

**Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Brno,
Sokolská,
příspěvková organizace**

Maturitní práce

Z technické fyziky

Zprovoznění robota Oscar 95

Studijní obor: Technické lyceum 78 – 42 - M/01

Třída: L4A

Školní rok: 2020/2021

Jméno: Ondřej

Příjmení: Kratochvíl

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil jsem literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

V Brně dne:.....

.....

Ondřej Kratochvíl

Zadání

Cílem práce je připravit novou elektroniku pro řízení a programování školního robota Oskar95.

Student zanalyzuje stávající řešení, vybere vhodné součástky a řídící mikrokontrolér, navrhne desku plošného spoje a po jejím vyrobení ji osadí a zprovozní. Součástí práce bude také finanční posouzení návrhu. Při návrhu bude zohledněna dostupnost součástek, možnosti programování a řízení robota a možnosti dalšího použití celé desky i v jiných podobných zařízeních.

Obsah

Zadání	3
1. Úvod.....	5
2. Popis robota Oscar 95	7
2.1. Popis a historie	7
2.2. Řízení	8
2.3. Jak robot funguje	8
3. Krokové motory	10
3.1. Popis	10
3.2. Rozložení motorů	11
3.3. Konstrukce krokového motoru	11
3.4. Řízení krokových motorů	12
4. Postup práce	13
4.1. Rozebírání	13
4.2. Analýza dílů	13
4.3. Historie návrhů desky	14
4.3.1. Základní deska – RBC	14
4.3.2. ESP-32	15
4.3.3. Požadavky na moji desku	16
4.3.4. Deska verze 0.1	16
4.3.5. TMC 2208 Driver.....	19
5. Deska 1.0	20
5.1. TMC 2209.....	20
5.2. Deska 1.0	21
6. Řízení robota	28
7. Pohyb robota.....	30
8. Finanční stránka projektu.....	32
9. Závěr.....	34
10. Seznam obrázků:.....	36
11. Použitá literatura.....	37

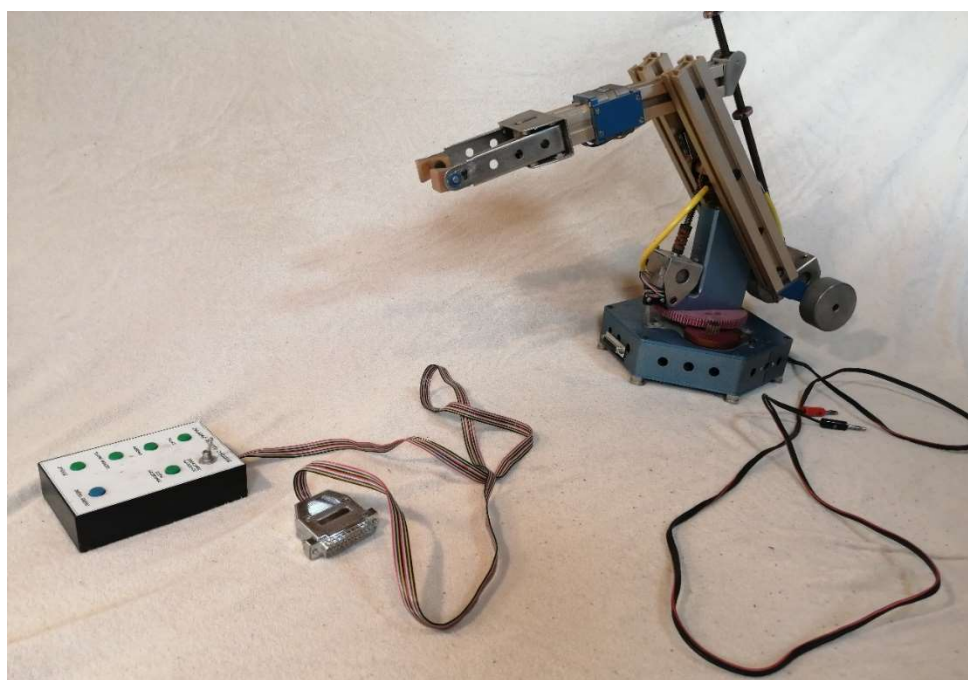
1. Úvod

Každý, kdo někdy chodil do školy, měl velice rád, když součástí výuky bylo i něco praktického. Něco, co si student lépe dokázal zapamatovat tím, že získal zkušenosti. Jedna z věcí, která se na této škole používala, byla i robotická ruka, která sloužila k výuce automatizace v počtu 3 kusů [1]. Tyto 3 robotické ruky však dlouhou dobu stály na polici a prášilo se na ně. Je to ohromná škoda, protože (ačkoliv automatizaci nestudují) ruka jako taková se může hodit i do hodin programování, které jsou v rámci výpočetní techniky u nás na škole od 3. ročníku až do maturit anebo do elektroniky.

Robot jako takový už se na různých laboratorních a jiná cvičení nepoužíval velmi dlouho, což dokládá i laboratorní práce z 5. března 2009 od Viléma Robotky (jak příznačné jméno) ze třídy V3 [2].

Znovuzařazení robotické ruky do výuky bránilo několik problémů. Ať už od konektorů (viz kapitola 2.2 3. odstavec) po hodně starou řídicí desku. Zastaralá řídicí deska obsahuje pouze konektor pro paralelní port a k USB ji není možné připojit. Další z problémů byl software, který už dnes není k dispozici. Robota tak nebyl nikdo schopen řídit anebo programovat.

Mým úkolem je tedy robota rozebrat, zjistit, jak se ovládá a řídí a rozhodnout, které části řídicí elektroniky je nezbytné nahradit novějšími.



Obrázek 1: Robotická ruka Oscar 95 a původní ovládání

Dále navrhnout a vyrobit novou elektroniku a v ideálním případě robota zprovoznit.

Úkolů mám více než dost, takže se na práci hodně těším, protože když se mi úspěšně zdaří, tak mohu pomoci spolužákům i žákům, kteří přijdou studovat po mě. Je to tím pro mě velká motivace a věřím, že se mi povede něčeho dosáhnout.



Obrázek 2: Můj pokoj nachystaný pro focení rozebírání robota

2. Popis robota Oscar 95

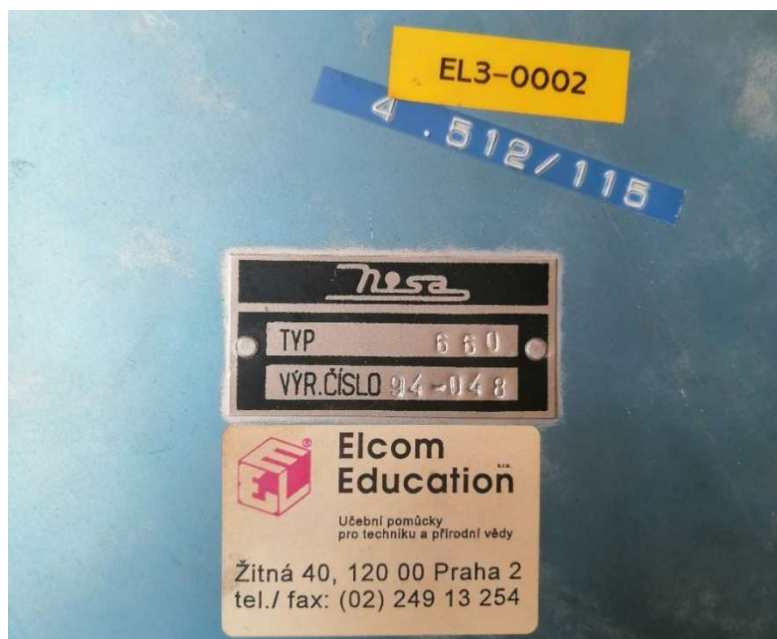
2.1. Popis a historie

Oscar 95 je školní robot určený pro základní výuku robotiky na všechny typy škol. Pohybuje se nezávisle ve třech osách, což jsou: svislá osa, pomocné a hlavní rameno. Dále ještě disponuje motorem na svírání a otvírání čelistí, které dle informačního prospektu dokážou zvednout až 0,1 kilogramu, což je 100 gramů. Stroj má tedy 4 stupně volnosti. O každý se stará jeden motor.

K jeho historii se bohužel příliš dohledat nedá. Podle názvu se dá usoudit, že tento model byl vyráběn kolem roku 1995.

Další indicie k jeho historii je následně logo firmy Elcom Education, které se nacházela na něčem, co by se dalo přirovnat k manuálu robota a na robotově spodní části. Firma jako taková však určitě neexistuje. Jediný zdroj, který mi zbyl, je kniha Optická vlákna a telekomunikace, která byla vydána v roce 1993 a nachází se v knihovně Vysoké školy Báňské v Ostravě, případně v antikvariátu. Nakonec jsem přece jen do jisté míry úspěšný byl a firmu našel.

Problém byl ten, že už opravdu nějakou dobu neexistuje. Firma v průběhu doby měnila svá jména a sídla. Nejprve pod názvem ELCOM EDUCATION s.r.o. se sídlem na ulici Žitná v Praze 2 (což je mimochodem bytovka), kde byla zapsána 28. prosince a vydržela pod tímto jménem až do 8. dubna 2010. Během té doby měla předmět podnikání nákup a prodej zboží, poskytování softwaru a následně reklamní a vydavatelská činnost. [22] Od 8. dubna 2010 se změnilo jak sídlo firmy, tak i její jméno. Co se během doby neměnilo, byla jména jednatelů firmy. Podle rejstříku firem se jednalo o inženýra Milana Štolbu, narozeného 3. dubna roku 1955 a pocházejícího z Prahy. Druhý jednatel firmy je pravděpodobně jeho manželka nebo sestra Ludmila Štolbová. 8. dubna 2010 se firma přejmenovala na iTep Consulting, s.r.o. a jednatelé zůstali stejní. Firma změnila sídlo do obce Dolní Břežany, což je malá vesnice na jihu od Prahy. Od té doby měla firma předmět podnikání pod názvem „výroba, obchod a služby neuvedené v přílohách 1. až 3. živnostenského zákona“. Ovšem od 9. března 2016 vstoupila firma do likvidace, které byla dokončena 13. února 2019 úplným vymazáním firmy z rejstříku.



Obrázek 3: Informační deska na spodní části robota

2.2. Řízení

Z pohledu elektroniky obsahuje robot čtyři elektrické krokové motory, které u sebe ještě obsahují optické senzory.

Robot je navržen tak, aby jej bylo možno ovládat dvěma způsoby, a to řízením pomocí přiloženého ovladače, nebo naprogramováním v počítači. Pro programování robota je potřeba konektor Canon 25, který já v momentě, kdy jsem si robota poprvé prohlédl, jsem viděl prvně. V dnešní době se už nepoužívá.

Canon 25 je tak zvaný D-sub (D-subminiature) konektor, který se využíval pro přenos elektrických signálů mezi zařízeními. V současnosti tento konektor bývá nahrazován ethernetem nebo konektorem USB, čímž ho mám také v plánu nahradit. (Pravděpodobně použiji microUSB, protože se jedná o v současnosti nejpoužívanější konektor a je používán stále více než USB-C; případně tam budou konektory oba paralelně vedle sebe.)

2.3. Jak robot funguje

O řízení krokových motorů se v robotovi starají speciální obvody s označením L297 a L298N. Oba obvody jsou zapojeny tak, že ovládají jeden motor. L297 slouží jako generátor taktů pro jednotlivá vinutí. L298N je pak výkonový můstkový budič.

O motor se dále starají snímače pohybu, které slouží k nastavení počáteční polohy motoru. Na desce jsou celkem 4, aby měl každý motor svůj obvod.

Motory mají vlastní stabilizátory (více informací o nich však v letáku, ani na internetu, nebylo).

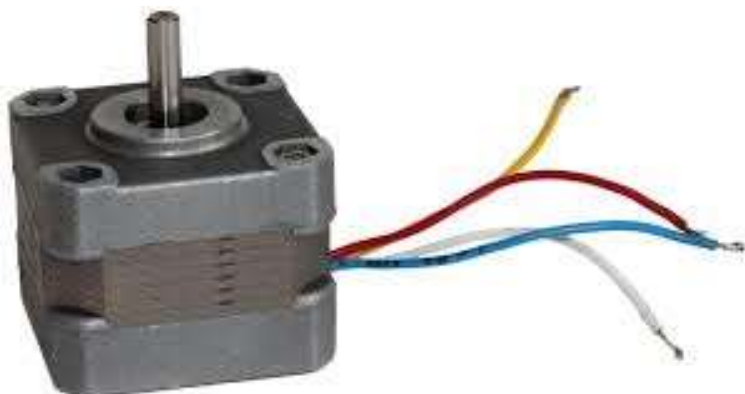


Obrázek 4: Krokový motor se štítkem

3. Krokové motory

3.1. Popis

O chod robota se, jak již bylo zmíněno, starají 4 krokové elektromotory. Jedná se o motory s několika cívkami. Pro otočení rotoru je potřeba přivádět proud do cívek v určitém pořadí.



Obrázek 5: Vytáhnutý motor HY 100 1713 020 A4 [33]

Velmi dobrá vlastnost krokových motorů je fakt, že nepotřebují zpětnou vazbu pro zjištění polohy (ve většině případů). Vše, co motoru stačí, je počítání kroků (= potřebují vědět, kolik přišlo v daný čas impulzů). Pokud víme, kolik kroků je potřeba pro otočení o jeden stupeň, tak pak jsme schopni ovládat robota velice přesně. Když je dostatečný počet kroků na jeden stupeň, tak i o části stupňů. Tuto vlastnost (přesnost otáčení na desetiny stupně) však nebudeme potřebovat, protože robot při své struktuře stejně nedokáže a ani nepotřebuje být takto přesný.

S výhodou počtu kroků však souvisí i jedna velká nevýhoda – přetížení motoru. Jakmile přichází vyšší frekvence, než s jakou je motor při přetížení, ke kterému může dojít, když je zatěžovací moment větší než přídržný, tak se může stát to, že dojde k takzvané ztrátě kroků. Stane se tak to, že řídicí jednotka započítá krok, ale rotor se nepohne. Systém, tak ztratí informace o přesné poloze motorů a může dojít k nárazu. Toto se v dnešní době ve firmách řeší najetím na referenční body (homing).

K další nevýhodě (spíše záporné vlastnosti) patří odebírání proudu. Motor odebírá proud, i když nejede, a z tohoto důvodu se více ohřívá. Na druhou stranu je tak perfektně brzděn a nepotřebuje jinou, vnější, brzdu.

Typ krokových elektromotorů na robotovi je HY 100 1713 020 A4, což je napsané na štítku na každém motoru.

3.2. Rozložení motorů

Jeden motor se stará o rotaci celého stroje, druhý motor o pohybování „nahoru a dolů“, třetí motor už jen mírně rotuje samotnou rukou a čtvrtý motor se stará o svírání klepet. Dohromady díky tomu se robot dostane od středu konstrukce až do půl metrové vzdálenosti.

3.3. Konstrukce krokového motoru

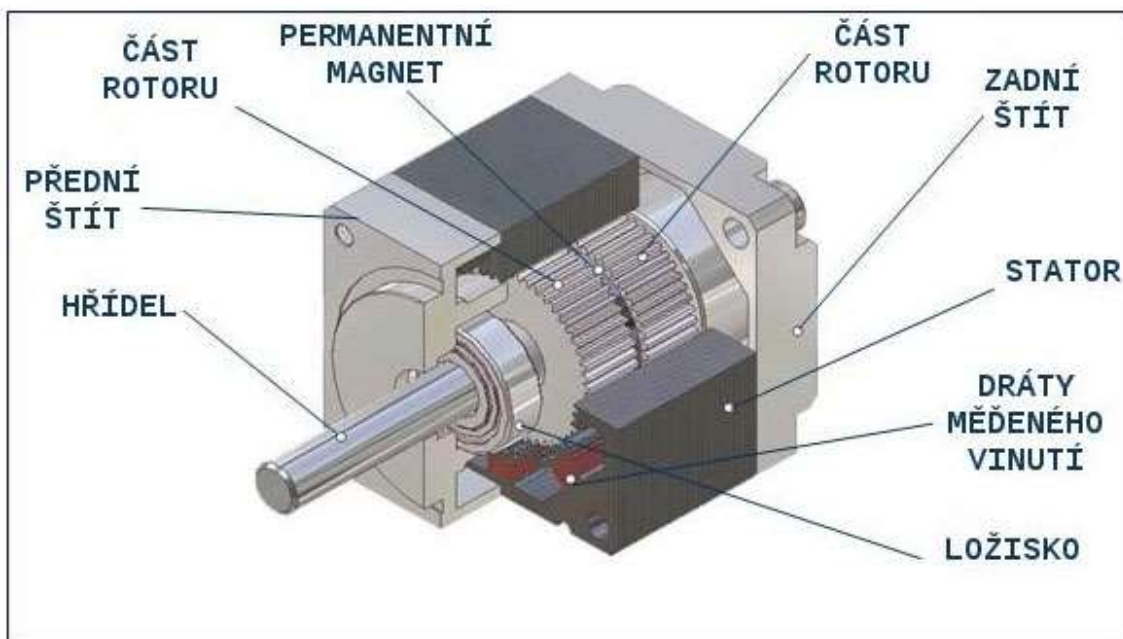
Krokové motory jsou synchronní stroje. Skládají se ze dvou částí. Feromagnetický rotor a cívkový stator. Kotva rotoru je z permanentního magnetu.

Na obvodu statoru jsou umístěna vinutí. V jednotlivých vinutích vzniká pomocí elektrického proudu elektromagnetická síla, která přitahuje jednotlivé póly rotoru. Postupným napájením těchto vinutí dochází k otáčení rotoru. Rychlost otáčení je dána frekvencí napájení jednotlivých vinutí.

Svým principem fungování krokové motory neprovádějí spojitý rotační pohyb.

Krokové motory není dobré využívat ani v místech, kde je potřeba vysoká rychlost. Pro tyto účely používají motory jiných konstrukcí.

Pokud je napájeno některé z vinutí, tak je motor zafixován v dané poloze. Při vypnutém napájení vinutí lze rotorem volně otáčet.



Obrázek 6: Rozložený popis krokového motoru [17]

3.4. Řízení krokových motorů

Jak již bylo zmíněno, tak krokové motory jsou z permanentního rotoru a elektromagnetického statoru. Motor je pak buzen tak, aby vytvářel magnetické pole vždy posunuté, než jsou póly rotoru a tím docházelo k otočení. Pokud je elektrický proud přiveden na dvě sousední cívky zároveň, daný pól rotoru se bude nacházet uprostřed mezi cívkami. Tím vzniká půlkrok rotoru. Následně jedna statorová cívka přestane magneticky přitahovat rotor a ten dokoná krok.

Díky mechanickému kontaktu, který je omezen pouze na ložiska, se motor může pochlubit velkou mechanickou odolností a téměř bezúdržbovým provozem.

Krokové motory jsou jedno nebo více fázové. Při jednofázovém řízení je napětí přivedeno jen na jednu cívku. Při dvoufázovém řízení, jak již název napovídá, budíme cívky dvě. Oba způsoby mají své výhody a nevýhody a oběma způsoby dosáhneme stejného počtu kroků. Pokud budíme jen jednou fází, tak můžeme přivádět menší napětí, ale motor je slabší. Při dvoufázovém buzení musíme přivést napětí vyšší. Tím však vzniká i vyšší síla motoru, která vytváří vyšší krouticí moment, což je výhodnější pro větší zátěž.

Způsoby se však nemusí striktně vybírat. Kombinací jednofázového a dvoufázového řízení lze dosáhnout tak zvaného mikrokrokování. Mezi mikrokrokování patří již zmíněný půlkrok. Existují navíc obvody, které dokážou udělat více než jeden krok mezi jednotlivými kroky. Tyto obvody udržují polohu rotoru pomocí poměrů proudů mezi jednotlivými fázemi. Dalo by se říct, že se v jistém poměru vzájemně přetahují o lano, na jehož pomyslném středu se nachází rotor. Tento pomyslný střed se pak pohybuje podle poměru sil.

Cívka 1	1	1	0	0	0	0	0	1
Cívka 2	0	1	1	1	0	0	0	0
Cívka 3	0	0	0	1	1	1	0	0
Cívka 4	0	0	0	0	0	1	1	1

Obrázek 7: Řízení krokového motoru. [25]

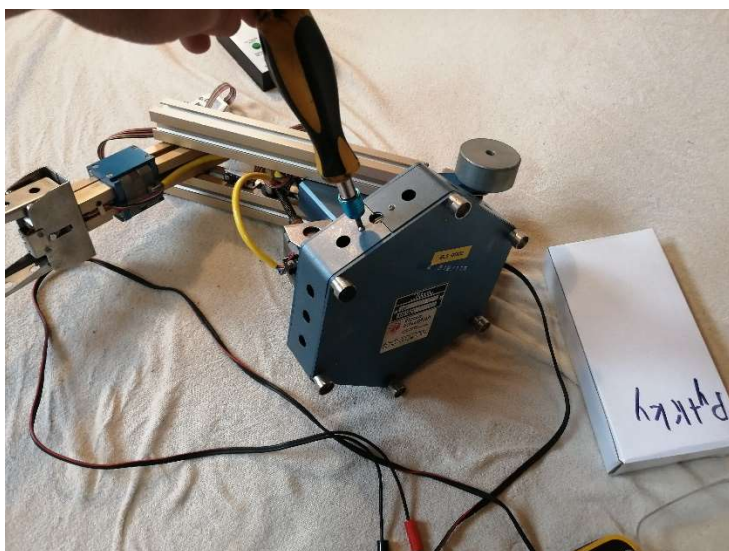
4. Postup práce

4.1. Rozebírání

Část, která na začátku samozřejmě přijít musela. Ačkoliv reálně jediné, co bylo skutečně potřeba vymontovat, byla základní deska, aby se zjistilo, co vlastně obsahuje a jak se s ní bude pracovat. Problém nastal ve chvíli, kdy jsem si všiml, že robot je vytvořen tak (nelze učit, zda šlo o záměr, nebo jen náhodu), že proto, aby se člověk k základní desce dostal, je nutné, aby rozebral podstatnou část robota. V podstatě jen pro rozdělení jednoho podstavce robota, kde byla deska robota umístěna, jsem rozebral nejen celou základnu, ale i část ramena nahoře.

Každou část, kterou jsem z robota odňal, jsem následně důkladně nafotil a vložil do pytlíku, který měl na sobě číslo, případně lihovkou ve zkratce popsané, co se tam nachází.

Rozebrat robota tak, aby se dalo k desce skutečně dostat byl úkol na celý den. Nakonec jsem však byl úspěšný a deska byla konečně venku ze stroje.



Obrázek 8: Rozebírání robota



Obrázek 9: Pytlík na šroubky

4.2. Analýza dílů

Když byla deska konečně venku, mohlo se začít s její analýzou. Musel jsem zjistit, jaké díly obsahuje a jestli se dají použít. Po přezkoumání jsem se rozhodl, že desku zkusím navrhnout znovu v programu EAGLE [26]. V tomto softwaru jsem navrhoval desku na ročníkovou práci. Na maturitní práci jsem však software změnil. Kvůli jednoduššímu ovládání, a hlavně menší práci pro posílání výrobních dat do Číny

byl jako software nakonec zvolen KiCad [27]. Hlavní rozdíl mezi oběma softwary je kolonka tabulky, která se dá vytvořit. Ta kolonka se jmenuje LCSC a jedná se o číslo součástek. Tyto součástky osazuje firma JLCPCB [30] v Číně rovnou při výrobě. Takže domů dojde deska plošného spoje osazena buď úplně něčím či částečně. To všechno záleží na nastavení. Vytvoření dat pro výrobu z KiCadu je mnohem jednodušší.

4.3. Historie návrhů desky

Následující kapitola popisuje, jak se měnili adepti a požadavky na řídicí desku robota.

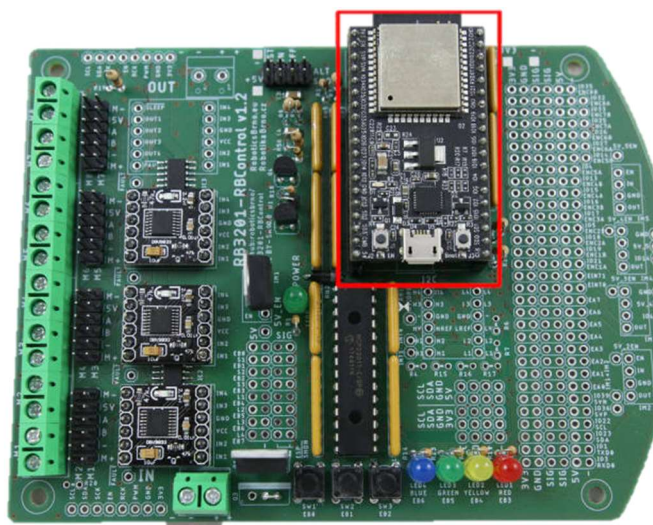
4.3.1. Základní deska – RBC

Tuto desku jsem se rozhodl použít prozatím. Když jsem chtěl navrhnout novou řídicí elektroniku robota a začal jsem na ní pracovat, nastal globální problém s Korona virem a spoléhat se na to, kdy deska z Číny dojde, tak přestalo být možné.

RBC deska [5] je univerzální deska, která se používá u nás na Robotárně [29] k řízení různých robotů. Na základě desky je postaven i předloňský robot Méd'a/Summerwind, který se zúčastnil soutěže Robotický den v Praze [32]. I loňský robot, který zatím nemá své jméno a bohužel z důvodu zrušení soutěže zatím nestartoval.

Deska jako taková funguje v podstatě jako rozšíření k desce ESP-32 [9], které se budu věnovat dále. RBC rozšiřuje počet pinů desky a umožňuje snadnější přístup k pinům, ke kterým by se jinak nedalo dostat.

K hlavním funkcím desky patří, že dokáže současně napájet a ovládat až 8 stejnosměrných motorů, 4 serva nebo korkové motory a 8 mikroserv. RBC pak



Obrázek 8: RBC deska s vyznačeným ESP-32 čipem [10]

disponuje třemi tlačítkami a čtyřmi LED diodami. Ty budou sice taky potřeba, ale budou muset být přepájené, nebo se použijí pro to určené pin heady. Dále je zde ochrana proti přepólování a podvybití baterií, což je taky velmi důležitá a účinná věc. Ovšem vzhledem k faktu, že kvůli imobilitě celého robota nebudu používat baterie, ale robot bude napájen ze zdroje, tak druhou jmenovanou funkci nevyužiji.

4.3.2. ESP-32

ESP-32 je vývojový čip. Pochází od firmy Espressif. V tomto případě je vsazen do desky Dev Kit-C. Ten má na sobě několik čipů umístěné pod hliníkovým krytem a jedním z nich je právě ESP32 čip. Dále je na desce vyvedena anténa pro technologie Wifi a Bluetooth. Kvůli ní je deska vystrčena nahoru, aby nedošlo k rušení.

ESP dokáže pracovat s Wifi a Bluetooth ve verzi 4.2. Procesor má paměť 512 kB a dokáže tak uchovat hodně dlouhý kód.

Oproti staršímu ESP8266 má Bluetooth, dvakrát rychlejší frekvenci (80Mhz v 240Mhz). Interní paměť taky vzrostla ze 160 kilobytů již zmíněných 512.

Samotnou desku lze naprogramovat v různých prostředích, jazycích a přes různé kompilátory jako například: Arduino IDE, Espressif IoT Development Framework, Micropython, Platform IO, Zerynth a jiné.

Osobně mám tuto desku hodně rád, protože jsem se na ní učil. Svými parametry je jasným výhercem ovládacího čipu. Dev Kit-C mě provedla přes nejprve přes ALKS desku na RB controller a teď slouží i u nové Schoolboard[16], kterou však pro nemožnost ovládání všech čtyřech krokových motorů nemohu použít. Robotický kroužek tuto desku používá u velké části projektů.



Obrázek 9: ESP-32 na desce Dev kit-C [18]

4.3.3. Požadavky na moji desku

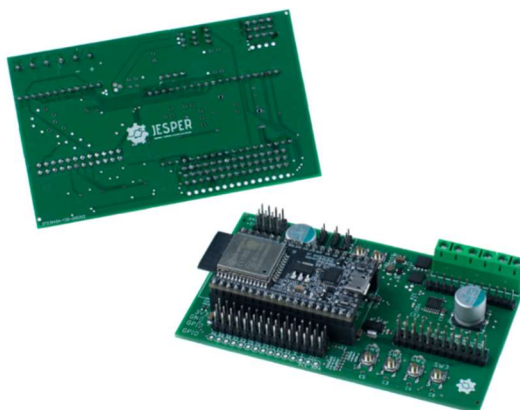
Sem napíšu několik požadavků, o kterých vím, že je na budoucí desce budu požadovat nebo potřebovat.

Základní čip nechám stejný jako u RBC a tím bude ESP-32.

Deska bude následně obsahovat drivery TMC 2208, které jsou pro řízení krokových motorů používány jako drivery k 3D tiskárnám.

Jako základ se budu inspirovat u již zmiňovaného Schoolboardu, případně RBC, protože stejně jako u něj bude i u mého návrhu rozbočovač na ESP-32, tlačítka, potenciometry a možná i LED. Co bude potřeba změnit budou rozměry desky, místa uchycení, na desce budou plošky pro přepájení napájení z laboratorního zdroje a samozřejmě budu muset změnit místa, které jsou udělané na umístění driverů.

Poslední věc bude zdroj, který bude řešený opět stejně jako u současného modelu z laboratorního zdroje.



Obrázek 10: Schoolboard [16]

4.3.4. Deska verze 0.1

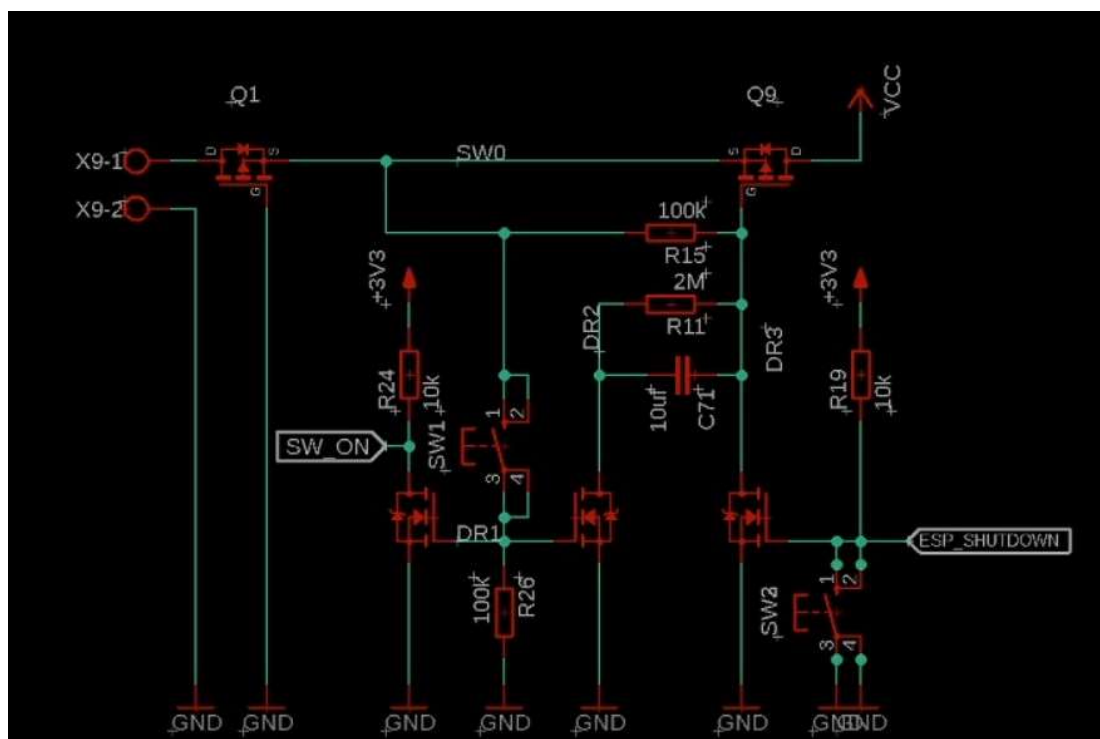
Tvar původní desky v robotovi byl blíže nespecifikovaný n-úhelník, který má na svém boku výše zmiňovaný konektor D-sub.

Tvar méj desky verze 0.1 je šestiúhelník s vykrojeným čtvercem pro krokový motor, jehož úloha je otáčet celou hořejší částí. Rozměry vykrojení jsou 50 na 50 milimetrů.

Navrhování tvaru desky jsem provedl v 3D programu Fusion 360 [28], odkud jsem dále tvar vyexportoval do formátu dxf. Chtěl jsem zachovat tvar šestiúhelníku. Potřebuji 3 místa, kde je nutné mít díry na šrouby přesně. Jinak základní desku nenamontuji místo té předchozí.

K výrobě návrhu elektronické části byla samozřejmě zapotřebí schéma celé desky. Pro verzi 0.1 jsem se rozhodl, že deska bude na sobě obsahovat pouze 2 tlačítka pro zapnutí a vypnutí, 2 LED a 4 drivery pro motor.

Začal jsem nejprve s ochranným obvodem proti přepólování, který je velice důležitý pro nezničení desky opačným zapojením kabelů ze zdroje. Ochranný obvod



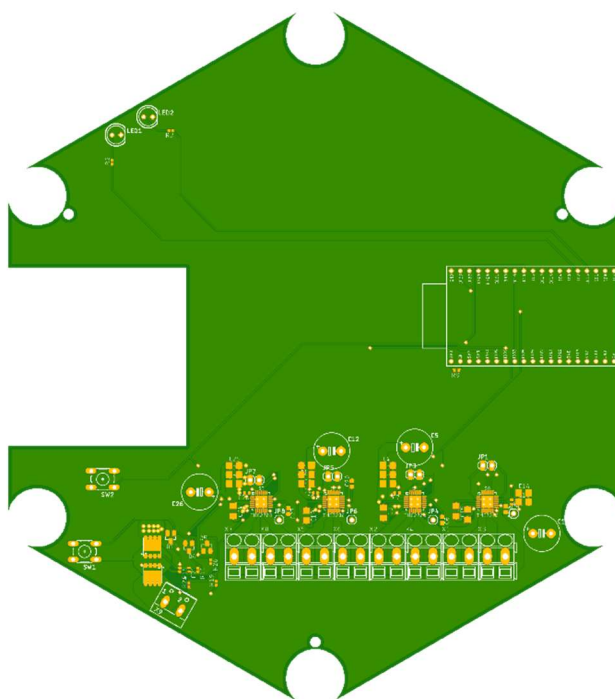
Obrázek 11: Ochrana proti přepólování a vypínací, zapínací tlačítka desky 0.1

funguje následovně: pokud rozdíl napětí mezi source (S) a gate (G) tranzistoru Q1 bude odpovídat určité hodnotě vyšší než otevírací mez tranzistoru (threshold) (což v případě správného zapojení bude vždy), bude tranzistor otevřený. Proud pak projde do source a od toho místa do zbytku desky. Pokud by se však kabely zapojily obráceně, tranzistor se uzavře a proud nebude procházet. Proud tak do source neprojde a deska (případně robot) se nezapne.

Přepólovací ochrana je dále spojena se dvěma tlačítky pro zapínání a vypínání stroje. Když proud projde přes source, dostane se na místo SW0 a na místa v obrázku popsané jako DR2 a DR3. Na těchto místech je po připojení baterie napájecí napětí.

V momentě zmáčknutí prvního tlačítka (SW1) se na dráhu DR1 přivede 12 voltů. 12 voltů následně otevře tranzistory na krajích, pak na SW_ON a DR2 bude zem. Pak bude na DR3 též zem. Díky tomu se pak otevře tranzistor Q9. Tím se dostane na VCC napájecí napětí.

Na desce je následně to nejdůležitější. Tím jsou 4 drivery na 4 krokové motory. Nakonec jsem byl nucen použít TMC 2208 z důvodu větší dostupnosti, ačkoliv jsem chtěl použít původně 2224. Motor je následně zapojený tak, jak to vyžadoval datasheet [31]. Drivery byly následně zkopírovány, protože všechny čtyři mají vypadat stejně.



Obrázek 12: Výsledná podoba desky verze 0.1

Deska ještě obsahuje 2 LED diody, které budou sloužit jako indikátory.

Když bylo hotové schéma, následoval samotný návrh desky a rozložení součástek na ni. Začal jsem umístěním čipu ESP 32 a jednotlivých úchytů na kontakty motoru a následně úchyty pro připojení laboratorního zdroje. Snažil jsem se, aby co nejvíce kondenzátorů bylo co nejbližší driverům. Zároveň jsem musel udělat

co nejširší dráhu pro VCC kvůli vysokým teplotám, indukčnosti a odporu. Výsledný návrh je na obrázku výše.

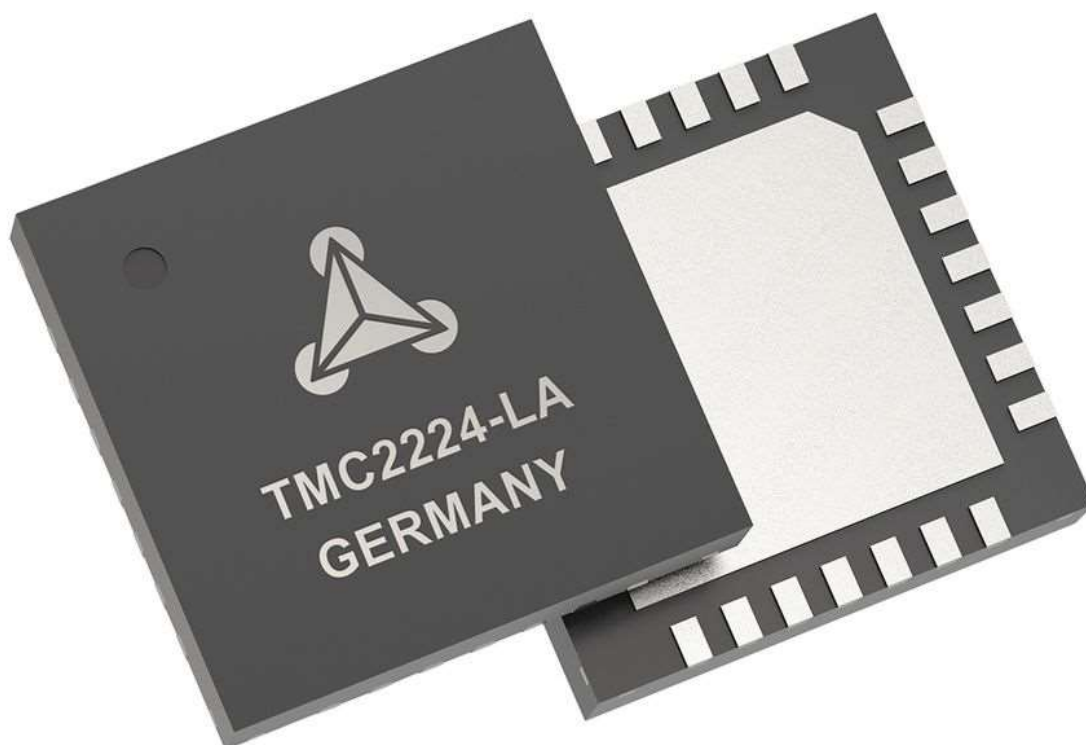
4.3.5. TMC 2208 Driver

TMC 2208 je budič pro krokové motory, který mi byl pro tento účel doporučen. Vyrábí ho firma Trinamic.

S rozměry 5 na 5 milimetrů nezabírá skoro žádné místo, ovšem připájet ho na desku může být celkem problém. Proto bych ho nechal připájet rovnou v Číně.

Má 2 výstupy pro dvě cívky (na jeden krokový motor), spínací frekvenci 16 MHz, Napájecí proud 7,5 miliampérů. Do motorů následně může poslat až 4,75 ampérů a až 36 voltů stejnosměrného proudu. Funguje za provozních teplot až do -40 stupňů celsia, kam se sice nedostanu, ale je zajímavé to vědět.

Tento ovladač krokových motorů zvládne až 256 mikrokroků na jeden krok. Je velmi přesný. Při pomalém chodu dokáže řídit motor zcela nehlukně.



Obrázek 13: TMC 2208 [11]

5. Deska 1.0

Deska verze 0.1 nakonec nebyla vyrobena. Ukázalo se, že je příliš velká. To mě vedlo ke změně tvaru a desky obecně. Na novou desku jsem pak dosadil nový driver.

5.1. TMC 2209

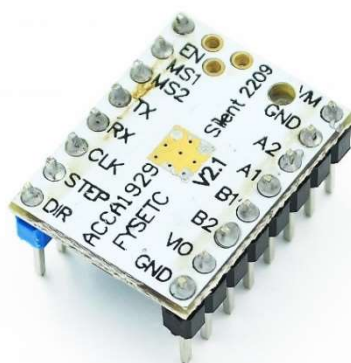
Další změna, která na robotovi nastala je v podobě změny budiče krokových motorů. Tam metu přejímá TMC 2209, což je vyšší a výkonnější řada od 2208.

Hlavní rozdíl mezi TMC2208 a TMC2209 je fakt, že TMC 2209 dokáže řídit motor v naprosté tichosti. Proto bývá využívám hlavně v místech, kde bývá ticho vyžadováno. Navíc přes něj zvládne protéct větší proud.

Hlavní důvod přechodu na tuto desku je však funkce adresování. Tak bude podrobněji popsána níže přímo na desce. Ve zkratce se jedná o hledací adresu, aby bylo možné ovládat 4 motory z jedné desky přes 1 UART. Je to něco jako adresa domu, jen je vyjádřena jako 1 nebo 0.

Navíc díky funkci StallGuard dokáže pohybovat s motorem bez senzorů a přecházet ztrátě kroků, které by jinak mohli způsobit opravdu potíže. Jeho citlivost lze navíc upravovat tak, aby vyhovovala aktuálním potřebám.

K dalším zajímavým a rozdílným funkcím patří Coolstep, který nabízí dynamickou kontrolu proudu podle dat z funkce StallGuard. Tato funkce byla původně vyvinuta čistě pro zdravotnické přístroje a jiné laboratorní stroje. Díky této technologii snižuje spotřebu energie až o 90 % a také snižuje i generování tepla.



Obrázek 14: TMC 2209 Breakout Board [13]

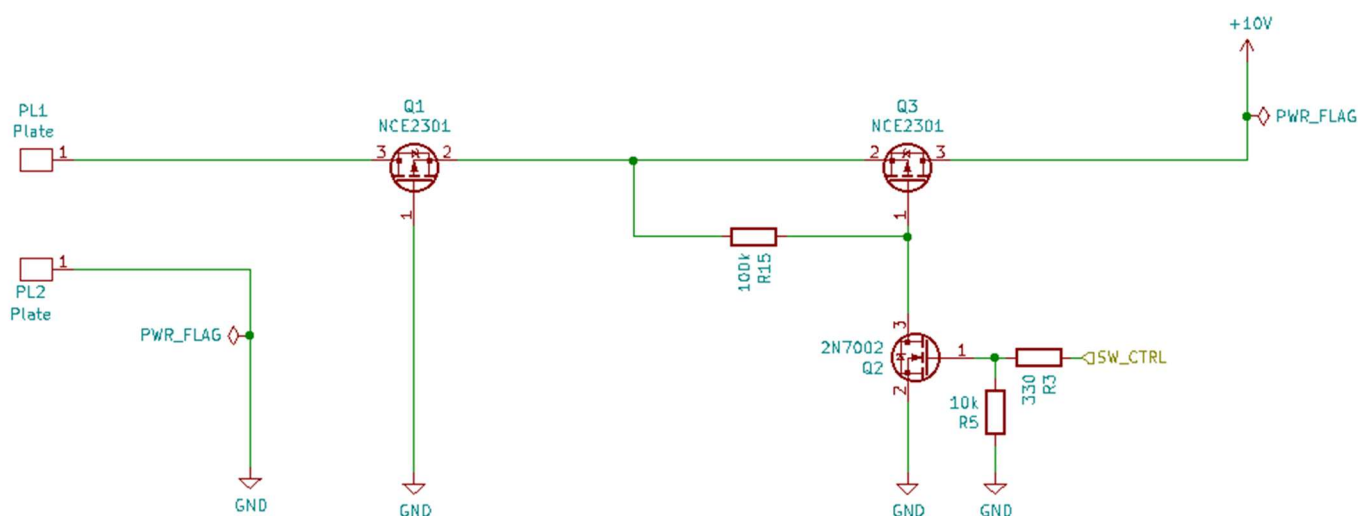
A jeden z největších rozdílů je taky forma součástky. Na předchozí desce verze 0.1 byla součástka zamýšlena jako čip, který tam už zůstane. Na novou desku použijeme tak zvaný „breakout board“, což je deska, která má vyvedené piny a na standartní desku se díky větším rozměrům pájí o poznání snáz. Důvodů je povícero. Od možnosti výměny čipů, přes jednodušší a možná i levnější montáž, po lehčí dostupnost.

5.2. Deska 1.0

Co se od minulé verze změnilo nejvíce, jsou jak komponenty na samotné desce, tak i styl desky jako takový. Deska má nově menší rozměry. Je koncipována tak, aby se vešla do konkrétních rozměrů. Tyto rozměry jsou 86 na 74 milimetrů. Důvod těchto rozměrů bylo, aby se deska vešla na jedno konkrétní místo v podstavci robota. Potřeboval jsem ji umístit mezi sloupky podstavy a zároveň, aby nepřekážela hlavnímu sloupku, který všechny kabely rozváděl k ostatním motorům a čidlům.

Deska následně nebude sloužit jen na jednoho robota, přestože pro něj byla původně navržena a minimální rozměry se točí okolo něj. Jelikož JLCPCB, kde nechám desku vyrábět, vyrábí po minimálně pěti kusech a školní roboti jsou 3, tak jsem celou desku pojal jako univerzální desku na řízení krokových motorů. Proto je na desce nápis „Universal stepper board“, což ve volném překladu znamená „Univerzální deska na řízení krokových motorů“.

Místo šestiúhelníkového tvaru jsem zvolil mnohem jednodušší, a to obyčejný obdélník. Původně jsem ještě pracoval s předpokladem, že místo, kde je anténa desky ESP32 Dev Kit-C, bude výkroj, ale nakonec mám radši desku s ESP32 vysunutou do míst, kde nebude překážet deska anténě. Důvod vysunutí desky je rušení antény mědí, která je v celé elektronické desce.



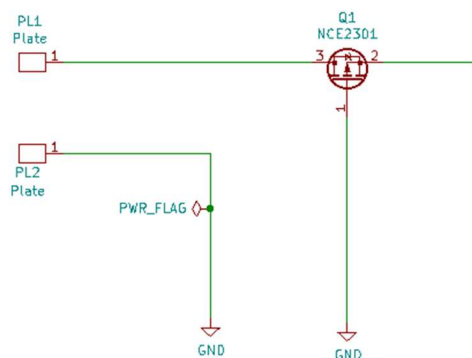
Obrázek 15: Zapínací a motory napájecí obvod desky 1.0

Začátek byl opět stejný jako u desky 0.1, a to napájecí obvod. Ten však od minulé verze doznal jistých změn. Vzhledem k tomu, že napájení nebude z baterie, ale bude zapojeno až v momentě, kdy budu potřebovat s robotem hýbat, tak nepotřebuji zapínací a vypínací tlačítka, která v minulé verzi řídila zapínání a vypínání desky. Co se týče ochrany proti přepólování, tak i tam nastala změna. Změnily se tranzistory, protože jsem desky chtěl nechat osazovat v Číně, a tak jsem na to hledal komponenty s dostatečnými hodnotami. Kupříkladu, aby tranzistory zvládly požadovaný proud, napětí a tak podobně. Tím, že jsem použil tranzistor NCE20P45Q [33] s osmi kontakty jsem však také musel přikreslit úplně nový díl, jelikož knihovna KiCadu neobsahovala žádný tranzistor s osmi kontakty. Přestože je zde osm SMD kontaktů, tak výstupy jsou stále stejné a to drain, source a gate. Třetí tranzistor (na obrázku označen jako Q2) zůstal stejný jako býval, jelikož není potřeba, aby byl takto výkonný.

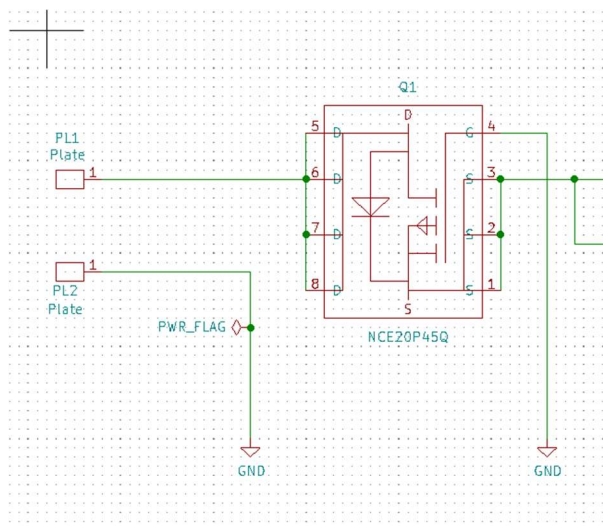
Nakonec při posílání desky do Číny nastal ještě další problém, a to v tom, že daný tranzistor nebyl dostupný na skladě. Proto jsem musel hledat dál, a nakonec jsem dokonce našel tranzistor NCE2301 [34], který měl normální velikost a počet pinů jako obvyklý tranzistor a zároveň splňuje funkční požadavky desky. Proto jsem se rozhodl tranzistor změnit a vybrat právě tento, který na desce už do výroby zůstal.

Dále je zde více zdrojů napájení. Motory potřebují napájení až 10 voltů, zatímco deska s ESP32 čipem vyžaduje jen 3,3 volty. O napájení se tedy stará již zmíněný

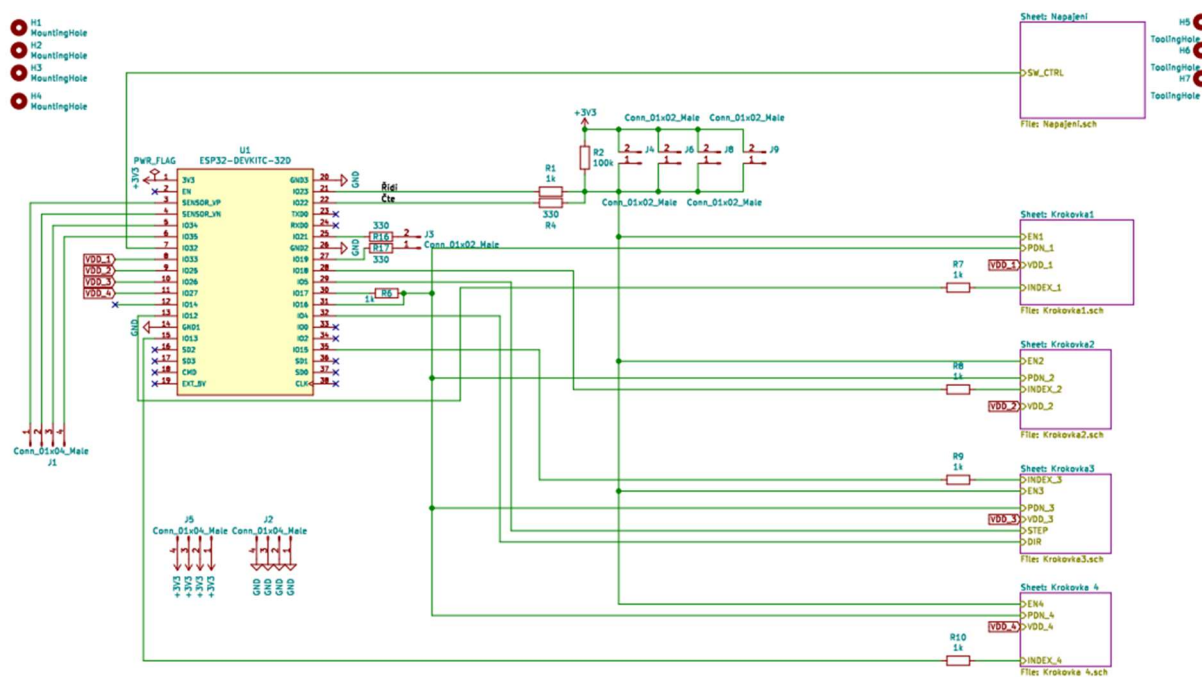
napájecí obvod. Napájení desky obstarává microUSB kabel vytažený z desky do počítače, který bude desku ovládat.



Obrázek 18: Aktuální mosfet a jeho zapojení

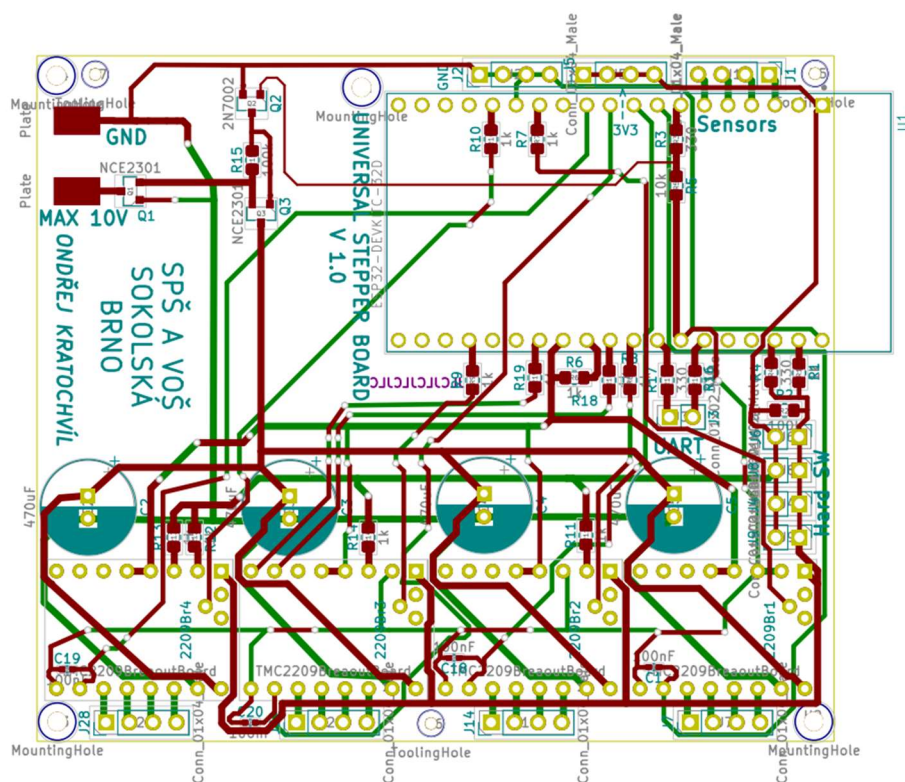


Obrázek 19: Bývalý mosfet a jeho zapojení



Obrázek 20: Kompletní zapojení desky 1.0

Napájení měla původně obstarávat součástka, do které by se následně zasunul konektor (tzv. „banánek“). Bohužel jsme však přes veškerou snahu vhodný konektor na osazení od JLCPCB nenašel, a proto je deska osazena dvěma destičkami, na které se napájí kabel, který vede konektor. Tento konektor se připojí na zdroj a bude dále rozvádět proud do motorů robota.



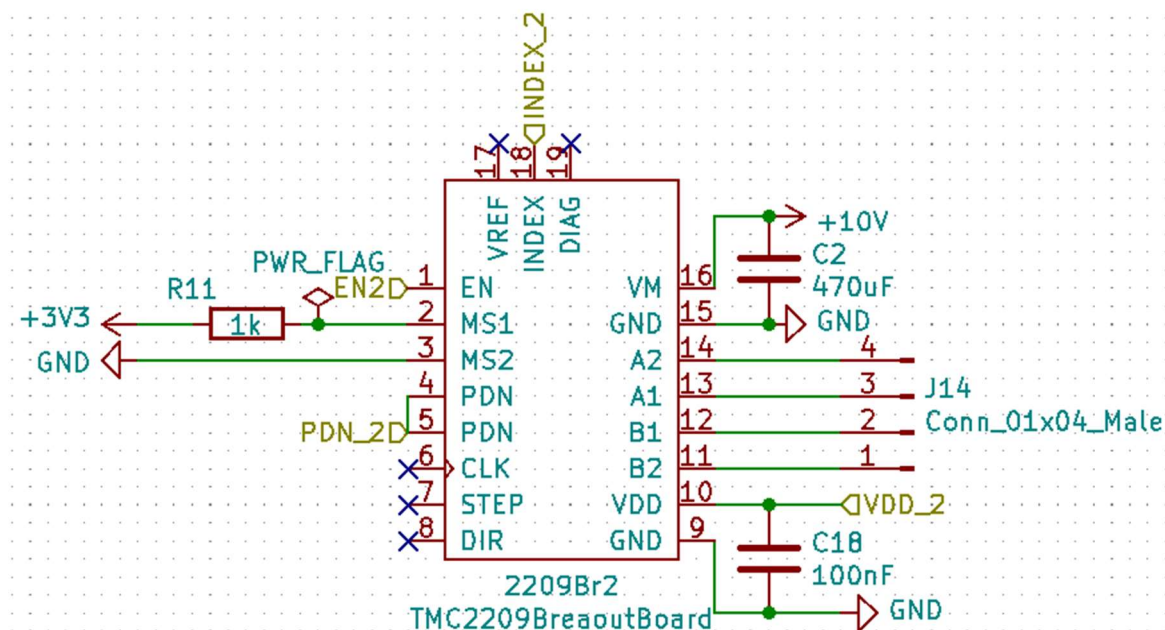
Obrázek 16: Výrobní schéma desky verze 1.0

Další na řadě bylo zapojení breakout destiček TMC 2209 [15] k napájení a řízení. To bylo pospojováno podle datasheetu [15] a věci, které nebylo třeba připojit, zůstaly nepřipojené.

Všechny destičky mají stejné zapojení s jednou výjimkou, a to jsou piny s označením MS1 a MS2. Ty se u každé desky liší. Důvod je rozlišení desek pro následné volání programem. Destičky se adresují pomocí hodnot 0 (GND) a 1 (3V3). Aby měla každá destička jiné značení, tak se prohazují hodnoty na pinech. První destička má na MS pinech dvakrát přivedenou zem (GND), což udává její označení 0,0. Destička číslo dva má označení 1,0, číslo 3 má 0,1 a poslední destička se značí 1,1. Jinak destičky mimo čísla neodlišuje nic a vypadají naprosto totožně. V přiloženém obrázku níže číslo 22 je pak zapojení desky číslo 2 s označením 1,0.

Napájení destiček deseti volty je chráněno 470 mikrofárovým kondenzátory, pro které bylo velmi důležité najít umístění. Všechny ostatní kondenzátory a odpory jsou

vyrobeny jako SMD, takže nebyl takový problém je dát prakticky kamkoliv, jelikož se celkme slušně vlezly. Na druhou stranu umístit THC kondenzátory s velkým průměrem mohl být potencionálně problém a tak musely mít při navrhování desky přednost. Ale už při umístění TMC2209 bylo nutné uvažovat i nad umístěním kondenzátorů.



Obrázek 17: Zapojení Breakout desky TMC2209

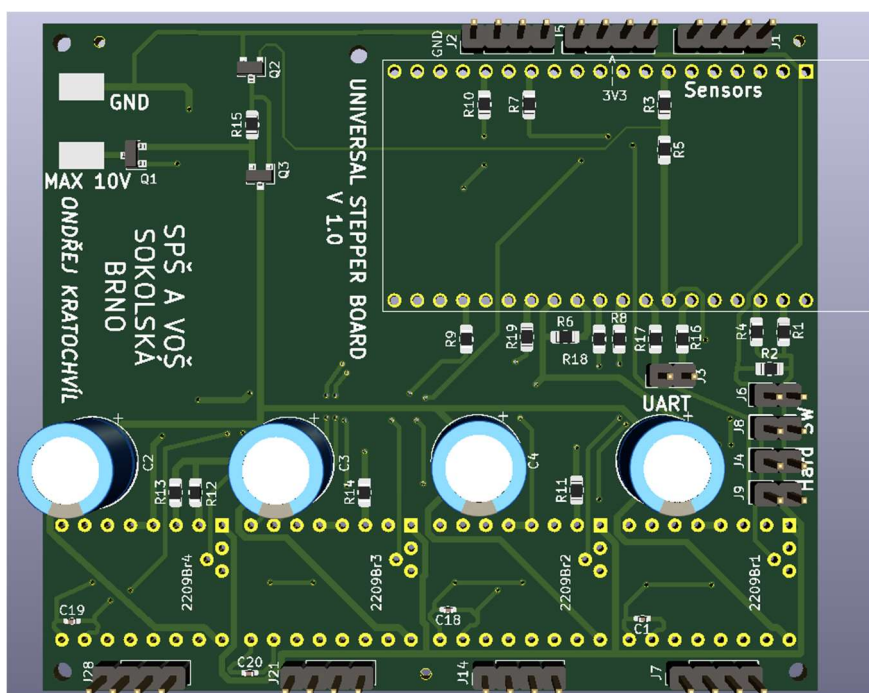
Umístění „mozku“ celé desky, tedy čipu ESP32 na desce Dev Kit-C, následovalo hned po umístění TMC 2209 a to z jednoduchých důvodů. Deska má jen jedno pravidlo ohledně čipu a to, že anténa musí vyčnívat nad desku, aby měď v desce

nerušila signál. Navíc následné přesuny desky ESP32 Dev Kit-C by, kvůli mnoha vývodům, mohli být složité a proto se umísťuje brzo.

Další na řadě bylo umístění podložek na přívod napájení. To byly dvě plochy pro následné připájení portů na banánkové kabely. Ty jsem chtěl umístit na kraj a dát jim dostatečnou velikost, aby se daly kontakty připájet na relativně velkou plochu.

Pak už na pořadí osazování nezáleželo. Jediné pravidlo, které bylo potřeba dodržet, bylo, že díry na uchycení desky bych chtěl v ideálním případě v rozích, což se s jednou výjimkou povedlo.

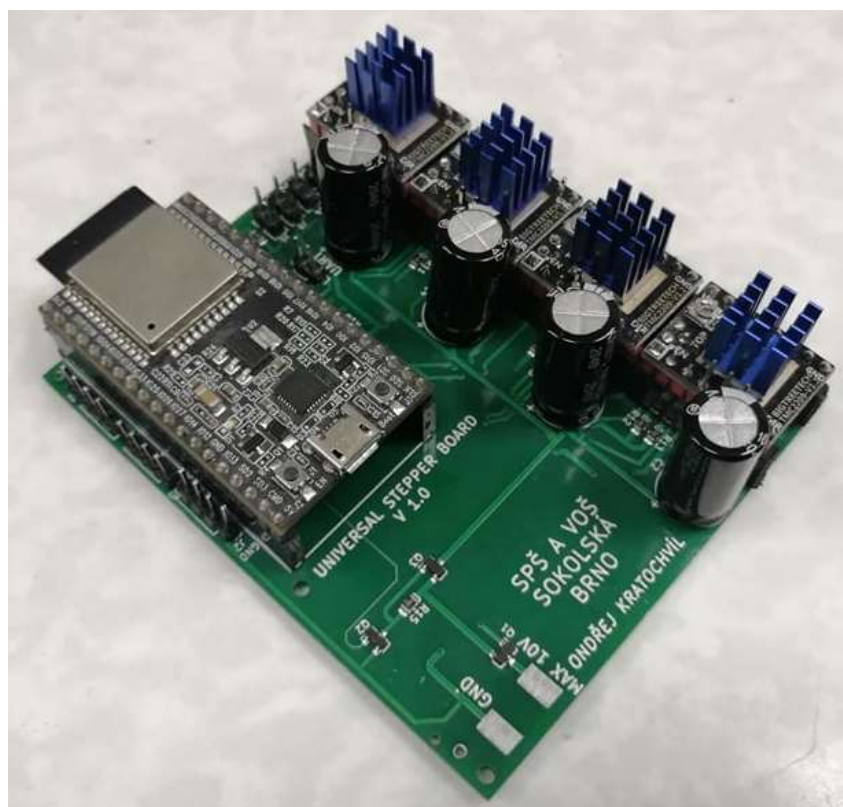
A nakonec bylo potřeba do desky zasadit minimálně 3 díry o konkrétních rozměrech, a to o přesném průměru 1,152 milimetrů. Tyto díry slouží k výrobě desky a nazývají se „Tooling holes“, což v překladu znamená „otvory pro nástroje“. Požadavek na jejich umístění je ideálně do rohů nebo někam, kde budou daleko od sebe. Tyto díry slouží pro robota, který bude desku vyrábět a osazovat. Robot si jednoduše potřebuje tu desku někde chytit, aby neměla šanci vypadnout a nemohlo tak dojít k jejímu poškození.



Obrázek 18: Vygenerovaný 3D model desky 1.0



Obrázek 24: Deska z výroby s osazením od výrobce



Obrázek 25: Deska z výroby po osazení

6. Řízení robota

Ovládání robota bude prováděno člověkem. Tuto možnost jsem zvolil z několika různých důvodů. Jedním z důvodů je, že lidský operátor dokáže s ramenem provádět opravdu složité úkony, kde by i sebelépe vyladěný program mohl robotu působit problémy v podobě např. nečekané překážky jak pevné, tak třeba neočekávaný pohyb člověka do trajektorie stroje a tak podobně. Další důvody, třeba ve formě změny místa nebo velikosti přenášeného předmětu vyřeší mnohem lépe lidský operátor, který na situaci vidí než stroj, který je sám o sobě „slepý“. Integrovaní systémů na detekování okolních překážek a tím i potencionálních hrozeb je v dnešní době stále náročná věc. Proto to většina robotizovaných linek řeší tak, že jejich robotické stroje mají kolem sebe klec nebo jinou bariéru, která aktivně brání ve vstupu lidí do komplexu a tím i přiblížení se k němu. Samozřejmě existují i stroje, které na přítomnost člověka reagují, a třeba s člověkem i přímo spolupracují. Nazývají se Koboti nebo také kolaborativní roboti. Pořizovací cena takových robotů se však pohybuje v mnohem vyšších číslech a jejich technologie je taky na vyšší úrovni. Když navíc uvážím stáří robota, tak zavedení podobné technologie na tuto strukturu by bylo více než náročné. Proto jsem se rozhodl zvolit člověka jako operátora stroje.

Člověk, kterému bude práce svěřena, bude ovládat robota za pomoci herního ovladače pro počítač C-TECH Riphonus, který jsem si pro účel řízení robotů pořídil už nějaký čas zpět.

Gamepad, neboli herní ovladač, má rozložení tlačítek, jaké používá firma Sony PlayStation pro své konzole, takže v horní části horní strany ovladače se nachází na levé straně 4 šipky a na pravé straně 4 jiná tlačítka s čísly (případně symboly nebo abecedou). Ve spodní části horní strany ovladače se nachází páčky pro řízení směru. Vepředu se potom na každé straně nacházejí dvě další tlačítka.

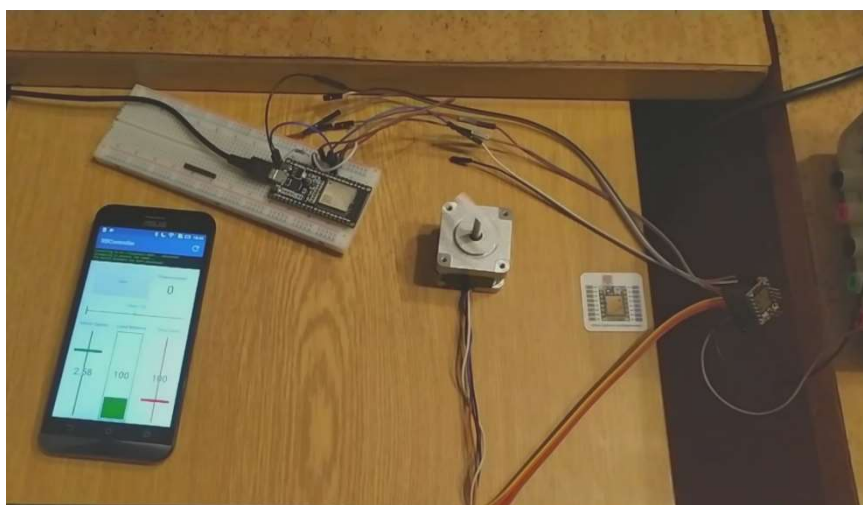
Pro moje účely ovládání však budou stačit předposlední zmiňované páčky, jejichž funkčnost bude následující. Páčka na pravou ruku bude při pohybu doprava nebo doleva otáčet základnou a při pohybu nahoru nebo dolů zvedat první část robotické paže. Páčka levé ruky bude sloužit jako ovladač pro klepeta, což bude opět pohyb doleva a doprava. Směr nahoru a dolů bude ovládat zdvih druhé části paže.



Obrázek 26: Ovladač C-TECH RIPHONUS [12]



Obrázek 27: První rozpohybování motorů robota (viz první video v příloze)



Obrázek 28: Rozpohybování motoru pomocí mobilu (viz druhé video v příloze)

7. Pohyb robota

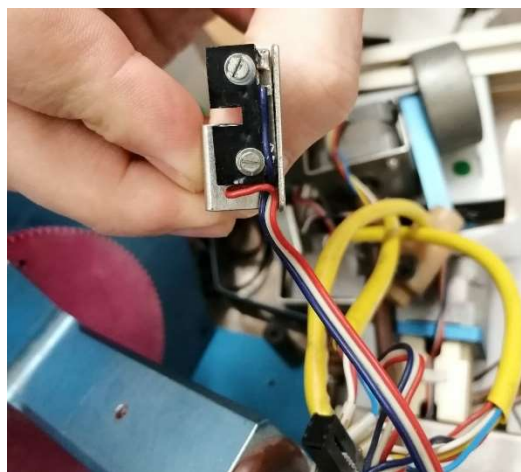
Každá osa, po které se robot pohybuje, je do určité míry omezená. Hlavní rotační osa je omezena tak, aby se zabránilo překroucení kabelů a jejich následného vytržení nebo jiného přerušení obvodů. Zbylé dvě osy jsou omezeny jak konstrukcí robota (aby nevrážel do své základny), tak délkou závitových tyčí, které polohují rameno robota.

Poslední motor uzavírá a otevírá ruku robota. I ten je logicky omezen. Například maximálním otevřením nebo naopak maximálním uzavřením ruky.

Na orientaci každého motoru slouží optický senzor. Jeho zapojení je řešeno na desce v horní části. K senzoru je připojeno napájení (GND a 3 volty) a následně výstup na čtecí pin. Tento senzor se přepne v momentě, kdy jeho vedení bude přerušeno nebo naopak nastane spojení. Sensory fungují softwarově. Takže když nastane změna, dostane pin informaci o změně.



Obrázek 29: Vnitřní část senzoru



Obrázek 30: Vnější část senzoru

Vzhledem k univerzálnosti desky bylo potřeba, aby se o zastavení motorů staralo i něco jiného, než již vložené optické senzory. Proto je na desce umístěna čtveřice tlačítek, která budou též vyvedena do horní části robota. Tato tlačítka slouží ke stejnému účelu, jako již zmíněné optické senzory. S tím rozdílem, že odpojení motoru proběhne jiným způsobem.

Jak již bylo zmíněno, tak řízení robota bude zajišťovat ovladač. První pokusy o rozhybání však proběhly z počítače a video z toho je k práci přiloženo (obrázek

z videa je na straně 29 s číslem 27). Driver byl v tomto případě řízen PWM signálem, takže do STEP byly neustále posílány pulzy.

8. Finanční stránka projektu

Jedna z posledních věcí, kterou budu popisovat, jsou finance. Na začátku projektu nebyl dán nejvyšší limit, ale i tak platí, že čím levněji je možné desku vyrobit, tím lépe.

Výsledná cenová kalkulace pak vychází ve dvou výškách, podle toho odkud je daná součástka zakoupena. Na rozdíl jednoho a půl tisíce korun stačí jedna položka a tou je mozek robota – ESP32 čip na desce Dev Kit-C. Na českých internetových obchodech tento konkrétní čip lze sehnat okolo 400 korun kus, což jsou ve výsledku dva tisíce korun za osazení všech desek tímto čipem. Na druhou stranu v Číně na serveru Aliexpress.com se tyto čipy dají sehnat za cenu okolo 100 korun. Přesto, že najít konkrétní desku je trochu oříšek, tak výsledek je i s poštovným o poznání levnější. Ne vždy se však vyplatí spoléhat na to, co přijede z Číny. Protože čas od času deska nebo součástka z Aliexpressu nemusí být stoprocentně funkční. A to je pravděpodobně ten největší problém.

Stejně je to i u driverů na motory, které se však dají nějakým způsobem oželeť přikoupením většího počtu kusů a následným zkoušením. Tam už je na cenu důraz o něco vyšší. Vzhledem k faktu, že pro 5 desek je jich potřeba koupit 20, se jejich cena vyšplhala až na 2000 korun za všechny drivery.

položka	cena ČR	cena Čína
deska	90*	150
ESP-32	400**	100**
TMC2209	1000**	400
Dutinky	33**	11,4**
součástky	50	již osazeno
výsledná cena	1573	661,4
pro osazení 1 desky		
*bez osazení, součástek a dopravy		
**bez dopravy		

Tabulka 1: Výpočet ceny za produkty

Poslední cenová položka je pak deska jako taková plus osazování, součástky a tak podobně. Ta se s výrobou a dalšími věcmi dostala na cenu 750 korun za výrobu i osazování. Do osazování však nezapočítávám dutinky, které budu osazovat až já,

protože je levnější si koupit dutinky z GME.cz za 11 korun řadu 40 dutinek po 12 kusech, dutinky následně připájet a do toho potom a do dutinek potom Dev Kit-C a TMC2209 zapojit.

Takže výsledná cenová suma se pohybuje okolo sedmi set korun za osazení desky pomocí komponent z Číny a okolo jednoho tisíce sedmi set korun za výrobu a veškerého obstarávání věcí z českých trhů.

9. Závěr

I přes opoždění některých dodávek, problémy během distanční výuky, a tak podobně se povedlo sestrojit fungující desku.

Už od počátku bylo zřejmé, že rozebrat robota nebude nic jednoduchého. Nakonec byl robot úspěšně rozebrán a původní deska byla na světě a bylo možné ji prohlédnout. Bohužel negativním výsledkem dalšího použití.

Po ohledání desky se zjistilo, jak mohla fungovat. A podle toho se začaly tvořit další verze této desky, která by mohly lépe fungovat z dnešního pohledu.

Tam však už nastal první pandemický problém. A tak bylo jasné, že během 3. ročníku se už žádná deska na robota vyrábět nebude. Přesto jsem se rozhodl, že desku verzi 0.1 musím navrhnout. Hlavní důvod byl osvojit si program Eagle a rozvinout schopnost navrhovat desky. To nakonec dopadlo úspěšně a deska teoreticky mohla fungovat.

Do čtvrtého ročníku mi však bylo doporučeno změnit software na navrhování desky, protože z KiCadu je mnohem méně práce dostat desku do výroby. Začal jsem tak vlastně znova od nuly. Po druhé už jsem se však zaměřil na to, aby deska po dokončení šla rovnou do výroby. Nakonec jsem s vedoucím práce několikrát celý obvod předělával nebo opravoval. Postupem času na desce proběhlo opravdu velké množství změn, až se nakonec dostala do fáze, kdy jsem navrhnul PCB layout (něco jako výrobní výkres desky). Ovšem jsme zapomněli na velký kondenzátor a vzhledem k rozpoložení a velikosti kondenzátoru jsem se rozhodl udělat PCB layout od znova. Tak jsem se sedl znova a deska byla na světě.

Nakonec došlo na poslední fázi, a to poslání desky do výroby. Před tím byly na desce provedeny poslední změny a vše bylo odesláno do výroby. Ukázalo se, že návrh výběr a realizace je mnohem náročnější úkol, než se očekávalo.

Deska nakonec přišla relativně pozdě a na osazování a zkoušení nám nedala příliš mnoho času, ale přesto jsme ji ověřili a jsme si jisti její funkčností.

Vznikla tak funkční elektronika pro řízení školního robota Oscar95. Tu je možné využít pro ovládání jak robota samotného, tak podobných strojů řízených krokovými motory. Moji práci mohou žáci používat během výuky pro učení se zapojování,

programování nebo prostě jen řízení robota, jemuž podobné se používají v průmyslové výrobě.

10. Seznam obrázků:

Obrázek 1: Robotická ruka Oscar 95

Obrázek 2: Můj pokoj nachystaný pro focení rozebírání robota

Obrázek 3: Informační deska na spodní části robota

Obrázek 4: Krokový motor se štítkem

Obrázek 8: Rozebírání robota

Obrázek 9: Pytlík na šroubky

Obrázek 13: Ochrana proti přepólování a vypínací, zapínací tlačítka desky 0.1

Obrázek 14: Výsledná podoba desky verze 0.1

Obrázek 17: Zapínací a motory napájecí obvod desky 1.0

Obrázek 18: Aktuální mosfet a jeho zapojení

Obrázek 19: Bývalý mosfet a jeho zapojení

Obrázek 20: kompletní zapojení desky 1.0

Obrázek 21: Výrobní schéma desky verze 1.0

Obrázek 22: Zapojení Breakout desky TMC2209

Obrázek 23: Vygenerovaný 3D model desky 1.0

Obrázek 24: Deska z výroby s osazením od výrobce

Obrázek 25: Deska z výroby po osazení

Obrázek 27: První rozpohybování motorů robota

Obrázek 28: Rozpohybování motoru pomocí mobilu

Obrázek 29: Vnitřní část senzoru

Obrázek 30: Vnější část senzoru

Video 1: První otáčení motoru (viz příloha)

Video 2: Otáčení motoru ovládané z telefonu (viz příloha)

11. Použitá literatura

- [1] Propagační leták, ELCOM EDUCATION s.r.o., Praha, 2 listy, [1995]
- [2] Laboratorní práce, VILÉM ROBOTKA, Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Brno, Sokolská, 1 list, [5.3.2009]
- [3] L298N. Transfer Multisort Elektronik Sp. Z o.o. [online] [cit. 2020-11-03] Dostupné také na: https://www.tme.eu/cz/details/l298n/drivery-motorove-a-pwm/stmicroelectronics/?gclid=Cj0KCQjw3qzzBRDnARIsAECmryrj4x11RGJJhvK6uSbjhAswHvqehMwb6EpvjeL3FTFltcx3Ge4-hzlaAs2xEALw_wcB
- [4] KOVALENKO, Iaroslav, Systém pro řízení pohybu angulárního robota, Liberec, 2013. Dále také na: <https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/19113/Diplomov%25C3%25A1%2Bpr%25C3%25A1ce.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Obhájeno na fakultě strojní Technické Univerzity Liberec.
- [5] RBControl. In: Github [Online] 30. Prosinec 2019 [2020-15-04] <https://github.com/RoboticsBrno/RB3201-RBControl>
- [6] TMC2224, In: DISTRELEC [online]. [cit. 2020-04-04] Dále na: <https://www.distrelec.cz/cs/budic-krokového-motoru-io-qfn-28-trinamic-tmc2224-la/p/30100515>
- [7] ESP-32, In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. Wikipedia foundation [cit. 2020 – 16-04]. Lze nalézt na: <https://en.wikipedia.org/wiki/ESP32>
- [8] TMC2224 datasheet, In: DISTRELEC [online]. [cit. 2020-04-04] Dále na: https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/ICs_Documents/TMC220x_TMC2224_datasheet_Rev1.09.pdf
- [9] ESP-32, In: ESPRESSIF [online] [cit. 2020–16-04]. Lze nalézt na: <https://www.espressif.com/en/products/modules/esp-wroom-32/overview>
- [10] Obrázek RBC. RBControl. In: Github [Online] 30. prosinec 2019 [cit. 2020-15-04] https://raw.githubusercontent.com/RoboticsBrno/RB3201-RBControl/master/docs/RB3201-RBControl_MotorEncoder_v1.1_schema.png

- [11] TMC2224 – obrázek, In: DISTRELEC [online]. [cit. 2020-04-04] Dále na: https://www.distrelec.cz/Web/WebShopImages/landscape_large/5-/01/TMC2224-LA-T_30100515-01.jpg
- [12] Obrázek C-TECH Riphonus, In: CZC.CZ [online]. [cit. 2021-25-01] Dále na: https://iczc.cz/btskku0262hvfb9shjvsa0usce_1/obrazek
- [13] Obrázek TMC 2209 breakout board, In: Alicdn.com [online]. [cit. 2021-25-01] Dále na <https://ae01.alicdn.com/kf/H8828d53394024df3832f8658d21fcb66a/TMC2209-V1-2-Stepper-Motor-Driver-TMC2208-UART-2-8A-3D-Printer-Parts-TMC2130-TMC5160-For.jpg>
- [14] StallGuard a coolstep, In: Trinamic.com [online] [cit. 2021-25-01] Dále na: <https://www.trinamic.com/technology/motor-control-technology/stallguard-and-coolstep/>
- [15] TMC 2209 Datasheet, In: Trinamic.com [online], [cit. 2021-25-01], Dále na: https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/ICs_Documents/TMC2209_Data_sheet_V103.pdf
- [16] Schoolboard, In: Jesper.cz [online], [cit. 2020-19-02], Dále na: <https://www.jesper.cz/navod/>
- [17] Obrázek rozloženého krokového motoru, In: eufactory.com [online], [cit. 2020-19-02], Dále na: https://shop.eufactory.com/blog/12_krokovy-motor-uvod
- [18] Obrázek ESP32 na desce Dev Kit-C, In: /www.soselectronic.cz [online], [cit 2020-19-02], Dále na: <https://www.soselectronic.cz/products/espressif/esp32-devkitc-ver-d-esp32-devkitc-32d-305403>
- [19] Průmyslové roboty [online] Střední průmyslová škola strojírenská a Jazyková škola s právem státní jazykové zkoušky Kolín [cit. 2020-08-02] 8 Dostupné z: https://www.sps-ko.cz/documents/ARO_prorok/Pr%C5%AFmyslov%C3%A9%20roboty.pdf
- [20] EMOS - OPTEL: elektronický modulární systém : telekomunikace a optická vlákna : komplexní stavebnicový soubor pro výuku přenosu informací po optických vláknech [odborná recenze: Maciej Kucharski, Jan Brouček] ; [překlad z angličtiny]. 3. vyd. [Praha]: Elcom Education, 1993. ISBN 80-900721-4-3.

[22] Výpis z odbchodního rejstříku, in: justice.cz [online], [cit. 2021-03-09], dále na: <https://or.justice.cz/ias/ui/rejstrik-firma.vysledky?subjektId=439178&typ=UPLNY>

[23] Stomisi, in: stomisi.cz [online], [cit. 2021-03-09], Dále na: <http://www.stomisi.cz/jak-se-ridi-krokovye-motory>

[24] ŠIMEK, Michal, Řízení krokových motorů, Brno 2011. Dále také na: <https://theses.cz/id/tk83b4/1172241> Obhájeno na fakultě přírodovědecké v Jihočeské univerzitě Českých Budějovicích.

[25] Obrázek řízení krokových motorů, In: gstatic.com [online], [cit. 2021-03-09], dále na: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQ8yaMrFNMX6xdx5BNZRpqg7BJXnovXQRwiA&usqp=CAU>

[26] Software EAGLE, in: autodesk.com, [online], [cit. 2021-03-09], dále na: <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview?plc=F360&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>

[27] Software KiCad, in: kicad.org, [online], [cit. 2021-03-09], dále na: <https://kicad.org>

[28] Software Fusion 360, in: autodesk.com, [online], [cit. 2021-03-09], dále na: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&support=null>

[29] Robotárna, Helceletova, in: helceletka.cz, [online], [cit. 2021-03-09], dále na: <https://helceletka.cz/robotarna/>

[30] JPCPCB, in: pcbway.com, [online], [cit. 2021-03-09], dále na: https://www.pcbway.com/?adwgc=666&campaignid=172480651&adgroupid=8787904531&feeditemid=&targetid=kwd-356912570358&loc_physical_ms=1003716&matchtype=p&network=g&device=c&devicemodel=&creative=347469560617&keyword=jlcpcb&placement=&target=&adposition=&gclid=EAlalQobChMIgOqFoaik7wIVgu3tCh3zewq1EAAYASAAEgKLAvD_BwE

[31] TMC2208 datasheet, In: trinamic.com [online]. [cit. 2020-04-04], dále na: https://www.trinamic.com/fileadmin/assets/Products/ICs_Documents/TMC220x_TMC2224_datasheet_Rev1.09.pdf

[32] Pražský robotický den, In: robotickyden.cz [online], [cit. 2020-04-05], dále na: <http://robotickyden.cz>

[33] NCE20P45Q datasheet, In: datasheetpdf.com [online], [cit. 2021-03-12], dále na: <https://datasheetpdf.com/pdf-file/1273275/NCEPowerSemiconductor/NCE20P45Q/1>

[34] NCE2301 datasheet, In: datasheetpdf.com [online], [cit. 2021-03-12], dále na: <https://datasheetpdf.com/pdf-file/919373/NCEPowerSemiconductor/NCE2301/1>

[35] Obrázek motoru. KOVALENKO, Iaroslav, Systém pro řízení pohybu angluárního robota, Liberec, 2013. Dále také na:

data:image/jpeg;base64,/9j/4AAQSkZJRgABAQAAQABAAD/2wCEAAkGBxMTEhU
TExMWFRUXGBoaGBcXGRodFRcgGBgXFxYXFhcYHSggGBsIHRUXITEhJSkrLi4u
Fx8zODMtNygtLisBCgoKDg0OFRAQGi0dHSUtLS0wLSsvKy4vKysrLS0tNS8tKy0tKy
03LTctLS0uLS0rKy0rKy0vLTETkystLSstLf/AABEIAKYBMAMBIgACEQEDEQH/xAAc
AAEAAQUBAQAAAAAAAAAAAAAAAAABwIDBAUGAQj/xABHEAABAwIBCAcCCwYFBQ
EAAAABAAIDBBEhBQYSMUFRYXEHEyKBkaGxMsEUI0JSYnKSotHh8CQzY4Ky8R
VDU3OTRLPC0tM0/8QAGAEBAQEBAQAAAAAAAAAAAAAAAAAEDAgt/xAAuEQEA
AQMBBQYGAwEAAAAAAAAAAQIDETESITJRYQQTQXGRoRQiYoHR4SNCsST/2g
AMAwEAAhEDEQA/AJxREQEREBERAXBdIOeU1LK2CBjlt0nSaAcBckNAF8DgSS
RbUu9UVdJh/bR/st/qepKws5PzxyIGdKVzZmgi7dBjbg7nADEX/JS003F1C7j8W7k30
CmWnN2tPAeiQSuliKolilCilAilglilCilAilglilCilAilglilCilAilgliokla3FxA5m3qgr
UU9KeFW074B5PkUhT5x0bPaqoG85WX8LqK+kzLtPPUMdBKyQNhcHFpuBYkgX7
ypOiwTb3xbj9Bp+6FMmTXXhjO9jf6QoVikvCTvgafJ34LfUnS5DFFHH8Hlc5jGtJLmBp
LWgEjEm1xuUglKqKHZ+lyWZwjZE2nvqeXB5PDFoA81q8r571rHW62Qi17g6l+6LLp
E7lvmR3SJXsfdkzjfYXOPvXb5s9ldc+PTlte9tF7LXA23ABxQTliwsj5TZURNIZqOsbW
ka2nks1AREQEREBERAREQEREBERAREQEREBERAREQEREGnzgy/HSgAjSe4
XawYYDWSdgvZRPnN0j1nWaDT1WNg1tsb6iDrPO/gt90yzPjpk3sFzoPB4gObf1UbT
5wn/T2bXAJw0VBmV2eFaR25JDfUC52P3lnRZxVLaQuMk1PIRe2mQSRuF72PHFc3

Jl6TY1o46yOVgFraqqe83e6/DYO5UbOXL9VJ7dTO6+wvyN+66vR5Jc/tSki+/F35Kxm
21vWaT+TL6r7e/8V0U0ZuorAjoadntY/Wd7hZanOB0bXtERZi030LbXrssTLtPL8lvoks
NtGwuOR43WtyuHsLdIWnjtF9msbO9CEkU3ap2WIH7Jc9zpR7lzsGUoNFodo3tbEA/
mtZFIV/VRAusOpLd2AlmWlp2PkADGlx+jj47uaGXbmigkA7lsdrSfdgqH0c0TdKKRzmj
YdYHvVObmTXxRkSEXcb6N/Z2WvvK3LJAy5cbbbcURzn+KSHVog7wDf1VD66U63n
wHqqMpU+g+49l/aHC+NvNWWIUSb0Q50CJ5pJT2ZHXY4nU8gCx4OsO8cVMa+Vm
PtiLg7P7qeOjbOsVkGhlfj4xZ19bxqD+ew8eaDsUREBERAREQEREBERAWNIGsbD
E+R2povbadwHEmw71krkM8agyyR0rMSSHP78GA+Z8Fjfu91RNxp5u7dG1Vhrc3qC
orZJJaqR/VHARse5rL7GgDWANZXfxsDQGgWAAAG4DAK1RUwjY1jdTRbnvPer66t
UzTTEVTmUrmJndoliLRylilCliAilgjXpljwpnf7o8Qw+5Q/Vw2KmpzjjHwaF20TAfaY8n+
kKIKtlxdRWp0FbkjWQlnHUCeQPuV4UMn+m7vFvVBhOfpRhgNnsJLeN7/isijy7OzB3
aHH8UmyXlfkHux9Fhua9psR3OGP4oOigyyx3tNsT+tyqlyfDNY/FcdO1/RaCOYbW48
FtKOtjGtjjylCqOspMI0jY2Atp7taRewJFyTh2eJVuKKNg0dNuGxjXH1ACw2ZcpWtwpp
C697mQW8AFiSZxgexTtH1nEoN+9rdE6ETnu3uwH2W4+a0OVW6H7wgH5qxqvOip
eCA/QadjAG+YxWleC43cSTxKgu1dUZSNwwCqpqV7/YaXW121DmdQVnRwwXRZ
Od1tLoxuLHtwdbfvPAqjXMyVJtdG3m8X8rrcZsxS08zZopYy5huQCSCNRaeBFwsD/B
3ggBodYCxc7xNha2PFXIM3nabZdN0Tmk36skhwvqJdq81BP8AkHLkdUwuYC1zfaa
7WL7cNY148FtFE+Yld+3RtBNnB4PGzHOse9oKlhUEREBERAREQERWK2sZEwve
bNH6AG8ncpMxEZk1Wcr5QbBE6R2zUNridTQtFmjQOc51VLi95Nu/WRw2DksaCKS
vl033bCw4Ddw4vO07PXsI2BoAAsALAbRlw289puRc/pTp1nn5cnoq/jp2fGdenRWilve
84ilglilCliAilg4/pUousoHO2xPY8c7mO3hIVCzSCMdSnzPmPSoKgfQv4EEeigWUYnj
46/O6kqzevBaQCAAdX9rrQ1fwjax5B3Yg9wWRM43Wtk6UhZR/bwVhGgpMI1R9jSZjr
Li3y1+S6iqoy+ENfi9rcXcQMTfct9JV7mMHJouF7HWvPtobjiCNdiDhZVEdxxE7CsqG
hkOpjj3Fd+K/EaLi223NF+Zuq/8Sk2OI5WHoorjocgVL/Zhef5SsluZ9ScHMDfrOA9Suld
VPOtxvxJ/FWjJfig0keZ7/ITRN/mufJZlZrIABdUjHY1pJ793eti5yocdSqLDc3qNoxf187b
ABVDJ1ly2hC7T+dpm/gAqirZOpBd+EOGo25e9eh5LXXOzb7lZarsXsutuxQZeYBtlC
Dm//tvU1KEcyDavG+sR4tcPepuUUREQEREBFhZWyrDTRmWeRsbBtO3g0a3HgMV
GWVc+6yueYMnRPY3UX2vKRvJ9mEc7nkuaqop1bWrFdZTTnOiQM4s6aWjbeeUB1
riMYyO5MGPeCFFeUs+aitl+lpnyWPZaA5wZxLYwbniSF0WbXRc0O62ud1ryblgJIJ/iP
Ju/9a1I1LSsjaGRsaxo1NaAGjuCxuWu+jFenL8vRTXYsT8vzzz0j7ltglzie0NjhZTtGoBs
Qt3SOefFVDJecmv4Sy+68X/yspWRaRbilxlX8Vyop9EVCfOWHWxk45QnyYWFEDp
Orac2rcnuaNrgHsHdpgtP2IKypc0EWluDsOpXYnwk+lonitx9tzkcjdJOT57Ay9S4/JmGi
Pt3LPNddHIHAFpBB1EG4PIhcvlro9oKi5Mlieflw9g8y0dk94XGVWZOUcnEy5PndKw
YmMYP74jdkndY7gmao13rFuxc4KtmeVWnql1FHmavSfDL8VVgU8oNi43ERO518Yj

wdhxUgseCAQQQcQRqPJdRVE6PPds125xVGFSIirMREQarOtl6KpH8F58Gk+5fPU
7/AF8jYHzt5r6CzwJ+A1Ojr6l/hom/ldfPzSDbcQfOwPmpKwxpVdoD2hs/WpWpDgLfr
Wsmhb2gUJdE4Lxp/X4quQ+NISDxXTIUfUfNUtVD52DAuHeRfDggugoFaFQz5w87e
K8dVM335XUyuF4IUIY5rGjY6/JY/wAPJP7sgbyW+52CZgxLPerUhAWM6qdw81YLjv
HgFNqF2ZZ7ZmnaCr0ThZ19xWme4g3tcC+Gw4cN2K9OU3AWDGj9eKuUxLp8xsm
Pmrly24bE4Pc7dbEDvlt47IM6ivoamLpakk/lj9XqRcqZZp6caU80cQ2abgCfqg4nuUyu
JmcQz0XAZS6W6CPCMSzH6LNFvjIWnwBWjPSNIGsJZQUWifnm7yONyGsaed1zN
yl6Kex3Z3zGI67ko5RyjFAwyTSNjaNrbw39yjXODpWLndTk+lyPcbCRzSbn+HGMXd
6xqPo0rat/W5RqiPog6b+Q+QzuBXf5EyBRUDbRMaxxGL3G8rubjieQw4Ln56ukNMd
ntatz009XDZE6PaqreKjKkzzfVHpdux2EjsxN+i3HiFJmTcmxQMEcMbY2DY0W7zvP
ErGmy0weyCfleePkqBXTp9hlhy95sF3FMQwu9orua6co0bdFzOUcq9T++ql4uDntDu
5rRc9y5fKGezAfijLKd93MZ4uxP2VrRarr4Yy8td6ijinCTI5dRdT1OVKjGJkjAdRFx9+U
2PcFdr838plt3vfJwEzz90FoPcte4xxVRHuy+J2uCmZ9o90jz1TGe29rfrOA9Vr5M5qM
a6mHue0+hKjzl+QGueRUaUXERx3/mLru8iutpsyaYi4lmeN4eAPuNCmzZjWqZ8o/Jt3
50piPOfwz354UQ/zvBjz6NXjc8KI/54HNrx6tVoZk0W2Jzuckn/ALKI+Y1EdUTHykk97lf
4Pq9k/wCn6fdhZeyBk3KWlkj662EsTm9bwDh8scCOVlw80WUshO0w7r6S9jr6vk5uJ
gcfndC+/Uu1rOjqF37uWRh+kA9voD5rV1OQMpwNLY39fERYsuHAg4EGKbCx3Arm
qxaq30V4nruei126/bjZuUbVPSc/t12aec0NfD1sVwQbPY4dphtex2EWOBGtbtQHE+q
oJXPg0qUH2oyx4iJGFy2QnyPKy7zNvpBYW/tReHfODLs8GAluG/iue5uRG+PRzPaL
U1TszjzSAiwpcr07WGR08QYNbi9uj43WRTVDJGhzHNe06i0gjxCzaMLOvt6SpH8G
X+hy+dYiDbxHfr8/VfTFRGHNC0i4lltvuLL5hpGmzQdY/sQVJWFmOa2BbpDVcax+Sz
KSria4EkjmFjPZicL4n11K3ZTLrDojlqKwwJ8fwwVPwkntAlt8bLRhv62rcUY7I5JMmyq
dITtJ7z6LxuGrzV3R5dy8vxBUVSOX67kAKaQXvcg8e3DWO+yx43NFh1pcd1228AFk
EYar8MFajL9WiGjnj4AIKyBuv4pbh+u9VELzXtQUSatSxJFISHBa6rqg3Wcd21EIIOGV
qmn0xTyOZ1gAdoWDiG3PtEEt1/JseKsUkDJSZZpHuJ12xcfrPcSVuejoQVFUI6ljtBw0
W2cQNL5lcRjY6sNpCmaHM6hbqpY/5hpf1XWnd2qo+fOemCO09otxs2tmi543oryPU
ZEpyDOZHvtpaJjdoi28gknyXVjpSol2aMQ0GNA/y32GIq7LW2811kmadC7XSQf8bR6
BUtzPoB/0kPe0EeBVot2KOGJ/33Y13O0V8UxPq4+q6RGOGDpLHY1mj5nFa45/0oc
5vUVUjgL6o2NPI6ZJ3dykhubVGNVLB/xt/BZUWTIW+zDG3kxo9AtJmz4RPqyim94z
Hp+0Z0GfFTOCaTJwYfkufpyuOGs6IFvHYsqPI2War/8ARUdU0/JBEYA3aMV3H+Yq
TQEV9FPDTH33k2Zq4qp+25wWRui+niA62R8p22s0HmcXHnddXk7INNB+6hY0/Ot
d32nXPmtki4qu11bpl3TZt074gREWbVj1VGyQWe0HjtHlrTvo30502Eubt3/AMw2jiug
RBi0NYJBuO0e8bwspaeuourPWR3A1lo2fSb7ws6grBIOPrxCDKREQUvYCLEXG46l
qJ81aN7w800ekDcEDRB+sG2DuRutyisTMJMROrUvzcpzpaLNDs1hji0HC3sg21Yall

5MycyBmhHpW0nO7Ti43cbnFxJtuGoDBZaKKL5oynTGGoljlxZI4eDj/dfS6hfpgyT1dU
2cDszNx+szsu8W6B8VJWHB1JAJVpr/ANbIRU0umdvcsZmRnH2Xn9d6mHWW2YM
L27/yWyoraI9DzKwaDNitOI0S0bXEjzIWybA+PsPADhr2g3x1jBSYIcvSqTyv4XXul3L3
S4+H5KA1eBVCMnYT43QQnd4/mqmVDuJtxWNC9hdg9zzxJI8hZZ7YHbgO/wDBe/
Bt59/4WVwZY3cvXcllClG8IUGIDimJTahjmlusL6zr3byVIQ5nRWL5ZSeAHv2WVlbbE
YHeFchFybm+CsQkyzc1mMbWU7WCzetZ5OBx4qc1BmbTf2ymt/rM9QVOaqCliAilgl
ilCliAilgliilC0NfSmF3WMwYT9gn/xK3ypkYHAgi4OBCC1R1le2417RuV9c3SSOglLX6
tXNt8HDfb8V0YN8Qg9REQEREBct0k5l+EUMIhd8Xxf5Qdld7S7vsupXjhcWOpB8vQ
WP65q80nYfFZ+ceSvgtXPDqDXHQ+q7tM+6QOYWvAQbynqX6Ng4gchj5LxwLtZ0re
WpUUR7A3/wBldBVBrBuHgrzJCL6JtfdgrSuNwRC/FeBVhNFB40KoNXII6DbigperTld
JVotQW3hXqRI78IRZZFJrPlorLzWH7bT/AO431U2qJ8xckvkqmSWOhGdJztI7HRHO
9ILCgliilCliAilgliilCliAilgliilMLK2TxMy2louBu11r6J5bRwWDm9M+MfBpyOtZ7Lr/vW3w
eL6jsl2WwW7Wtzhyd18D2Nwkserdexa7YQRiFMeI2SLAyEyZsEbag6UoFnHC5scCb
YXta6z1QREQEREEX9MeScYqpo/hv8ANzCfv+SjIBfSmUqCOeN0UrQ5jtYPiCCMQ
QdoXBZS6LGE3gnLdzZG37tJtvQoODoWdhXgxdXT5hVTOz8URvDzb+i/ksuHo/nPtS
RN5abvc1UcboYr0Rrvoej351Rf6sdvVxWdDmFTj2pJncC5oH3Wg+aCNhFuVJZZSzT
5oUbNUZPOSQ+RdZZcWQKVtrU0II29W2/ja6ghhjgTYEE7gbnwCy48nTuxbBM6+0R
SEelbZTXHE1vsgDkLKtBDsea9a61qZ/NxY3yc6/ks6DMatPyYmfWkN/uMKIREEcw9
HcxsX1Ebd+ixzvMuatrQdH8TDeSWR/AANaeet3muxRBZpaZkbQyNoa0agNSvliAilgl
ilCliAilgliilCliAilgliilCliAilgliilCliAilgliilCliAilgliilCliAilgliilCliAilgliilP/9k=