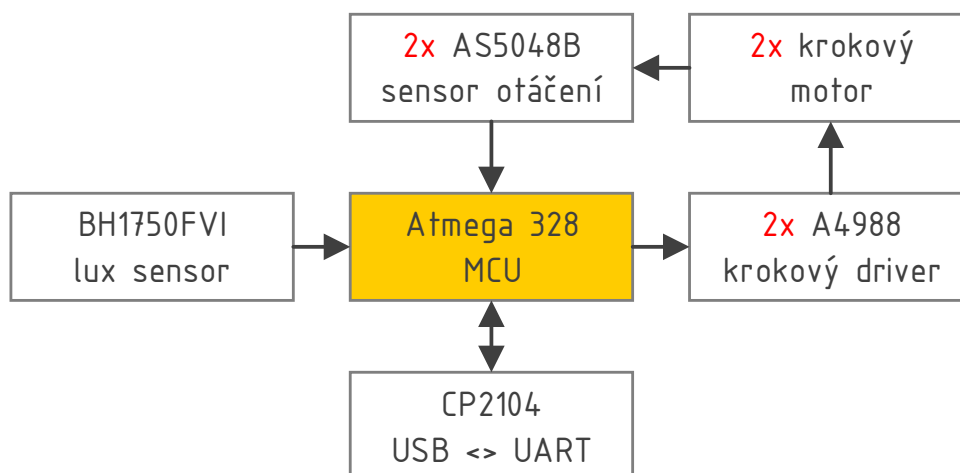


Model goniofotometru

Pro účely vývoje a testování uživatelského rozhraní i hardwarové řídicí desky byl v rámci související práce na projektech a diplomové práci navržen a sestaven model, který svými parametry kopíruje stávající konfiguraci existujícího přístroje a umožňuje rozšíření o nově požadovanou funkcionalitu. Smyslem sestavení modelu je zjednodušení vývoje software i hardware v domácích podmínkách a zamezení narušení funkčnosti goniofotometru v laboratoři, na kterém jsou prováděna komerční měření. Základní deska modelu by s úpravami měla být schopna připojení do současného systému goniofotometru a umožnit tak zaměnitelnost pro účely rozšíření. Konstrukce modelu je zhotovena z hliníkového profilu, který je opatřen černým matným nátěrem. Veškeré tištěné spoje byly zhotoveny za pomoci prototypové služby oshpark.com z USA. [1]

1.1 Požadavky modelu

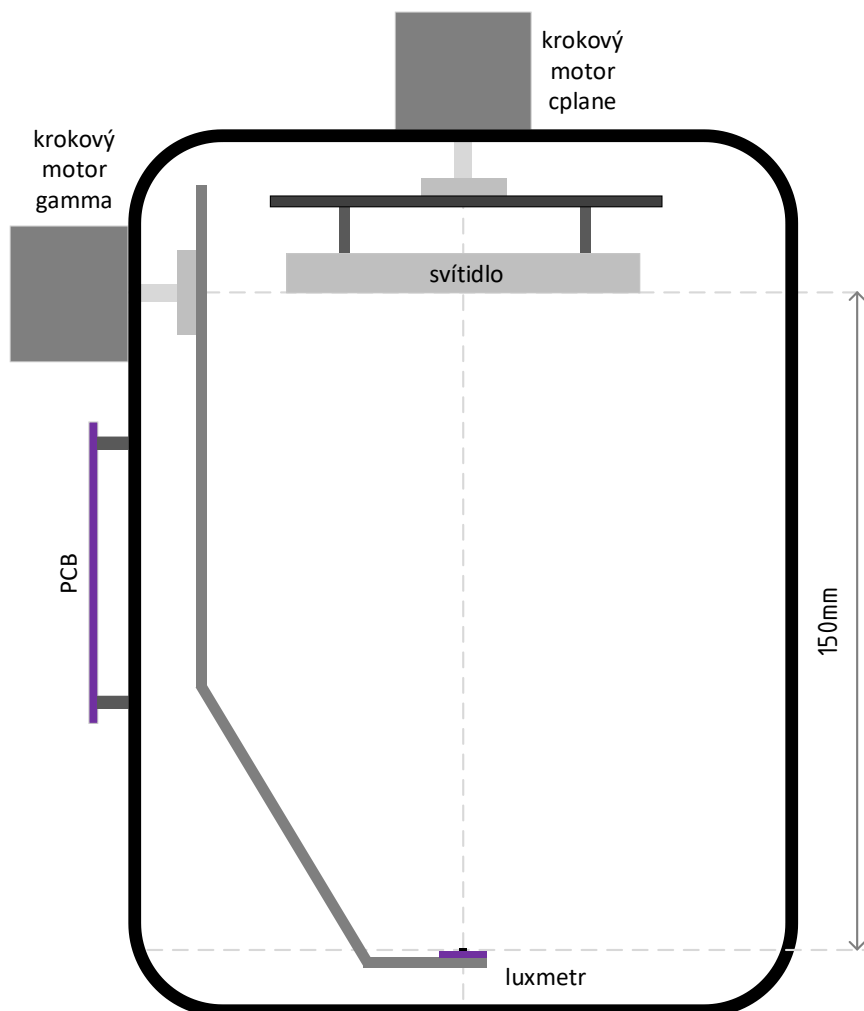
Základním požadavkem při návrhu modelu bylo umožnit pohybovat ramenem nejen do úhlů gamma ale také umožnit otáčení svítidla do C-rovin. Pro pohon ramene a otáčení svítidla byly vybrány malé krokové motory s motorovými ovladači, které využívají stejnou komunikaci jako existující řešení goniofotometru v laboratoři – ENABLE pro aktivaci cívek, STEP pro signál kroku, DIRECTION pro určení směru otáčení. Aby bylo možné relativní data osvětlenosti nějakým způsobem analyzovat, bylo rameno opatřeno i malým nekalibrovaným luxmetrem, který má dynamický rozsah 0 – 65535 luxů. Pro možnost načtení hodnot měření byl model rozšířen o LED pásek s difusorem, který umožňuje spínání jednotlivých diod po datové sběrnici. Sestavený model tak disponuje otáčením ramene, otáčením svítidla, luxmetrem i vestavěným svítidlem. Blokové schéma je zobrazeno Obrázku 1. [1]



Obrázek 1: Blokové schéma Hardware modelu, zdroj: autor

1.2 Mechanické provedení

Model viz Obrázek 2 je sestaven pomocí hliníkového profilu, který je ohnut do tvaru obdélníku. V hliníkovém profilu jsou umístěny krokové motory a je zde také připevněna základní deska s řídicí elektronikou. Svítidlo je zavěšeno na profilu s možností ladění náklonu a výšky svítidla pomocí nylonových šroubů. Na konci pohyblivého ramene je umístěn senzor luxmetru ve fotometrické vzdálenosti 150 mm od svítidla. Pro srovnání fotometrická vzdálenost luxmetru od svítidla u goniometru v laboratoři světla je 2000 mm. Rameno je pak schopno náklonu $\pm 130^\circ$ od klidové polohy 0° . Svítidlo je schopno otočení bez mechanického omezení (reálně omezeno přívodním vodičem), reálně je využíván pouze rozsah pohybu $0 - 180^\circ$ od nulové polohy. Absolutním pohybem 180° v obou rovinách je zajištěno pokrytí celého spodního poloprostoru. Hliníkové části jsou opatřeny černým matným nástřikem, který by měl zamezit ovlivňování měření nechtěnými odrazy. [1]



Obrázek 2: Model goniometru, zdroj: autor

1.3 Hardwarová konfigurace řízení

Za účelem realizace řídicí desky modelu byl vytvořen tištěný spoj, který nese kromě senzorů natočení, luxmetru a svítidla veškerou řídicí elektroniku pro chod přístroje. Návrh vychází ze základního schématu platformy Arduino. Základní deska je postavena na architektuře Atmel AVR, konkrétně na MCU Atmega 328p v pouzdře QFN s frekvencí 16 MHz. Komunikační rozhraní je realizováno pomocí micro USB portu a převodníku USB – UART, konkrétně programovatelného převodníku CP2104 od Silicon Labs, který nese v deskriptoru USB zařízení název „GonioModel V1 2018“. Přes takto realizované komunikační rozhraní je zároveň možné nahrávat programy mikropočítače a odpadá nutnost používání externího programátoru. To je umožněno díky prvotnímu zavedení bootloaderu Optiboot do MCU přes kontaktní rozhraní AVR-ISP, které je taktéž přítomné na PCB. [2]

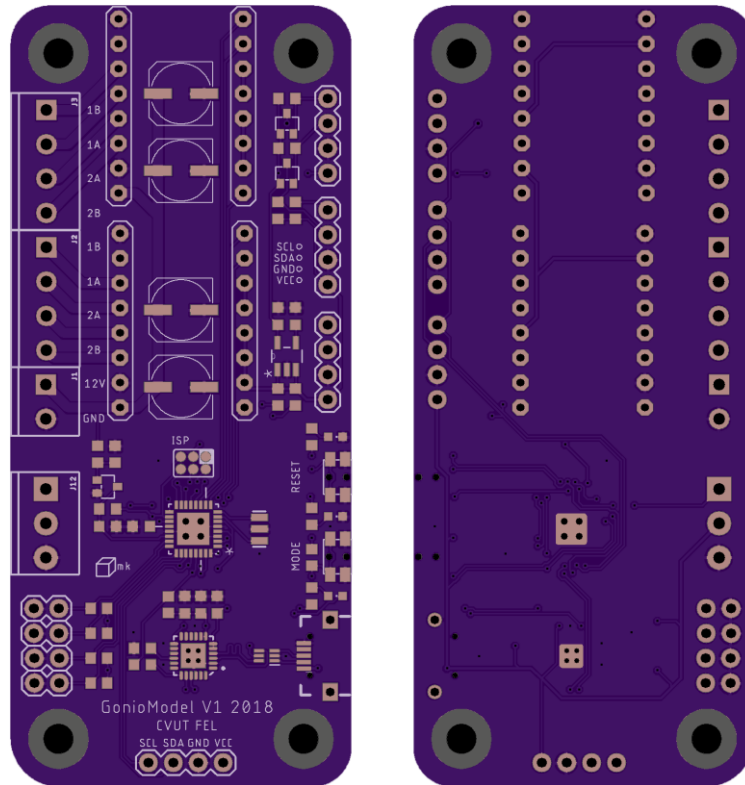
Základní deska nese dva motorové drivery v provedení tzv. StepStick, tj. druhého tištěného spoje připojeného přes dutinkové a kolíkové lišty. V blízkosti každého motorového driveru je umístěna svorkovnice pro připojení krokového motoru a dva paralelní kondenzátory s kapacitou $C = 100 \mu\text{F}$. Rozdělení kapacity do čtyř kondenzátorů má za cíl snížit ESR – ekvivalentní sériový odpor. Základní deska má taktéž možnost detekovat nepřítomnost napájení motoru pomocí N-mosfet tranzistoru.

Napájení krokových motorů je zajištěno z externího adaptéru s napětím 12 V. Napájení MCU a senzorů otočení je zajištěno přímo z USB 5 V. Pro senzor luxmetru je zde separátní regulátor napětí 3.3 V a logický převodník z napěťové úrovně sdílené sběrnice I2C z 5 V na 3.3 V. Na následující tabulce je zobrazeno zapojení IO portů, celkem je využito všech 21 dostupných GPIO portů.

Tabulka 1: Konfigurace I/O portů

Zařízení	Port připojení - GPIO
Převodník USB-UART CP2104/2102n	0-Rx, 1-Tx
Motorový driver pro rovinu Gamma	2-DIR, 3-STEP, 4-ENABLE
Motorový driver pro rovinu C	7-DIR, 6-STEP, 5-ENABLE
Signalizační dioda modrá – run state	8
Signalizační dioda červená – blocked state	9
Model svítidla – datový signál diod WS2812	10
ISP – port programátoru/ sběrnice SPI	11-MOSI, 12-MISO, 13-SCK
Koncové spínače (nevyužito)	A0, A1, A2, A3
Sběrnice I2C	A4-SDA, A5-SCL - Senzor otáčení 2x - Senzor luxmetru (log. 3.3V) - LCD displej po dobu vývoje
Tlačítko MODE	A6
Detekce napájení motoru	A7

Signalizační diody jsou připojeny přes výstupní piny právě z toho důvodu, aby bylo možné jejich vypnutí při měření. Dvojice tlačítek provádí reset mikropočítače a volbu uživatelského programu. Vývody s pullup rezistory pro koncové spínače zde prozatím nejsou využity. Tištěný spoj na Obrázek 3 má rozměry 35 x 80 mm je ručně osazen komponentami s povrchovou montáží SMD a několika komponentami s drátovými vývody (svorkovnice, hřebeny). Schéma zapojení je součástí příloh na konci práce. [1]



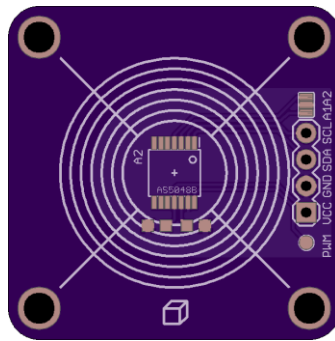
Obrázek 3: Základní deska modelu, vrchní a spodní strana, zdroj: autor

1.4 Krokové motory a řízení

Pro možnost otáčení ramenem i do C rovin byly vybrány dva malé krokové motory velikosti přírubu Nema 14 s procházející osou z obou stran motoru. Pro řízení motorů byly vybrány dva drivery TMC 2208 od společnosti Trinamic. Tento typ driveru umožňuje řízení požadovanými signály STEP, DIR, ENABLE a mimo jiné nabízí i tzv. mikrokrokování, tedy udržování rotoru mimo standardní šířku kroku 1.8° . Při využití možnosti 16 mikrokroků je nejmenší nastavitelný úhel $0,1125^\circ$. Díky moderní technologii řízení s využitím interní interpolace umožňují využít až 256 motorových mikrokroků se sinusovým průběhem a chod motoru je prakticky neslyšitelný. Rozšiřující funkce každého driveru je možné nastavovat po vestavěném rozhraní UART, model však během své funkce žádné parametry neupravuje.

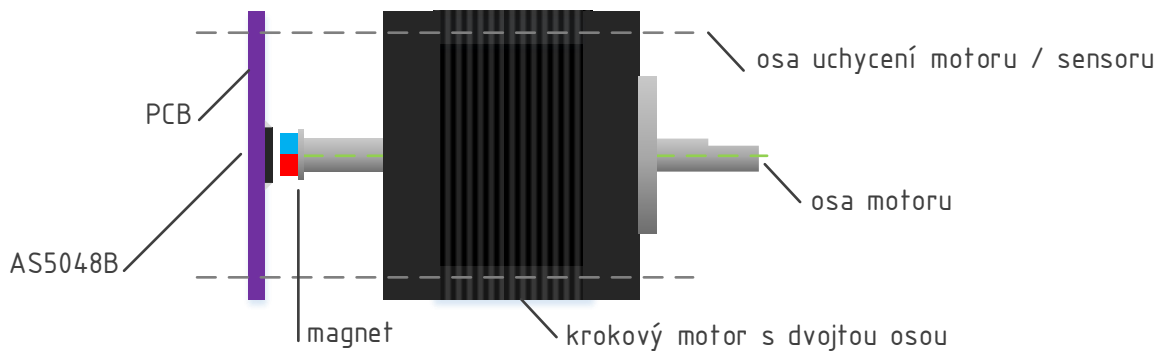
Pohyb obou motorů je dynamicky zrychlován a zpomalován na základě tzv. lineárního zrychlení. Zpětná vazba senzoru otočení koriguje případnou odchylku od požadovaného úhlu.

Vzhledem k velmi vysoké ceně inkrementálního senzoru byl každý krokový motor vybaven magnetickým senzorem polohy. Vzhledem k předešlým zkušenostem byl vybrán typ AMS AS5048B s rozhraním I2C. Jedná se o sensor na principu pole halových sond, které umožňují detekovat úhel s přesností na $0,1^\circ$ pomocí magnetu s polem kolmo na osu. Pro účely modelu byl vytvořen malý tištěný spoj o rozměrech 32×32 mm, který má identické rozměry jako šasi krokového motoru a umožňuje napájení integrovaného obvodu, přenos datové komunikace a jeho umístění ke krokovému motoru. [5]



Obrázek 4: Deska senzoru otočení, zdroj: autor

Krokové motory disponují osou procházející skrz motor a vycházející na čelní i zadní straně. Do blízkosti osy ze zadní strany je tištěný spoj připevněn ve vzdálenosti 19,75 mm ve směru od motoru. Na konci osy je připevněn magnet, který je přímo umístěn nad integrovaným obvodem senzoru se vzduchovou mezerou 0,75 mm.

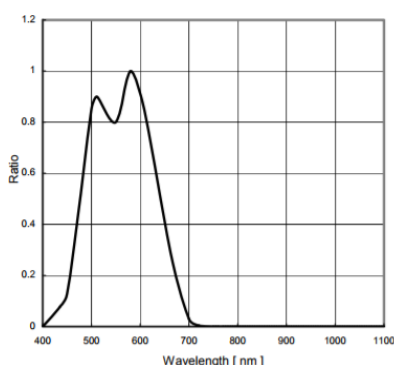


Obrázek 5: Bokorys pozice senzoru vůči krokovému motoru, zdroj: autor

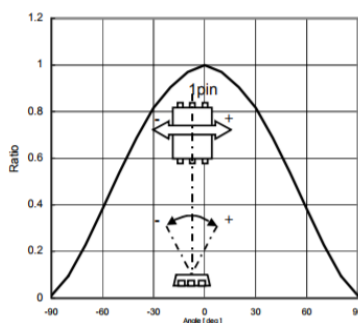
1.5 Sensor osvětlenosti - luxmetr

Aby bylo možné mimo ovládání pohybu načítat i data osvětlenosti E [lx], byl na rameno modelu umístěn sensor výrobce Rohm Semiconductor BH1750FVI, který komunikuje na sběrnici I2C a nachází se ve fotometrické vzdálenosti 150mm od svítidla. Přestože se nejedná o nejpřesnější sensor na trhu, pro účely modelu a testování je deklarovaná odchylka měření 20% přípustná. Datasheet deklaruje mimo jiné spektrální odezvu, korekční činitele v závislosti na typu světelného zdroje ale i směrové charakteristiky poměrné citlivosti viz Obrázek 10. [4]

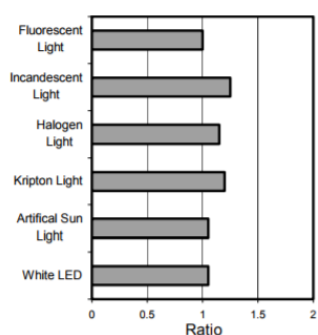
spektrální odezva



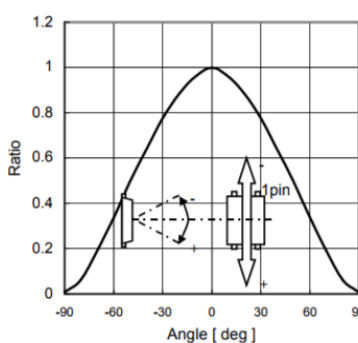
směrová citlivost



závislost na typu světelného zdroje

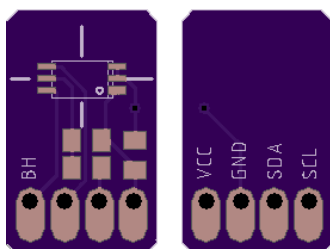


směrová citlivost ve směru pohybu ramene



Obrázek 6: Specifikace senzoru BH1750FVI, zdroj: Rohm Semiconductor [4]

Analogicky jako v případě senzoru úhlu a základní desky modelu byla vytvořeno i PCB senzoru Luxmetru viz Obrázek 7. Rozměry desky jsou záměrně nízké - 6,5 x 10,5 mm a s poloviční tloušťkou (0,8mm) nosného substrátu PCB FR4 oproti ostatním tištěným spojům modelu. Požadavek na velmi nízkou hmotnost je důsledkem umístění senzoru na samém konci pohyblivého ramene, které by mělo být v optimálním případě přesně kineticky vyváženo podle osy otáčení.



Obrázek 7: Tištěný spoj senzoru luxmetru – BH1750FVI, zdroj: autor

Deska senzoru nese jen nejnútnejší komponenty, blokovací kondenzátor a RC člunek, který řídí reset senzoru. Z důvodu úspory hmotnosti a prostoru jsou pasivní komponenty v provedení pouzdra 0402 (1 x 0,6 mm). Schéma zapojení je jako v předchozím případě součástí příloh práce. Pro představu rozměry osazeného SMD senzoru jsou 5 x 3 mm. [1]

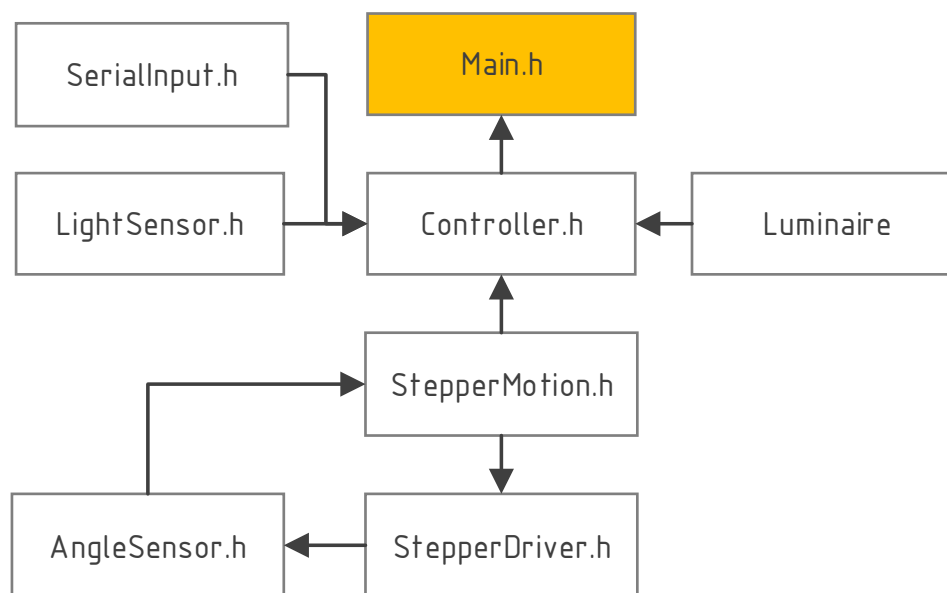
1.6 Modelové svítidlo

Svítidlo umožňující pohyb do C-rovin je realizováno pomocí LED pásku na tištěném spoji, který je umístěn do hliníkového profilu s difusorem. LED modul má 8 adresovatelných diod WS2812B, které jsou připojeny na napájení a datovou sběrnici. Je tak možné ovládat jednotlivě kteroukoliv diodu včetně nastavení její intenzity.

Konstrukce modelu umožňuje záměnu měřeného svítidla za jinou LED diodu. Ta je posléze napájena a spínána manuálně. Musí být ověřena podmínka délky přímkového zdroje (např. COB LED), jehož délka musí být maximálně 30 mm. Předpokladem je, že fotometrická vzdálenost (150 mm) je alespoň 5x vyšší než délka svítidla. [1]

1.7 Firmware modelu

Firmware mikropočítače v jazyce C++ je napsán objektivě na základech platformy Arduino. Instance třídy Controller viz Obrázek 8 řeší celý běh programu, vytváří instance dalších tříd jako je SerialInput (sériová komunikace), LightSensor (načítání hodnot z luxmetru), Luminaire (ovládání měřeného svítidla) a dvě instance třídy StepperMotion. Ty se starají o veškerou funkci pohybu, tj. ovládání krokových motorů a jejich zpětnou vazbu přes senzory polohy.



Obrázek 8: Diagram tříd, zdroj: autor

Řízení krokových motorů je v tomto programu řešeno synchronně, proto po dobu pohybu motoru mikropočítač neodpovídá na jiné podněty. Mikropočítač počítačovou aplikaci informuje o blokaci odesláním příkazu „block“ před pohybem motoru a příkaz „unblock“ po jeho dokončení. Aplikace je tak zabezpečena, že může zasílat další příkazy podle scénáře. Po dobu vývoje bylo testováno několik variant komunikace, například postupné zpracování čekajících příkazů ze zásobníku sériové komunikace, nicméně varianta s blokací se ukázala jako nejspolehlivější. [1]

1.8 Komunikační protokol

Pro komunikaci po sériové lince byl stanoven protokol, který za pomoci příkazů dovoluje řídicí aplikaci zasílat požadavky a přijímat reakce modelu. Firmware modelu zpracovává příkazy pomocí hardwarového sériového portu se zásobníkem. Na základě informace, že se v bufferu nachází příkaz je následně provedeno čtení, které zásobník vyprázdní. Parser pak na základě shody textu a parametru příkazu spustí specifickou metodu dané třídy.

Základním příkazem pro pohyblivé roviny je příkaz „C home“ respektive „G home“, který najde podle zpětné vazby z absolutního magnetického senzoru polohy nulovou pozici. Rovinami je možné pohybovat za pomoci příkazů „C x“ pro C roviny, respektive „G x“ pro gamma úhel, kdy x znamená počet stupňů, o který se rovina posune. Absolutní poloha může být zadána na základě připsání příznaku , # ' (bez mezer) před úhel otočení viz tabulka 3, příkaz „C #X“.

Na základě dotazu „sensor“ je odpovědí hodnota osvětlenosti v luxech bez udaných jednotek. Zpracování hodnot je prováděno až v počítačové aplikaci.

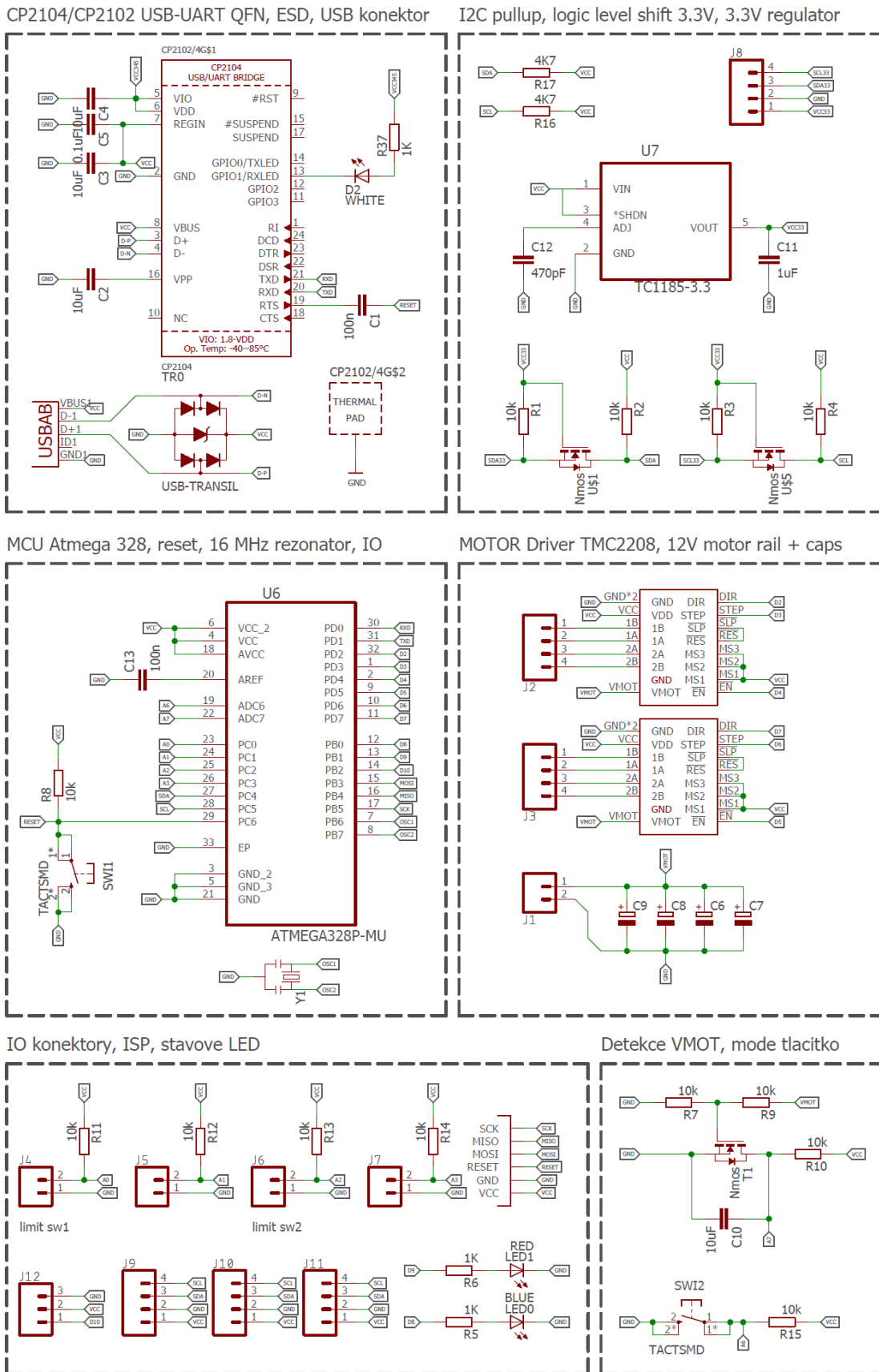
Tabulka 2: Komunikační protokol, zdroj: [1]

Příkaz	Odpověď	Popis
C-roviny – otáčení svítidla		
C home	C home	C rovina se otočí do výchozí polohy 0°
C X	C X	C rovina se posune o X° oproti předchozímu úhlu
	C #X	C rovina se posune do absolutní polohy X°
	Out of range	Zadaný úhel je mimo limit, pohyb není proveden
C E	Enabled	Zapnutí napájení vinutí krokového motoru
C D	Disabled	Zapnutí napájení vinutí krokového motoru
C Debug1	Debug1	Zapnutí režimu ladění – podrobnosti o pohybu
C Debug0	Debug0	Vypnutí režimu ladění
Gamma úhly – otáčení ramene		
G home	G home	Rameno se otočí do výchozí polohy 0°
G X	G X	Rameno se posune o X° oproti předchozímu úhlu
	G #X	Rameno se posune do absolutní polohy X°
	Out of range	Zadaný úhel je mimo limit, pohyb není proveden
	Limit	Došlo k sepnutí koncového spínače, rameno se zastaví
G E	Enabled	Zapnutí napájení vinutí krokového motoru
G D	Disabled	Zapnutí napájení vinutí krokového motoru
G Debug1	Debug1	Zapnutí režimu ladění – podrobnosti o pohybu
G Debug0	Debug0	Vypnutí režimu ladění
Sensor		
sensor	sensor X	Načte hodnotu osvětlenosti, X je hodnota v lx
Svítidlo		
rgb X	-	Zapne diody svítidla na hodnotu X = R=G=B (0-255)
rgb R G B	-	Zapne diody svítidla na hodnoty R G B (0-255, 0-255, 0-255)

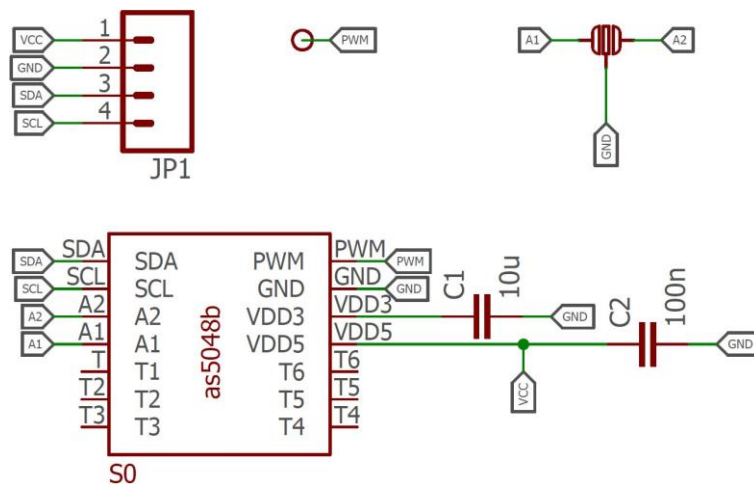
Seznam bibliografických referencí

- [1] KOZLOK, Michal. *Návrh modernizovaného uživatelského rozhraní goniometru*. Praha, 2018. Projekt. ČVUT FEL. Vedoucí práce Ing. Marek Bálský Ph.D.
- [2] Atmel AVR Microcontroller Primer : *Programming and Interfacing*; Steven F Barrett, Daniel Pack, Mitchell Thornton; 194 pages; 2007; ISBN 978-1-59829-541-2.
- [3] Silicon Labs [online]. *CP2102n*. 16.8.2016 [24. 1. 2018].
<https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/cp2102n-datasheet.pdf>
- [4] ROHM Semiconductor [online]. *BH1750FVI*. 1.1.2014 [24. 1. 2018].
<http://www.mouser.com/ds/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>
- [5] AMS [online]. *AS5048B High Resolution Position Sensor*. 15.11.2016 [24. 1. 2018].
<http://ams.com/eng/content/download/438523/1341157/143016>

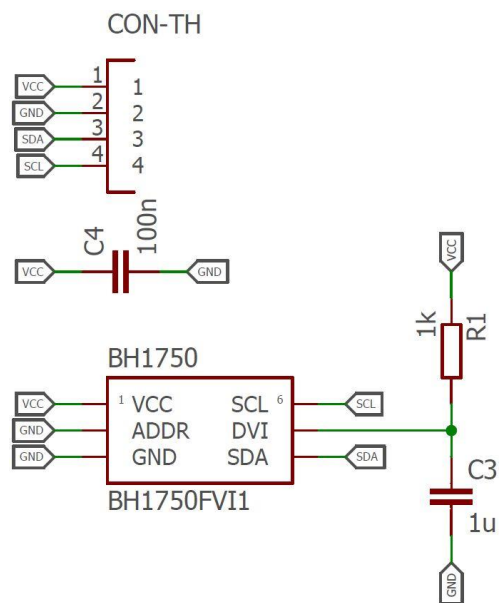
Příloha 1: Schéma tištěného spoje základní desky modelu, zdroj: autor



Příloha 2: Schéma tištěného spoje senzoru otáčení, zdroj: autor



Příloha 3: Schéma tištěného spoje luxmetru, zdroj: autor



Příloha 4: Fotografie modelu (str. 12,13,14), zdroj: autor



