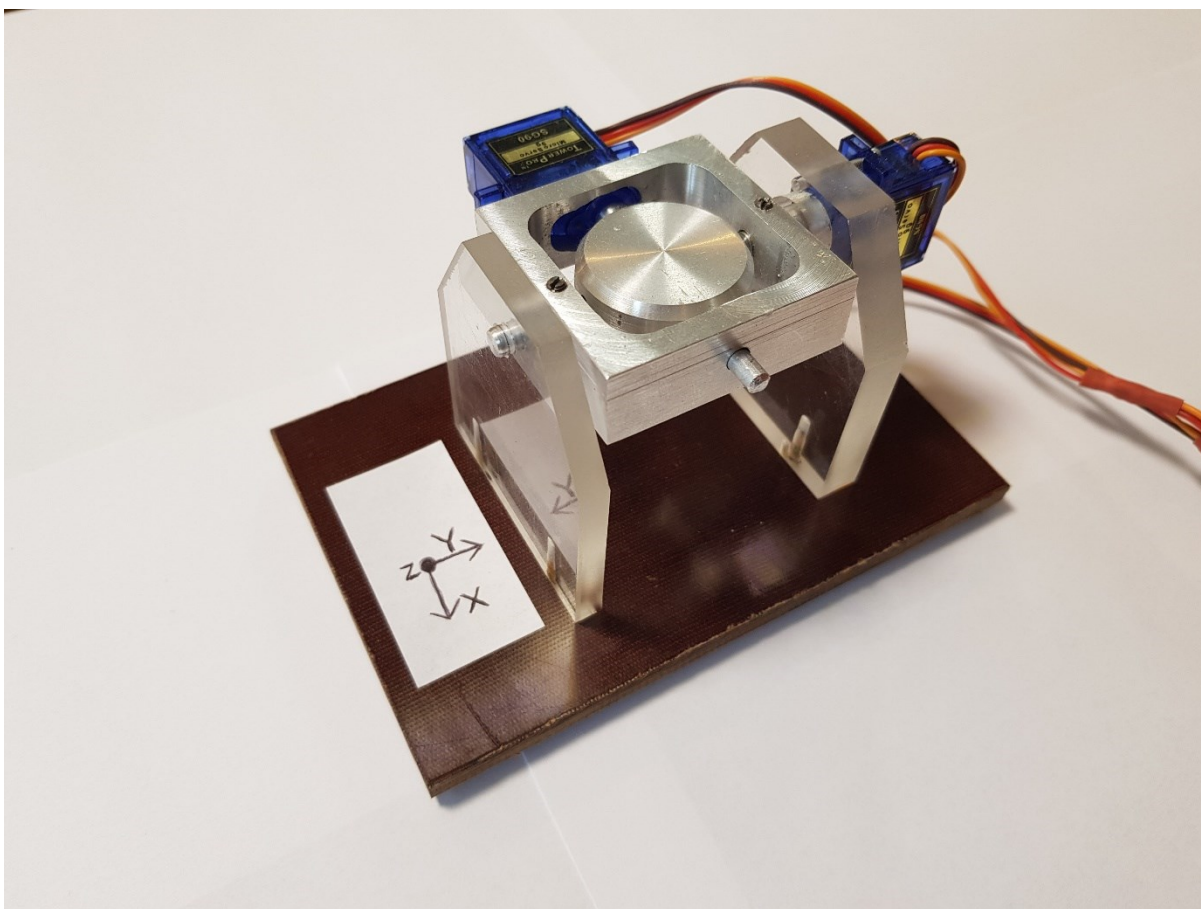
<https://w4krl.com/esp32-analog-to-digital-conversion-accuracy/>

Přílohy

Příloha 1 – provizorní model náklonoměru se servomotory



Příloha 3 – mechanický model se servomotory



Příloha 4 – DPS instalovaná v krabičce



Příloha 5 – zapnuté zařízení s náklonovým mechanismem

