

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

Samuel Pícek

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Řídicí jednotka dopravníkového pásu výrobní linky SMEMA
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Samuel Pícek**
Osobní číslo: **I22025**
Studijní program: **B0714A150008 Automatizace**
Téma práce: **Řídicí jednotka dopravníkového pásu výrobní linky SHEMA**
Zadávající katedra: **Katedra automatizace a matematiky**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh řídicí jednotky dopravníkového pásu výrobní linky SHEMA. Jedná se o jednotku určenou k začlenění do stávající technologie, zaměřené na osazování desek plošných spojů elektronických přístrojů. Základem řídicí jednotky bude vybraný typ jednočipového mikropočítače, například s jádrem ARM, řady STM. Hlavní funkcí aplikace řídicího mikropočítače bude realizovat funkce kompletního řízení pohybu dopravníkového pásu, včetně základních bezpečnostních a dohledových funkcí vlastního zařízení a řízeného procesu. Hardwarové rozhraní konstrukce bude umožňovat její začlenění do stávajícího zařízení typu SHEMA, bez nutnosti jeho rozsáhlejší úpravy.

Teoretická část práce bude obsahovat podrobnou rešerši zadaného tématu. Výsledky této rešerše budou použity ke stanovení funkčních parametrů konstrukčního řešení jednotky. Navržená jednotka bude disponovat nejen obvyklými funkcemi pro tento typ zařízení, ale bude mít navrženy i nové, rozšiřující funkce.

V praktické části práce bude proveden konkrétní návrh hardware vlastní řídicí jednotky, sestaven firmware mikropočítače a provedeno její testování. Testování bude realizováno v laboratorních a reálných provozních podmínkách. Pro laboratorní testování jednotky bude navržen a realizován model řízeného technologického celku. Výsledky testování, společně s výrobními podklady jednotky, budou součástí kompletní elektronické dokumentace práce.

Rozsah pracovní zprávy: **50**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MAZIDI, Muhammad Ali; CHEN, Shujen a GHAEMI, Eshragh. *STM32 Arm programming for embedded systems: using C language with STM32 Nucleo*. [Velká Británie]: MicroDigital, 2014-2018. ISBN 978-0-997-92594-4.

ZÁHLAVA, V., Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4

MAIXNER, L. a kol., Mechatronika, Brno, Computer Press, 2006, ISBN 80-251-1299-3

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**
Katedra automatizace a matematiky

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Petr Doležel, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Libor Kupka, Ph.D. v.r.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 24. ledna 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem Řídicí jednotka dopravníkového pásu výrobní linky SMEMA jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 06. 05. 2025

Samuel Pícek

PODĚKOVÁNÍ

Zde bych rád poděkoval panu Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D. za vedení bakalářské práce a cenné rady. Stejně tak důležité poděkování si zaslouží pan Ing. Pavol Cabúk, Ph.D. ze společnosti AWOS s.r.o. za odbornou pomoc a zajištění mechanické části projektu.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem elektroniky k pásovému dopravníku pro desky plošných spojů. Práce je realizována v prostředí společnosti AWOS s.r.o. a je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zaměřuje na popis komunikačního protokolu SMEMA, využití mikrokontroleru jako stavového automatu a možnostmi řešení projektu. Praktická část se zaměřuje na realizaci projektu, implementaci komunikačního protokolu SMEMA, programování mikrokontroleru a výběr vhodných komponent.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikrokontroler, deska plošných spojů, dopravník

ANNOTATION

This bachelor's thesis focuses on the design of electronics for a conveyor belt for printed circuit boards. The work is carried out in the environment of the company AWOS s.r.o. and is divided into theoretical and practical parts. The theoretical part focuses on the description of the SMEMA communication protocol, the use of a microcontroller as a state machine, and the possible solutions for the project. The practical part focuses on the implementation of the project, the application of the SMEMA communication protocol, programming the microcontroller, and selecting suitable components.

KEYWORDS

Microcontroller, printed circuit board, conveyor

OBSAH

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK.....	10
SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK	11
ÚVOD.....	12
1 TEORETICKÁ ČÁST	13
1.1 Elektrické systémy dopravníků.....	13
1.1.1 Popis dopravníků	13
1.1.2 Typy dopravníků.....	14
1.1.3 Funkce a využití dopravníků.....	14
1.1.4 Komunikační protokoly v průmyslu	15
1.2 Komunikační protokol SMEMA	16
1.2.1 SMEMA Standardizace mechanického rozhraní	16
1.2.2 SMEMA Standardizace elektrického rozhraní	17
1.2.3 Blokové schéma komunikace SMEMA.....	17
1.2.4 Fyzické rozhraní SMEMA.....	18
1.3 Možnosti řídicího systému.....	20
1.3.1 Programovatelné logické automaty (PLC)	20
1.3.2 Mikrokontroler.....	21
1.3.3 Technické parametry řídicího mikrokontroleru	22
1.4 Stavový automat	23
1.4.1 Typy stavových automatů.....	23
1.4.2 Realizace konečného stavového automatu na jednočipových mikropočítačích	24
1.5 Řízení dopravníku.....	25
1.5.1 PWM modulace	25
1.5.2 H-můstek.....	25
1.5.3 Optické senzory	26
2 PRAKTICKÁ ČÁST	28
2.1 Návrh a realizace systému	28
2.1.1 Návrh systému	28
2.1.2 Realizace komunikačního protokolu SMEMA.....	29
2.1.3 Řízení motorů pomocí H-můstků	30
2.1.4 Připojení optických senzorů k mikrokontroleru	31

2.1.5 Napájecí systém	31
2.1.6 Řídicí obvod.....	32
2.2 Programová část.....	33
2.2.1 STM32Cube IDE	33
2.2.2 Konfigurace mikrokontroleru STM32H503CBT6	34
2.2.3 Klíčové části řídicího firmwaru	35
2.3 Mechanická konstrukce	38
2.3.1 Montážní box pro elektroniku.....	38
2.3.2 Mechanická konstrukce dopravníku	40
2.4 Obsluha zařízení	41
ZÁVĚR	42
SEZNAM PŘÍLOH.....	46

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1 Ukázka dopravníku pro DPS [1]	13
Obrázek 2 Blokové schéma komunikace SMEMA	17
Obrázek 3 Rozložení pinů konektoru SMEMA [4]	18
Obrázek 4 Rozložení pinů konektoru SMEMA[4]	18
Obrázek 5 Ukázka PLC [7].....	20
Obrázek 6 Mikrokontroler STM32 [10]	21
Obrázek 7 Vývojový diagram ukázkového kódu pro stavový automat.....	24
Obrázek 8 Schéma zapojení H-můstku [19]	26
Obrázek 9 Princip jednocestného senzoru [22]	26
Obrázek 10 Princip polarizovaného reflexního senzoru [22]	27
Obrázek 11 Princip difuzního senzoru [22]	27
Obrázek 12 Blokové schéma návrhu systému	28
Obrázek 13 Koncepční nákres pásového dopravníku	29
Obrázek 14 Schéma zapojení rozhraní SMEMA.....	29
Obrázek 15 Schéma zapojení H-můstku DRV8871	30
Obrázek 16 Schéma zapojení připojení senzoru k mikrokontroleru.....	31
Obrázek 17 Blokové schéma napájecího systému	31
Obrázek 18 Schéma zapojení Step-Down měniče TPS54231 [25]	32
Obrázek 19 Řídicí obvod dopravníku	33
Obrázek 20 Programátor ST-Link V3 Minie [27]	34
Obrázek 21 Vývojový diagram zdrojového kódu.....	36
Obrázek 22 Části podprogramu "case POSUN" ze zdrojového kódu	37
Obrázek 23 DPS řídicího obvodu Vrchní strana	38
Obrázek 24 DPS řídicího obvodu Spodní strana	38
Obrázek 25 Montážní box pro elektroniku – vnitřní část	39
Obrázek 26 Montážní box pro elektroniku – vnější část	39
Obrázek 27 Mechanická konstrukce dopravníku: přední pohled	40
Obrázek 28 Mechanická konstrukce dopravníku: zadní pohled	40
Obrázek 29 Návrh desky plošných spojů – Horní vrstva	47
Obrázek 30 Návrh desky plošných spojů – Spodní vrstva	48
Tabulka 1 Popis jednotlivých pinů SMEMA konektoru [4].....	19
Tabulka 2 Porovnání STM32 a ATMEGA328P [11][12]	22
Tabulka 3 Technické parametry dopravníku	41

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

SMEMA – Surface Mount Equipment Manufacturers Association

MCU – Microcontroller Unit

PWM – Pulse Width Modulation

FSM – Finite State Machine

SWD – Serial Wire Debug

DPS – Deska plošných spojů

PLC – Programmable Logic Controller

ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a zhotovením plnohodnotného řešení elektroniky pro dopravník na desky plošných spojů v prostředí společnosti AWOS s.r.o. Výsledkem by měl být plně automatizovaný dopravník, který bude vybaven průmyslovým komunikačním protokolem SMEMA. Dopravník by měl být řízen více rychlostmi, například pro příjem desky plošných spojů na dopravník, odevzdání z dopravníku, či transport po dopravníku. Realizované zařízení by dále mělo obsahovat bezpečnostní STOP tlačítko a spouštěcí tlačítko START. Zařízení by mělo být schopné nepřetržitého provozu.

Mezi hlavní cíle patří zajištění plné funkčnosti a bezpečnosti navrženého zařízení. Cílem je, aby zařízení bylo natolik efektivní a spolehlivé, aby se svou úrovní přiblížilo profesionálním řešením v průmyslu. Dalším cílem je rovněž minimalizovat riziko vzniku poruch, které by mohly způsobit nežádoucí prostoje ve výrobě, a zároveň zajistit, aby zařízení bylo dostatečně bezpečné jak pro převážené desky plošných spojů, tak i pro samotnou obsluhu dopravníku.

Teoretická část práce se bude zabývat popisem pásových dopravníků ve výrobě pro povrchovou montáž. Budou v ní popsány různé typy dopravníkových a komunikačních systémů v průmyslu. V teoretické části bude dále popsán komunikační protokol SMEMA a bude nabídnuto porovnání s jinými komunikačními systémy. Poslední část teoretické části se bude zabývat stavovým automatem, řešerší možných řešení, jako například pomocí PLC nebo jednočipových počítačů a řízením motorů.

V praktické části práce bude popsána realizace elektroniky pro daný dopravník a stručně popsán řídicí firmware. V praktické části budou dále popsány jednotlivé dílčí kroky, včetně mechanické konstrukce a stručného popisu pro obsluhu zařízení.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Elektrické systémy dopravníků

1.1.1 Popis dopravníků

Dopravníky pro DPS (desky plošných spojů) jsou důležitou součástí výrobních linek pro elektroniku. Jejich úkolem je přepravovat DPS mezi jednotlivými stanicemi procesu výroby, jako je osazování součástek, pájení, kontrola a testování. Dopravníky zajišťují plynulý a efektivní chod výrobní linky a minimalizují manuální manipulaci s DPS.

Dopravníky pro DPS jsou navrhovány s ohledem na různé faktory, jako je velikost a tvar desek, požadovaná rychlost přepravy, prostorové omezení výrobního prostředí a požadavky na bezpečnost. Moderní dopravníky využívají senzory pro detekci DPS, automatické nastavení rychlosti podle aktuální zátěže a možnosti integrace s řídicími systémy výrobní linky pro optimalizaci toku materiálu. Výběr správného typu dopravníku je klíčový pro dosažení efektivity a spolehlivosti v rámci výrobního procesu elektroniky.

Dopravníky mohou být také vybaveny speciálními funkcemi pro manipulaci s DPS, jako je otáčení, naklápění nebo přenášení mezi různými úrovněmi výrobní linky. Tato funkčnost umožňuje optimalizovat procesy manipulace s deskami plošných spojů a minimalizovat časové zpoždění mezi jednotlivými stanicemi. Navíc mohou být dopravníky vybaveny systémy pro sledování a správu stavu DPS, což umožňuje operátorům v reálném čase monitorovat průběh výrobního procesu.



Obrázek 1 Ukázka dopravníku pro DPS [1]

1.1.2 Typy dopravníků

Existuje mnoho typů dopravníků na DPS, které mohou být různé svou konstrukcí, principem fungování a způsobem přepravy DPS. Jednotlivé dílčí prvky mohou být vytvořeny z různých materiálů, jako je guma, plast nebo kov. Mezi nejběžnější typy dopravníků se řadí:

- Pásové dopravníky: Mezi jejich výhody spadá vysoká kapacita, univerzálnost, efektivita, snadná instalace a nízké náklady. Jsou ale náchylné k prokluzu pásu
- Válečkové dopravníky: Pro pohyb materiálu po dopravníku se využívá mnoho jednotlivých válečků. Používají se spíše pro DPS větších rozměrů a může být složitější kontrolovat jejich rychlost [2]
- Speciální dopravníky: Existuje mnoho dopravníků, které jsou navrženy pro specifické úkoly v procesu výroby DPS (např. otáčení, nakládění, testování). Mezi jejich výhody spadá řešení specifických úkolů a optimalizace pro daný proces. Jejich nevýhodou jsou vysoké náklady, nízká univerzálnost a složitější údržba [2]

1.1.3 Funkce a využití dopravníků

Dopravníkové systémy jsou jedním z klíčových prvků efektivního materiálového toku. Dopravníky se staly nenahraditelným prvkem v průmyslových procesech díky své schopnosti přesného, spolehlivého a efektivního přepravování materiálu z jednoho místa na druhé. Díky této schopnosti se staly nepostradatelným nástrojem v průmyslových procesech, kde přispívají k optimalizaci výrobních postupů a zvyšování celkové produktivity.

Mezi hlavní funkce dopravníků patří:

- Přeprava materiálu: Hlavní funkcí dopravníků je přesun materiálu z jednoho bodu na druhý v rámci výrobního procesu. Bez ohledu na formu materiálu (pevný, sypký, tekutý) dokážou dopravníky zajišťovat jeho plynulý tok na potřebnou vzdálenost [2]
- Manipulace s materiálem: Dopravníky mohou také provádět různé manipulace s materiálem, jako je otáčení, nakládění nebo třídění. To umožňuje úpravu materiálu podle požadavků daného výrobního procesu [2]
- Synchronizace pracovních postupů: Dopravníky se často využívají k synchronizaci různých pracovních postupů v rámci výrobní linky. Například přesně regulovaný pohyb materiálu umožňuje koordinovanou činnost různých robotických zařízení nebo strojů [2]

Využití dopravníků je rozmanité a zahrnuje mnoho průmyslových odvětví, jako jsou automobilový průmysl, potravinářský průmysl, elektronika, farmacie a další. Dopravníky jsou klíčovým prvkem v montážních linkách, skladech, distribučních centrech a všude tam, kde je potřeba efektivní manipulace s materiálem. Jejich využití přispívá k zefektivnění výrobních procesů, minimalizaci ztrát a zvýšení celkového výkonu průmyslových operací.

1.1.4 Komunikační protokoly v průmyslu

Komunikační protokoly v průmyslu jsou standardizované sady pravidel a postupů, které určují způsob, jakým zařízení a systémy v průmyslovém prostředí komunikují a výměnu dat mezi sebou. Komunikační protokoly se používají k propojení a integraci různých zařízení a systémů v průmyslovém prostředí a umožňují efektivní řízení a monitorování průmyslových procesů. Každý protokol má své vlastní charakteristiky, využití a je vybrán v závislosti na konkrétních požadavcích a potřebách aplikace. Častým požadavkem průmyslových komunikačních protokolů je schopnost pracovat v reálném čase s minimální latencí a vysokou spolehlivostí. Důležitým aspektem je také kybernetická bezpečnost komunikačních protokolů. V moderních provozech se čím dál více dbá na ochranu proti neoprávněnému přístupu a manipulaci s daty, proto bývají nové verze protokolů vybaveny šifrováním a dalšími bezpečnostními mechanismy. [3]

Průmyslové komunikační systémy lze rozdělit dle typu řízení a typu systému do tří vrstev:

- Vrstva senzorů a akčních členů – Poskytuje jednoduchou a ekonomickou technologii, kde jsou data a napájení přenášena na společném přenosovém médiu. Data jsou při komunikaci přenášena binárními signály. Jako příklad této vrstvy může být AS-Interface nebo Interbus [3]
- Vrstva sběrnicevých zařízení – Používá se pro komunikaci na úrovni programovatelných automatů. Uplatňují se k propojení vstupních a výstupních zařízení a ovládacích zařízení v reálném čase. Používají delší datové rámce umožňující konfiguraci akčních členů a senzorů. Do této vrstvy lze zařadit průmyslové sběrnice, jako jsou DeviceNET nebo CANBus [3]
- Vrstva průmyslových komunikačních systémů – Stojí nejvýše v hierarchii průmyslových sítí. Umožňují provádět událostmi řízené služby a objektově orientovanými přenosy dat a proměnných. Tato vrstva může být reprezentována sítěmi Profibus nebo WorldFIP [3]

1.2 Komunikační protokol SMEMA

Daný pásový dopravník bude komunikovat s předchozím a následujícím připojeným zařízením komunikovat pomocí protokolu SMEMA. SMEMA neboli Surface Mount Equipment Manufacturers Association, je standardizované průmyslové komunikační rozhraní, které zajišťuje kompatibilitu a propojitelnost různých strojů a zařízení používaných v montážních linkách pro povrchovou montáž. Jeden ze standardů rozhraní SMEMA se týká komunikačního zapojení mezi stroji pro povrchovou montáž. Takovými stroji pro povrchovou montáž jsou například pájecí stroje, automatizované inspekční systémy nebo dávkovací systémy pro pájecí pastu. Těmito stroji, včetně dopravníků mezi nimi, to umožňuje komunikovat o tom, zda jsou obsazeny nebo čekají na desku s plošnými spoji, což pomáhá optimalizovat proces výroby a minimalizovat časové zpoždění. Komunikace probíhá pouze sekvenčně, protože nedochází k adresování. Místo toho jsou jednotlivá zařízení navzájem propojena díky předřazenému nebo následnému konektoru.

Aktuální verzi normy je IPC/SMEMA 9851-2007, která byla zveřejněna v únoru 2007 a nahradila verzi Interface Standard 1. 2. V dubnu 2017 byl vydán protokol Hermes jako aktualizace protokolu SMEMA, ale mnoho strojů podporuje oba tyto protokoly. [6] Standard Hermes, s označením IPC-HERMES-9852, je moderní “machine-to-machine“ komunikační protokol přizpůsobený pro výrobní linky desek plošných spojů. [4]

Oproti protokolu SMEMA, který využívá jednoduchou komunikaci pomocí reléových signálů, aby zařízení informovala o stavu, jako například připravení k odběru DPS nebo odeslání DPS bez dalších informací o dané desce, protokol Hermes používá moderní síťovou komunikaci přes TCP/IP, což umožňuje zařízení na lince komunikovat přímo přes Ethernet. To umožňuje přenos detailnějších informací o každé DPS. Například informace o velikosti a ID desky nebo trasování přes různá zařízení ve výrobní lince. [5]

1.2.1 SMEMA Standardizace mechanického rozhraní

Tato norma je určena pro mechanické rozhraní. Tato specifikace poskytuje minimální požadavky, které musí dané zařízení splňovat, ale nepředstavuje úplnou specifikaci rozhraní zařízení. Shody s normou lze dosáhnout vhodnou konstrukcí zařízení nebo poskytnutím speciálních adaptérů, které umožní, aby zařízení splňovalo normu.

Následující mechanické specifikace jsou určeny pro přenosové systémy s jednou deskou a dopravníkem. Výrobce zařízení musí jasně uvést směr pohybu desky: [4]

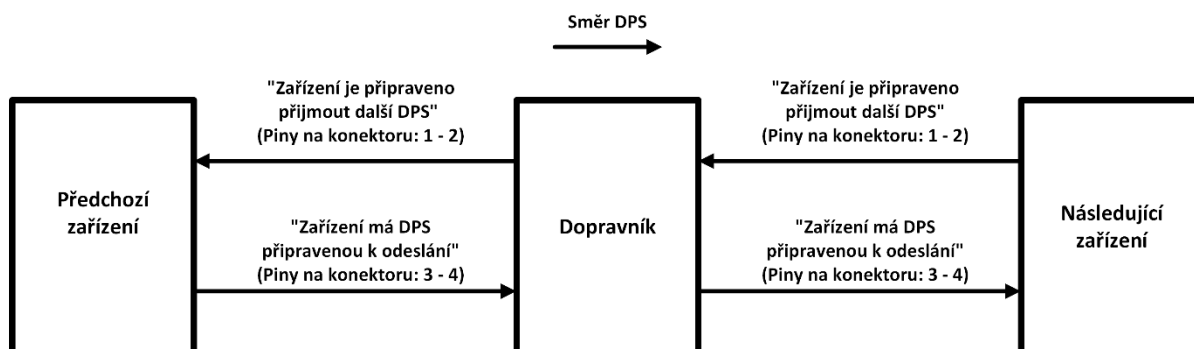
- Výška dopravníku – zařízení musí mít nastavitelnou výšku dopravníku v rozmezí 940 mm až 965 mm od podlahy po spodní část desky plošných spojů [4]
- Šířka dopravníku – u zařízení s nastavitelnou šířkou dopravníku je přední lišta pevná a zadní lišta nastavitelná. Rozsah nastavení se liší podle výrobce zařízení [4]
- Maximální mezera – maximální nepodepřená mezera mezi 2 různými pásy je 19 mm [4]

1.2.2 SMEMA Standardizace elektrického rozhraní

Tato norma je určena pro elektrické rozhraní. Pro zajištění správného řazení desek plošných spojů je nutné elektrické rozhraní mezi jednotlivými stroji. Každé zařízení komunikuje s předchozím a následujícím zařízením v dané výrobní lince pomocí propojovacího konektoru SMEMA.

- Napájení – každé zařízení by mělo být vybaveno samostatným napájením a uzemněním. Zařízení by měla také mít k dispozici samostatné vypínače [4]
- Uzemnění – každé zařízení by mělo mít na každé straně přípojný bod pro ochranné pospojování [4]
- Komunikace – pro správný přenos desek plošných spojů mezi stroji musí být přenášén signál o tom, jestli je deska plošných spojů k dispozici nebo ne [4]
- Konektory – všechny konektory rozhraní SMEMA na stroji musí být samice [4]

1.2.3 Blokové schéma komunikace SMEMA



Obrázek 2 Blokové schéma komunikace SMEMA

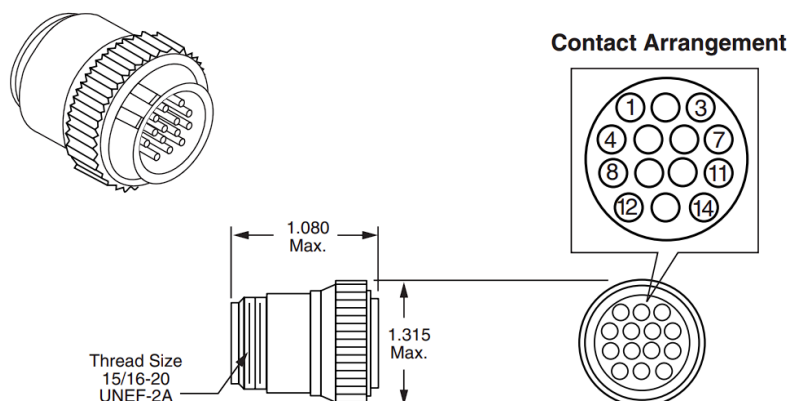
Na Obrázku 2 je znázorněno, jak probíhá komunikace mezi předchozím a následujícím zařízením a dopravním systémem prostřednictvím konektoru SMEMA. Dopravní systém elektricky sepne piny 1 a 2 na SMEMA konektoru, čímž informuje předchozí stroj o tom, že je volný a že je připraven převzít desku plošných spojů. Předchozí stroj elektricky sepne piny 3 a 4 na SMEMA konektoru, aby informoval dopravník, že je deska plošných spojů připravena k odběru na dopravník. [4]

Komunikace mezi následujícím zařízením a dopravním systémem probíhá tak, že následující stroj opět elektricky sepne piny 1 a 2, aby informoval dopravní systém, že je následující stroj je volný a je připraven převzít desku plošných spojů. Dopravník elektricky sepne piny 3 a 4, aby informoval následující stroj, že deska plošných spojů je připravena k odběru z dopravníku. [4]

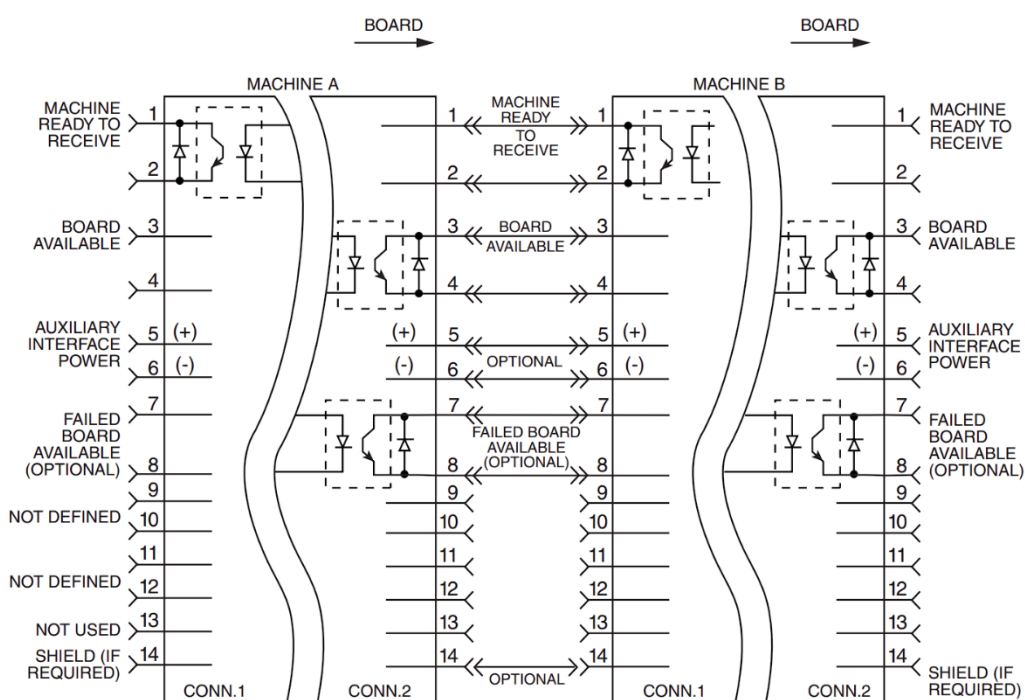
K účelu elektrickému spínání kontaktů, izolace a galvanického oddělení mohou být zvoleny relé nebo optočleny. V této práci budou využity optočleny, z důvodu větší rychlosti spínání a absence mechanické části, jako relé, což znamená menší opotřebení a nižší pravděpodobnost poruch.

1.2.4 Fyzické rozhraní SMEMA

Dle normy IPC-SMEMA-9851 musí každý stroj obsahovat navazující/výstupní kabel a párovací konektory. Barevné značení vodičů musí odpovídat zavedeným normám specifickým pro zemi výroby nebo jak je jinak definováno v zadávací dokumentaci. Logika signálu SMEMA rozhraní je realizována pomocí optočlenů nebo spínacích relé. Minimální požadavky jsou na spínání 30 V stejnosměrného napětí a 10 mA. Při 10 mA je výstup v logické nule a signál nesmí překročit 0,8 V stejnosměrného napětí. Na Obrázku 3 a Obrázku 4 lze vidět rozložení pinů konektoru SMEMA a v Tabulce 1 jsou popsány funkce jednotlivých pinů konektoru. [4]



Obrázek 3 Rozložení pinů konektoru SMEMA [4]



IPC-9851-4-1

Obrázek 4 Rozložení pinů konektoru SMEMA [4]

Tabulka 1 Popis jednotlivých pinů SMEMA konektoru [4]

Piny konektoru/kabelu	Funkce signálu	Stav	Popis
1, 2	Stroj je připraven k příjmu	Piny spojeny	Stroj je připraven přijmout další desku.
3,4	Deska k dispozici	Piny spojeny	Stroj má OK desku připravenou k odeslání. Všechny DPS jsou považovány za OK, pokud není použita varianta "Fail"
5, 6	Pomocné napájení rozhraní (volitelné)		K dispozici; Uživatel uvede do dokumentace účel a provozní parametry
7, 8	Špatná deska k dispozici (volitelné)	Piny spojeny	Výchozím nastavením (když piny nejsou spojeny) je, že přicházející deska je OK. Volitelným použitím je zkratování těchto pinů, jestliže by deska nebyla OK nebo byla odebrána
9, 10	Nedefinováno		K dispozici; Uživatel uvede do dokumentace účel a provozní parametry
11, 12	Nedefinováno		K dispozici; Uživatel uvede do dokumentace účel a provozní parametry
13	Nepoužívá se		Nepoužívá se
14	Stínění (volitelné)		Případné stínění kabelu; připojuje se pouze jeden konec

1.3 Možnosti řídicího systému

Hlavní součástí dopravníku bude řídicí systém. Jeho úkolem je řídit a koordinovat pohyb dopravníku (stroje) a jeho funkci. V případě dopravníků zajišťují řídicí systémy spouštění a zastavování dopravníku v závislosti na požadavcích výrobní linky. Reguluji rychlost a určují přesnou polohu materiálu, aby odpovídala požadovanému taktu výroby. Řídicí systémy dopravníků dále komunikují s ostatními systémy ve výrobní lince, jako jsou například systémy osazování součástek, pájení a kontroly. Monitorují provoz dopravníku a v případě poruchy signalizují alarm. Kromě řízení základních pohybů dopravníku řídicí systém komunikuje s ostatními zařízeními výrobní linky, jako jsou osazovací automaty, pájecí stanice, kamerové inspekční systémy nebo případně robotická ramena. Tato integrace umožňuje plně automatizovaný a bezchybný průběh výroby.

1.3.1 Programovatelné logické automaty (PLC)

PLC (Programmable Logic Controller) je speciální typ počítače používaný pro řízení automatizovaných procesů v průmyslovém prostředí, využívající programovatelnou paměť pro uložení instrukcí pro provádění specifických funkcí za účelem řízení strojů či procesů, a to prostřednictvím digitálních nebo analogových vstupů a výstupů. PLC, znázorněný na Obrázku 5, se třídí podle velikosti, výkonu, provedení a počtu vstupů a výstupů. Mezi známé výrobce se řadí Siemens, Allen Bradley, Schneider Electric, Omron nebo český Teco. PLC je navržen tak, aby byl spolehlivý, odolný v průmyslovém prostředí a snadno programovatelný pomocí speciálního softwaru. Existují různé druhy programovacích jazyků pro PLC. Dělí se na textové a grafické. Mezi textové programovací jazyky patří jazyk seznamu instrukcí (Instruction List – IL) a jazyk strukturovaného textu (Structured Text – ST). Mezi grafické se řadí jazyk příčkového diagramu (Ladder Diagram – LD) a funkční blokový diagram (Function Block Diagram – FBD). Tyto jazyky umožňují inženýrům vytvářet sofistikované řídicí algoritmy a logiku pro automatizované procesy v průmyslovém prostředí. Po vytvoření programu je nahrán do paměti PLC, kde je spuštěn a prováděn podle definovaných podmínek a instrukcí. [7]

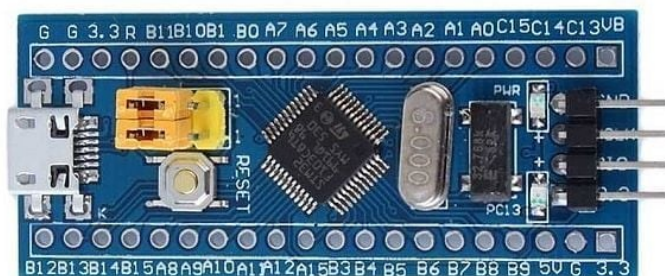


Obrázek 5 Ukázka PLC [7]

1.3.2 Mikrokontroler

Mikrokontroler je integrovaný obvod, který obsahuje centrální procesor, paměť a periferní zařízení, které umožňují vykonávat řídicí a výpočetní úkoly v elektronických systémech. Tento kompaktní čip je navržen pro integraci do zařízení nebo systémů a poskytuje základní počítačové funkce, jako jsou vstupy a výstupy, komunikační rozhraní, časování a další. Existují dvě základní architektury mikrokontrolerů: Von Neumannova architektura a Harvardská. Jsou rozdílné v tom, že Von Neumannova architektura používá jednu paměť pro instrukce a data. Používá se v osobních počítačích či serverech. Zatímco Harvardská architektura má oddělené paměti pro instrukce a data a využívá se právě v mikrokontrolerech. Mikrokontrolery obsahují nejen procesor a paměť, ale také širokou škálu periférií, jako například analogově-digitální převodníky, časovače pro PWM modulaci, komunikační rozhraní nebo vstupně-výstupní piny. Moderní mikrokontrolery se vyznačují nejen kompaktním provedením, ale také vysokou výpočetní kapacitou a širokou škálou integrovaných periférií, které umožňují řešit složité úlohy v reálném čase. Dalším trendem v oblasti mikrokontrolerů je podpora nízké spotřeby energie, která je zásadní zejména pro zařízení napájená baterií nebo pracující v režimu spánku. [8]

Na trhu se nabízí hned několik možností, které se odlišují použitou architekturou a dostupností. Mezi nejrozšířenější a nejdostupnější se řadí mikroprocesory s architekturou AVR, což je označení pro rodinu 8bitových mikročipů typu RISC od firmy Atmel (nyní součást Microchip Technology). Dále se nabízí k volbě mikrokontroler STM32, který je řada 32bitových mikrokontrolerů vyvinutých společností STMicroelectronics a je znázorněn na Obrázku 6. Mikrokontrolery STM32 jsou založeny na architektuře ARM Cortex-M, která je populární díky své výkonové efektivitě a všestrannosti. Výhodou mikrokontrolerů STM32 je nejen jejich vysoký výkon a bohatá výbava periférií, ale také dostupnost profesionálních vývojových nástrojů, jako například STM32CubeIDE pro psaní a ladění kódu. [9]



Obrázek 6 Mikrokontroler STM32 [10]

1.3.3 Technické parametry řídicího mikrokontroleru

Řídicí mikrokontroler by měl disponovat dostatečným počtem vstupně/výstupních pinů pro čtení dat z optických senzorů, časovačů PWM pro ovládání motorů, analogově-digitálních převodníků pro uživatelské nastavení rychlosti motorů, komunikaci SMEMA a případně výstupy pro světelnou signalizaci stavů předmětného dopravníku.

Pro účely testování a vývoje této aplikace byla na počátku využita vývojová deska Arduino Nano s mikrokontrolerem ATmega328P. Ve finální verzi byl však vybrán mikrokontroler STM32H503CBT6 od společnosti STMicroelectronics. Mikrokontroler z řady STM32 byl zvolen především díky svému širšímu využití v průmyslových aplikacích, které nabízí vyšší výkon a flexibilitu oproti platformám Arduino.

Tabulka 2 Porovnání STM32 a ATMEGA328P [11][12]

Funkce/Parametr	STM32H503CBT6	ATMEGA328PB-AU
Architektura	ARM Cortex-M33	AVR 8-bit RISC
Maximální frekvence	250 MHz	20 MHz
Provozní napětí	1,71 - 3,6 V	2,7 - 5,5 V
Velikost flash paměti	128 kB	32 kB
Digitální I/O	35	23
Velikost RAM paměti	32 kB	2 kB
Rozlišení AD převodníků	12-bit, (16 kanálů)	10-bit, (6 kanálů)
Rozlišení PWM časovačů	16-bit	8-bit
Pouzdro	LQFP-48	TQFP-32
Cena	85 Kč	38 Kč

V Tabulce 2 lze vidět porovnání mikrokontrolerů ATMEGA328P a STM32. Mikrokontroler ATMEGA328PB-AU by pro řízení předmětného dopravníku postačil. Oproti tomu mikrokontroler STM32H503CBT6 nabízí výrazně vyšší výkon, flexibilitu, lepší podporu periférií a rozhraní, což umožňuje snadnou rozšiřitelnost a možnost implementace složitějších funkcí v budoucnosti. Významnějším rozdílem je také větší paměťová kapacita, a to jak RAM, tak i flash, což umožňuje implementaci rozsáhlejších a složitějších programů.

1.4 Stavový automat

Vybraný pásový dopravník v této bakalářské práci bude přecházet mezi různými stavy na základě určitých vstupů a cílem je, aby fungoval samočinně. Díky tomu lze na něj nahlížet jako na stavový automat.

Stavový (konečný) automat je abstraktní model používaný pro návrh systémů, které mohou být v jednom z několika předem definovaných stavů. Jedná se o model chování, nikoliv model struktury. Stavový automat přechází mezi těmito stavy na základě vstupních podmínek nebo událostí. [13]

Konečný automat je uspořádaná šestice: $M = \langle X, S, Z, \omega, \delta, S_0 \rangle$, kde X je konečná množina vstupních vektorů, S je konečná množina všech vnitřních stavů, Z je konečná množina všech výstupních vektorů, ω je výstupní funkce, δ je přechodová funkce (funkce následného stavu) a S_0 je počáteční stav. Přechodová funkce přiřazuje ke každé dvojici současného vstupu a stavu následný vnitřní stav. [13]

Výstupní funkci lze definovat dvojím způsobem:

1. Současný výstupní vektor je funkcí dvojice současného vstupu a stavu – automat Mealy [13]
2. Současný výstupní vektor je pouze funkcí současného stavu – automat Moore [13]

1.4.1 Typy stavových automatů

Existují různé typy stavových automatů. Dělí se na základní deterministický či nedeterministický, ale také automat Mealy a Moore. [13]

Deterministický automat je konečný automat, který se vyznačuje jasně definovaným a předvídatelným chováním. V tomto systému je pro každý stav a každou možnou kombinaci vstupních hodnot určen pouze jeden možný přechod do dalšího stavu a odpovídající výstupy. To znamená, že pro každý možný stav a vstup existuje pouze jeden přechod, což činí chování automatu plně deterministickým. Pokud tedy znám aktuální stav a vstup, lze určit do jakého stavu se automat přenesení a jaké výstupy budou generovány. Pásový dopravník využitý v této práci je právě tento typ automatu. [14]

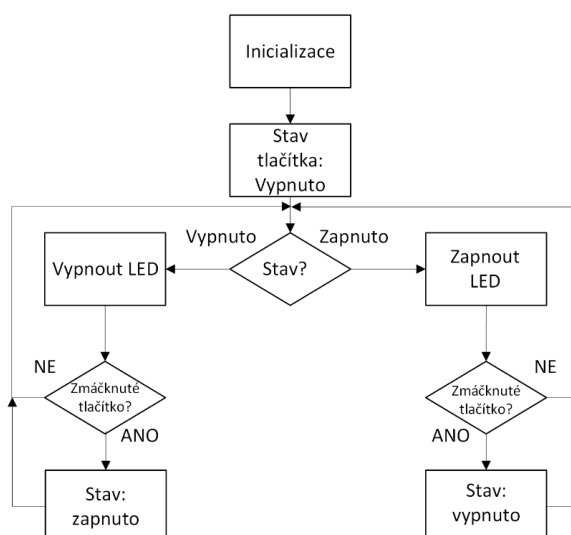
Nedeterministický automat je automat, kde může existovat více možných přechodů nebo akcí pro stejný stav a vstupní kombinaci. Na rozdíl od deterministického automatu, kde je přechod jednoznačně definován pro každý stav a vstup, nedeterministický automat umožňuje více přechodů z téhož stavu při stejném vstupu. To znamená, že chování automatu může být méně předvídatelné, protože pro stejný vstup může automat přejít do různých stavů v závislosti na pravidlech, která jsou aplikována. [15]

Mealy automat je typ automatu, kde výstupy závisí jak na aktuálním stavu, ale i na aktuálních vstupních hodnotách. Výstup tedy závisí na kombinaci aktuálního stavu a vstupů. Výstupy se mohou měnit mezi stavy na základě vstupů. [16]

Moore automat je typ automatu, kde výstupy závisí pouze na aktuálním stavu, nikoli na vstupních hodnotách. To znamená, že výstupy jsou určeny pouze tím, v jakém stavu se automat nachází, a zůstávají konstantní, dokud se automat nepřepne do jiného stavu. [16]

1.4.2 Realizace konečného stavového automatu na jednočipových mikropočítačích

Konečný stavový automat na jednočipových mikropočítačích představuje základní a velmi efektivní koncept v oblasti automatického řízení, který nachází široké uplatnění v různých aplikacích, jako například nápojový automat, řídicí systémy semaforů nebo průmyslové automatizační systémy. V oblasti vývoje počítačových systémů, které jsou určeny k vykonávání specifických funkcí, je jedním z klíčových problémů efektivní řízení různých stavů, které může systém během svého běhu vykonat. Konečný stavový automat lze na jednočipových mikropočítačích implementovat různými způsoby. První a nejjednodušší způsob je využití struktury podmíněného příkazu if-else. Tento způsob však může být nevhodný pro složitější aplikace, kde počet stavů a přechodů mezi nimi roste. Jakmile se počet stavů zvýší, struktura “if-else“ může způsobit nečitelnost kódu, což ztěžuje jeho údržbu a ladění. Naopak použití výčtového typu “enum“ pro reprezentaci stavů umožňuje definovat stavy pomocí srozumitelných a dobře čitelných názvů, čímž zvyšuje čitelnost a přehlednost kódu. Výčtový typ “enum“ v kombinaci se strukturou “switch“ činí programování více strukturovaným a modulárním, což je zásadní při práci na větších a složitějších projektech. [17]



Obrázek 7 Vývojový diagram ukázkového kódu pro stavový automat

```
enum Stav { VYPNUTO, ZAPNUTO }; // Definování stavů

Stav stav = VYPNUTO; // Začínáme ve stavu VYPNUTO
void setup()
{
    pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT); // Nastavení vestavěné LED diody jako výstup
    pinMode(2, INPUT); // Nastavení pinu 2 jako vstup pro tlačítko
}
void loop()
{
    int stavTlačítka = digitalRead(2); // Čtení stavu tlačítka na pinu 2

    switch (stav)
    {
        // Přepínání podle aktuálního stavu
        case VYPNUTO: // Pokud je stav VYPNUTO
            digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // Vypneme LED diodu
            if (stavTlačítka == HIGH)
            { // Pokud je tlačítko stisknuto
                stav = ZAPNUTO; // Změníme stav na ZAPNUTO
            }
        }
    }
}
```



```

    }
    break;
case ZAPNUTO: // Pokud je stav ZAPNUTO
    digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // Zapneme LED diodu
    if (stavTlačítka == HIGH)
    { // Pokud je tlačítko stisknuto
        stav = VYPNUTO; // Změníme stav na VYPNUTO
    }
    break;
}
}
}

```

Výše je uveden jednoduchý příklad kódu pro implementaci konečného stavového automatu na platformě Arduino Uno, který slouží k ovládání LED diody pomocí tlačítka. Kód využívá výčtový typ “enum” pro definici stavů a strukturu “switch” pro přepínání mezi nimi. Na Obrázku 7 je znázorněný vývojový diagram ukázkového kódu pro stavový automat.

1.5 Řízení dopravníku

1.5.1 PWM modulace

Pulzně šířková modulace neboli Pulse Width Modulation (PWM) je diskrétní typ modulace, která generuje pulzy s proměnlivou šířkou, čímž reprezentuje amplitudu analogového vstupního signálu. PWM je způsob ovlivňování dvouhodnotového periodického signálu pomocí analogového vstupního signálu. PWM signál je dvouhodnotová veličina, která může být použita například pro elektrické napětí nebo elektrický proud. Mezi hlavní vlastnosti tohoto signálu se řadí konstantní perioda a střída, což je poměr času, kdy je signál aktivní, vůči signálu, který není aktivní. Rovnice střidy PWM signálu: [18]

$$D [\%] = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} * 100$$

Rovnice 1 Střída PWM signálu [18]

kde T_{ON} je délka pulzu (čas, kdy je signál aktivní) a $T_{ON} + T_{OFF}$ je celková délka periody. Další věcí k popisu PWM signálu může být střední hodnota: [18]

$$U_{AV} [V] = \frac{1}{T} \int_0^T T_{ON} dt$$

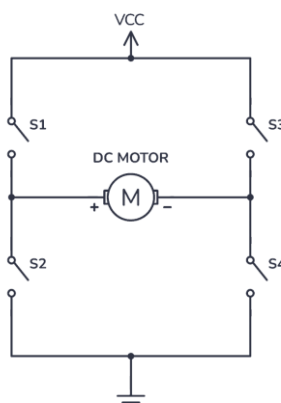
Rovnice 2 Střední hodnota PWM signálu [18]

1.5.2 H-můstek

H-můstek je elektronický obvod využívaný k řízení směru a rychlosti stejnosměrného motoru. Skládá se ze čtyř spínačů (obvykle tranzistorů nebo relé) uspořádaných do tvaru písmene „H“, což umožňuje motoru otáčet se v obou směrech. Přepínáním spínačů v H-můstku se mění směr proudu procházejícího motorem, čímž dochází ke změně polarit napájení motoru, tedy i ke změně směru jeho otáčení. [19]

Řízení motorů dopravníku pomocí H-můstků bude klíčovou součástí této automatizační aplikace. V kontextu dopravníků a dalších automatizovaných systémů je správné řízení motorů zásadní pro zajištění plynulého a přesného pohybu. Ovládání motorů bude v rámci daného dopravníku realizováno pouze v dopředném směru, přičemž zpětné řízení bude připraveno pro

případnou implementaci v budoucnu. Na Obrázku 8 je zobrazeno schéma zapojení H-můstku. [19]



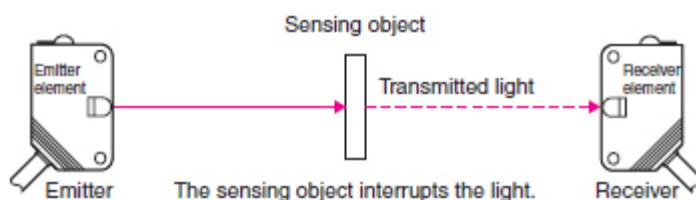
Obrázek 8 Schéma zapojení H-můstku [19]

1.5.3 Optické senzory

Optické fotoelektrické senzory budou klíčovou součástí pásového dopravníku, jejichž hlavním úkolem bude detekce desek plošných spojů. Fotoelektrické senzory jsou senzory, které detekují objekty nebo změny povrchových podmínek pomocí různých optických vlastností. Fotoelektrický senzor se skládá především z emitoru, který vysílá světlo a přijímače, který toto světlo přijímá. Když je vysílané světlo přerušeno nebo odraženo detekovaným objektem, změní se množství světla, které dopadne na přijímač. Přijímač tuto změnu detekuje a převádí ji na elektrický výstup. Světelný zdroj pro většinu fotoelektrických senzorů je infračervené nebo viditelné světlo. [21]

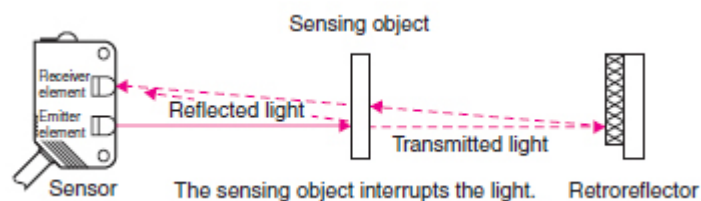
Existují 3 základní typy fotoelektrických optických senzorů:

1. Jednocestné senzory se skládají z vysílače a přijímače umístěných naproti sobě, přičemž k detekci objektu dochází při přerušení světelného paprsku mezi těmito dvěma prvky. Výsledek měření není výrazně ovlivněn leskem, barvou ani sklonem snímaného objektu, což zajišťuje jejich výrazně vyšší spolehlivost ve srovnání s difuzními senzory, které závisí na odrazu světla od cíle. Tyto senzory se vyznačují velkou spínací vzdáleností a rovnoměrným účinným paprskem v celém rozsahu snímání. Vzhledem k vysoké výkonové rezervě však nejsou schopny detekovat průhledné nebo poloprůhledné objekty. [22]



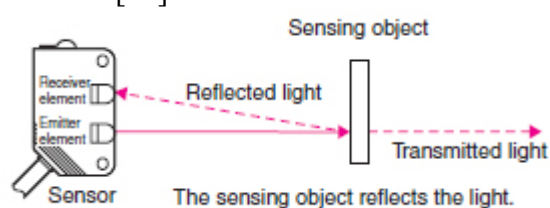
Obrázek 9 Princip jednocestného senzoru [22]

2. Polarizované reflexní senzory kombinují vysílač a přijímač v jednom pouzdře a využívají odraz světelného paprsku od reflexního prvku, kdy k detekci objektu dochází při přerušení tohoto paprsku. Díky použití polarizačních filtrů spolehlivě detekují i lesklé objekty, u nichž minimalizují rušivé odrazy. Přítomnost odrazky však způsobuje energetické ztráty, a proto mají tyto senzory nižší výkonovou rezervu. [22]



Obrázek 10 Princip polarizovaného reflexního senzoru [22]

3. Difuzní senzory vysílají světelný paprsek směrem k objektu a detekují jej na základě odrazu tohoto paprsku od povrchu objektu zpět do přijímače. Vysílač i přijímač jsou integrovány v jednom pouzdře, což snižuje pořizovací náklady a usnadňuje instalaci. Výsledky měření však silně závisí na vlastnostech detekovaného objektu, jako jsou jeho barva, textura, velikost a tvar. [22]

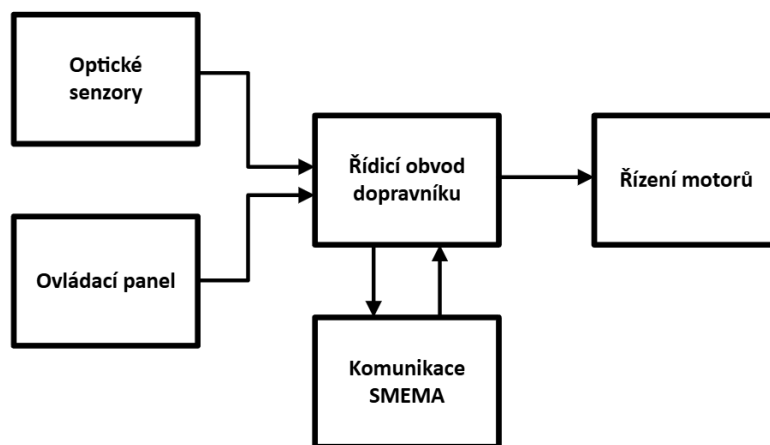


Obrázek 11 Princip difuzního senzoru [22]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Návrh a realizace systému

Na Obrázku 12 je zobrazené blokové schéma, které představuje celkový návrh řídicího systému dopravníku. Jádrem celého systému je řídicí obvod dopravníku, což je mikrokontroler STM32H503CBT6. Řídicí obvod dopravníku komunikuje prostřednictvím SMEMA rozhraní s předchozím a následujícím zařízením ve výrobní lince. Komunikace SMEMA je zároveň vstupem, ale i výstupem řídicího obvodu. Mezi vstupy řídicího obvodu patří 24 V optické difuzní senzory, které udávají informace o stavu dopravních pásů. Dalším vstupem do dopravníku je ovládací panel, který obsahuje tlačítka pro ovládání a potenciometry pro ovládání různých rychlostí dopravníku. Výstupem řídicího obvodu je řízení dvou 24 V stejnosměrných motorů, které pohybuji dopravními pásy.

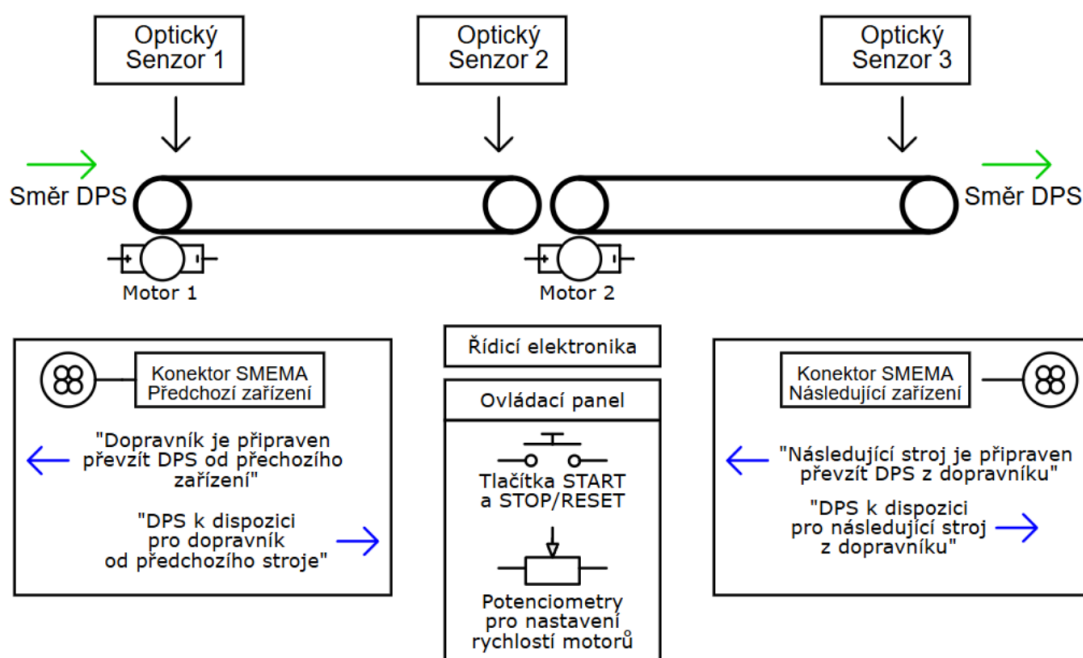


Obrázek 12 Blokové schéma návrhu systému

2.1.1 Návrh systému

Podrobněji je na Obrázku 13 uveden koncepční náčrtek příslušného pásového dopravníku určeného pro přepravu desek plošných spojů mezi jednotlivými částmi výrobního procesu. Dopravník je rozdělen na dva segmenty, přičemž je každý segment poháněn samostatným 24 V stejnosměrným motorem. Dopravník je vybaven třemi optickými senzory, které detekují průchod desek plošných spojů po dopravníku a umožňují přesnou kontrolu nad jejich polohou v jednotlivých fázích přepravy.

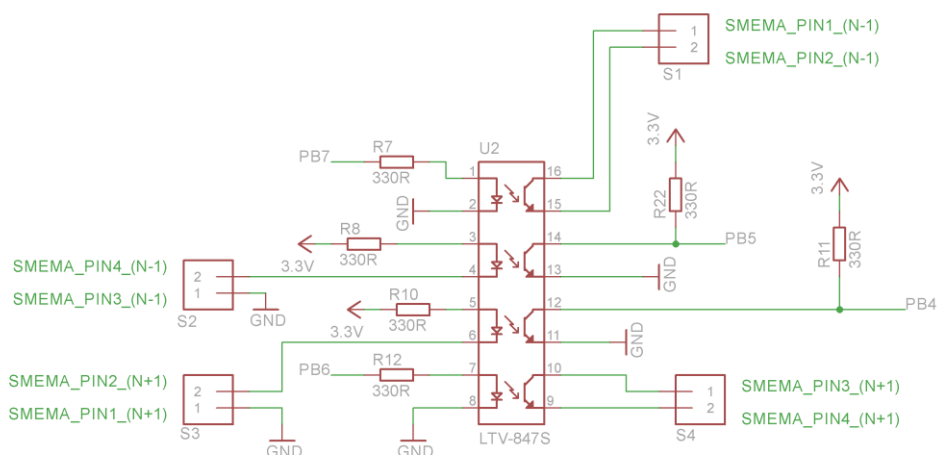
Součástí řídicí elektroniky dopravníku je ovládací panel, na kterém jsou umístěna dvě uživatelská tlačítka pro mikrokontroler, konkrétně START a STOP/RESET. Na ovládacím panelu jsou dále umístěny 3 potenciometry, pomocí kterých lze plynule nastavovat různé rychlosti obou motorů. Tento způsob ovládání poskytuje možnost přizpůsobit rychlost pohybu DPS podle aktuálních požadavků výrobního procesu. Pro zajištění efektivní komunikace s dalšími zařízeními ve výrobním procesu je daný dopravník vybaven komunikačním protokolem SMEMA, který umožňuje synchronizaci a předávání DPS mezi jednotlivými částmi výrobního procesu.



Obrázek 13 Konceptní náčrtes pásového dopravníku

2.1.2 Realizace komunikačního protokolu SMEMA

Dopravník bude komunikovat s předchozím a následujícím zařízením ve výrobním procesu prostřednictvím rozhraní SMEMA. Komunikace probíhá pouze sekvenčně, protože nedochází k adresování. Logika signálu SMEMA rozhraní je realizována pomocí optočlenů nebo spínacích relé. Minimální požadavky na přenos zahrnují schopnost spínání 30 V stejnosměrného napětí a proudu 10 mA. Při proudu 10 mA je výstupní výstup v logické nule a signál nesmí překročit 0,8 V stejnosměrného napětí. V tomto případě bude využit 4 kanálový optočlen LTV-847S, vyráběný společností Lite-On Technology Corporation, který tyto požadavky splňuje. Na Obrázku 14 je znázorněno elektrické schéma rozhraní SMEMA, které je implementováno pro daný dopravník. Digitální piny PB4–PB7 mikrokontroleru STM32 jsou konfigurovány jako vstupy/výstupy. Svorkovnice S1–S4 slouží k připojení konektorů SMEMA.



Obrázek 14 Schéma zapojení rozhraní SMEMA

2.1.3 Řízení motorů pomocí H-můstek

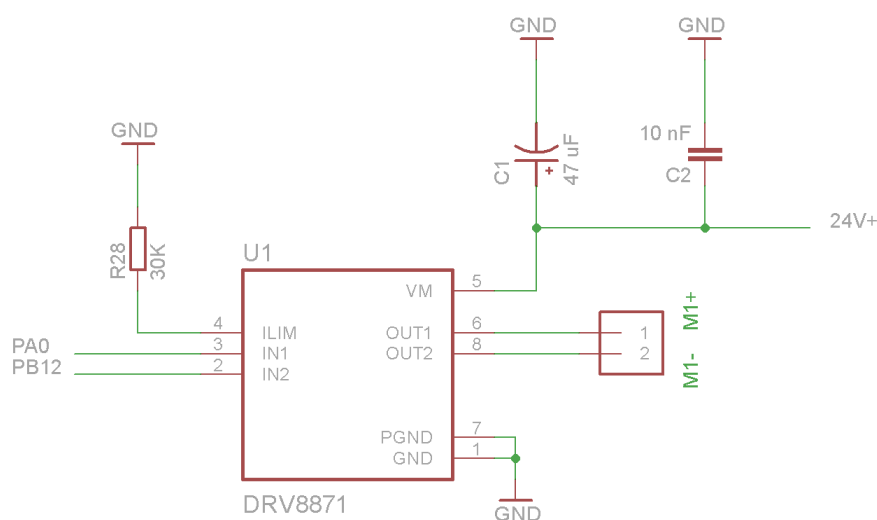
Dopravník je rozdělen na dva segmenty, přičemž je každý segment poháněn samostatným 24 V stejnosměrným motorem. Každý motor bude řídit integrovaný obvod DRV8871 od společnosti Texas Instruments. Tento obvod je H-můstek, který umožňuje obousměrné řízení motorů pomocí dvou digitálních vstupů. Řízení dopravníku bude pro účely tohoto dopravníku pouze dopředné, ale zpětné řízení bude možné implementovat pro další použití v budoucnu. Napájecí napětí obvodu se pohybuje v rozsahu 6,5 – 45 V, což je vhodné pro řízení motorů napájených 24 V. Maximální špičkový proud, který může obvod dodat do motoru je 3,6 A. Obvod však umožňuje regulaci maximálního výstupního proudu pomocí připojení rezistoru mezi pin ILIM obvodu DRV8871 a napájecí zem. Maximální výstupní proud se vypočítá dle vzorce v Rovnici 3: [23]

$$I_{MAX} [A] = \frac{V_{ILIM} [kV]}{R_{ILIM} [k\Omega]} = \frac{64 [kV]}{R_{ILIM} [k\Omega]}$$

Rovnice 3 Regulace výstupního proudu obvodu DRV8871 [23]

V_{ILIM} je konstanta pro výpočet výstupního proudu. Hodnota R_{ILIM} odpovídá rezistoru připojeného mezi pin ILIM obvodu a napájecí zem. Pokud má rezistor hodnotu 30 k Ω , integrovaný obvod omezí výstupní proud do motoru na 2,1 A. [23]

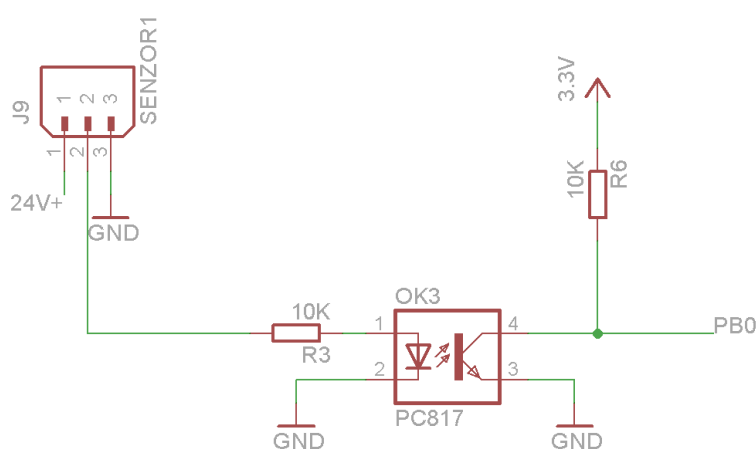
Na Obrázku 15 je zobrazeno elektrické schéma zapojení obvodu pro řízení motoru s H-můstkem DRV8871.



Obrázek 15 Schéma zapojení H-můstku DRV8871

2.1.4 Připojení optických senzorů k mikrokontroleru

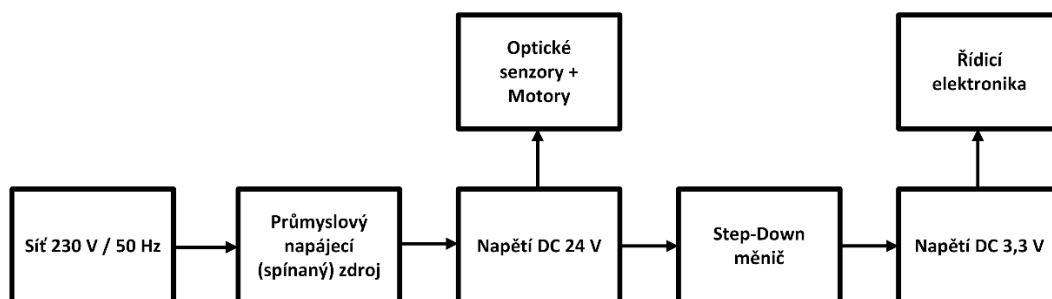
Výstupy z průmyslových optických čidel se dělí na PNP a NPN. Rozdíl mezi nimi je daný interní konstrukcí obvodu a typem použitých tranzistorů. NPN snímač při detekci objektu připojí výstup k napájecí zemi, zatímco PNP snímač při detekci objektu připojí výstup k napájení. Protože použité optické senzory pracují s napájecím napětím 24 V a mikrokontroler STM32 využívá logické úrovně 3,3 V, bylo potřeba zajistit bezpečné a jednoduché propojení rozdílných napěťových úrovní pro vstup mikrokontroleru. Řešení tohoto problému je znázorněno na Obrázku 16. Výstup senzoru s napěťovou úrovní 24 V spíná optočlen PC817. Výstup z optočlenu je připojen k mikrokontroleru přes PULL-UP rezistor, který zajišťuje spolehlivou detekci logických úrovní na vstupním pinu. Na daném dopravníku jsou využité difuzní optické senzory HK12PB8 od výrobce WENGLOR. Tyto senzory mají výstup PNP, dokážou detekovat předmět ve vzdálenosti od 18 mm do 120 mm a je možné je napájet v rozmezí od 10 V do 30 V stejnosměrného napětí. [24]



Obrázek 16 Schéma zapojení připojení senzoru k mikrokontroleru

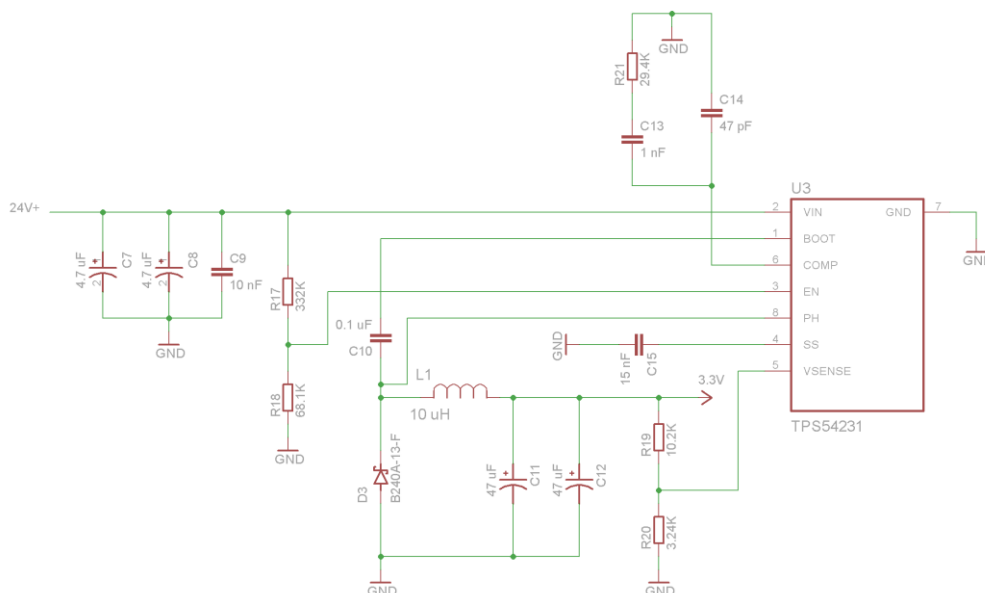
2.1.5 Napájecí systém

Na Obrázku 17 je znázorněno blokové schéma napájecího systému dopravníku. Řídicí systém bude obsahovat dvě různé úrovně elektrického napětí. Výstupem z průmyslového napájecího (spínaného) zdroje MEANWELL HDR-60-24 bude 24 V stejnosměrného napětí. Tímto napětím budou napájeny motory, které pohánají pásy a průmyslové optické senzory pro detekci DPS. Těchto 24 V se pomocí Step-Down měniče přemění na 3,3 V, které budou potřeba pro napájení řídicí elektroniky.



Obrázek 17 Blokové schéma napájecího systému

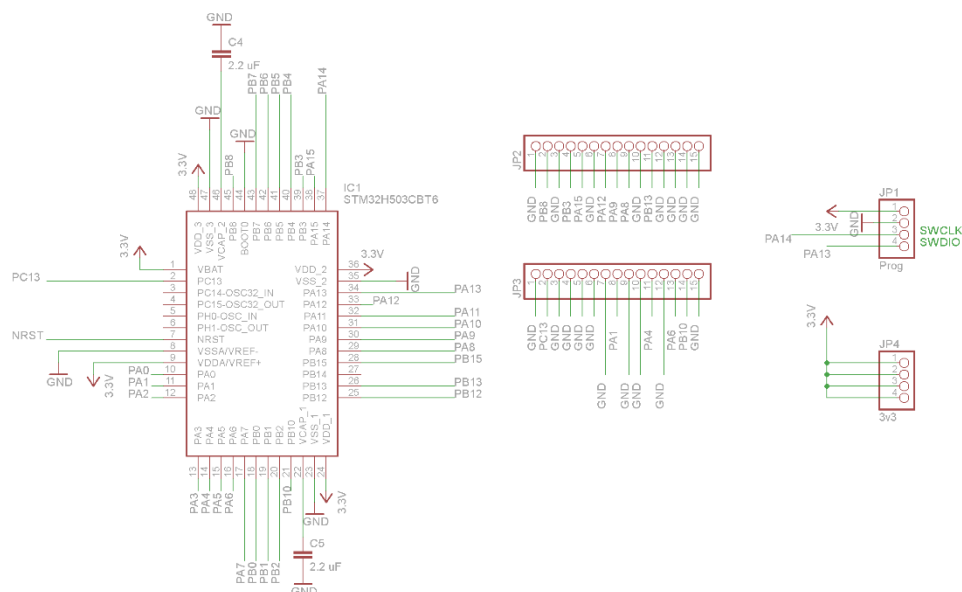
Použitý Step-Down (buck) měnič je integrovaný obvod TPS54231 vyráběný společností Texas Instruments. Tento obvod podporuje vstupní napětí v rozsahu od 3,5 V do 28 V a umožňuje nastavení vstupního napětí od 0,8 V do 25 V pomocí externího děliče napětí. Maximální výstupní proud tohoto obvodu jsou až 2 A, což je dostatečné pro napájení daného řídicího systému. Díky integrovanému MOSFET tranzistoru a efektivnímu řízení proudu se TPS54231 vyznačuje vysokou účinností, což minimalizuje tepelné ztráty. Schéma zapojení obvodu TPS54231 je znázorněno na Obrázku 18. [25]



Obrázek 18 Schéma zapojení Step-Down měniče TPS54231 [25]

2.1.6 Řídicí obvod

Na Obrázku 19 je znázorněno elektrické schéma řídicího obvodu pro dopravník s obvodem STM32H503CBT6. V rámci tohoto zapojení jsou k pinům VCAP mikrokontroleru připojeny keramické kondenzátory pro stabilizaci napájecího napětí. Piny VCAP slouží jako výstupy z vnitřního LDO regulátoru, který převádí hlavní napájecí napětí (3,3 V přivedené na piny VDD) na nižší napětí potřebné pro samotné jádro procesoru. Dle doporučení výrobce (STMicroelectronics) se na piny VCAP připojují nízko-impedanční keramické kondenzátory s hodnotou typicky 2,2 μF až 4,7 μF . Tyto kondenzátory musí být umístěny co nejbližší k samotným pinům a připojeny pomocí co nejkratších spojů, aby byla minimalizována parazitní indukčnost a odpor. Dále jsou na výsledné desce plošných spojů přidány kolíkové lišty pro naprogramování mikroprocesoru STM32 pomocí programátoru přes SWD rozhraní a volné piny pro možné rozšíření do budoucna. [26]

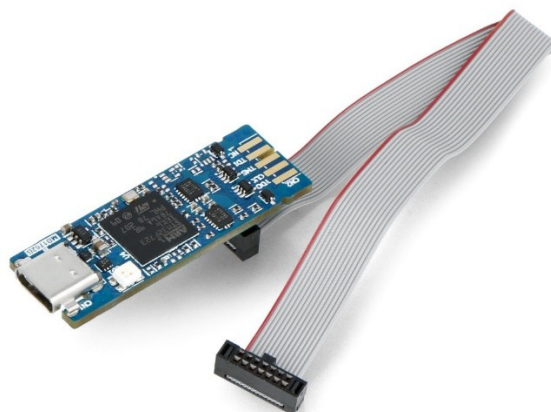


Obrázek 19 Řídicí obvod dopravníku

2.2 Programová část

2.2.1 STM32Cube IDE

Pro naprogramování zvoleného mikrokontroleru STM32H503CBT6 bylo zvoleno vývojové prostředí STM32Cube IDE vyvinuté společností STMicroelectronics. Tento software obsahuje grafický nástroj STM32CubeMX, který umožňuje uživatelsky přívětivou konfiguraci mikrokontroleru, včetně nastavení pinů, hodinového signálu a periférií, jako jsou GPIO, ADC, UART či PWM. Také generuje základní kód pro inicializaci periférií. Psaní kódu pro mikrokontrolery STM32 je možné v jazyce C nebo C++. Dále vývojové prostředí nabízí pokročilé nástroje pro ladění, jako je krokování kódu, nastavování “breakpointů” a monitorování hodnot proměnných v reálném čase. Což například, ve vývojovém prostředí Arduino IDE, není možné. Nahrání programu z počítače do mikrokontroleru STM32 probíhá pomocí ladicí a programovací jednotky ST-Link V3 Minie, viz. Obrázek 20. Tento programátor je připojen k mikrokontroleru prostřednictvím rozhraní SWD (Serial Wire Debug), který zahrnuje piny SWDIO pro data a SWCLK pro hodinový signál. [27]



Obrázek 20 Programátor ST-Link V3 Minie [27]

2.2.2 Konfigurace mikrokontroleru STM32H503CBT6

Pro vytvoření a zajištění funkčnosti programu pro mikrokontroler STM32H503CBT6, který řídí daný dopravník, je nutné správně nastavit klíčové systémové zdroje a periférie. Mezi tyto periférie patří nastavení hodinového signálu (clock) pro běh mikrokontroleru, konfigurace rozhraní SWD pro nahrání programu, analogově-digitální převodníky (ADC), časovače pro generování PWM a vstupně-výstupní piny (GPIO).

Pro zajištění stabilní frekvence pro řízení časování procesoru se nastaví vnitřní HSI RC (High Speed Internal RC) oscilátor, jako hlavní hodinový zdroj pro systémový takt. Konkrétně se nastaví na frekvenci 16 MHz.

Pro uživatelské nastavení různých rychlostí pásů pomocí potenciometrů na ovládacím panelu se nakonfiguruje analogově-digitální převodník. AD převodník je zařízení, které převádí analogový signál, který je spojitý v čase i amplitudě, na digitální signál, který je diskrétní v čase i amplitudě. Tento proces umožňuje mikrokontroleru zpracovávat analogový vstup, jako je například elektrické napětí z potenciometru, na digitální hodnotu vhodnou pro další zpracování. Mikrokontroler STM32H503CBT6 obsahuje jeden analogově-digitální převodník s postupnou aproximací. Je 12bitový a nabízí až 16 kanálů. V rámci konfigurace AD převodníku STM32 je možné vybrat ze tří základních typů převodu. Prvním typem je “Single mode“, který převádí pouze jeden kanál, a to buď v režimu jednorázové konverze nebo v režimu kontinuální konverze. Druhým typem převodu je “Scan mode“, který převádí několik předem definovaných vstupních kanálů, také buď v režimu jednorázové konverze nebo v režimu kontinuální konverze. A třetím typem je “Discontinuous mode“, který převádí pouze jeden kanál při spouštěcím signálu z předem definovaného seznamu kanálů. V této aplikaci bude použitý typ “Scan mode“ v režimu jednorázové konverze. AD převodník provede převod na třech kanálech v jednom cyklu. [28]

Pro řízení motorů se nakonfigurují časovače pro generování pulzně šířkové modulace. Časovač v mikrokontroleru je zařízení pro počítání pulsů vnitřního zdroje hodinového signálu procesoru. Časovač je určen pro velmi přesné měření času, generování událostí a řízení signálu. Mikrokontroler STM32H503CBT6 obsahuje šest 16bitových časovačů a jeden 32bitový časovač. V této aplikaci budou využity univerzální 16bitové časovače TIM2, kanál pro řízení prvního motoru a časovač TIM1, kanál 4. Výslednou frekvenci vygenerovaného PWM signálu je možné spočítat pomocí vzorce v Rovnici 4: [29]

$$F_{\text{PWM}} [\text{Hz}] = \frac{F_{\text{CLK}}}{(ARR + 1) * (PSC + 1)}$$

Rovnice 4 Výpočet frekvence PWM [29]

Kde F_{PWM} je frekvence generovaného signálu PWM, F_{CLK} je frekvence vnitřního hodinového signálu a ARR je hodnota Auto-Reload Registru, což je 16bitový registr v časovači, který určuje maximální hodnotu, do které časovač počítá, než se resetuje a začne znovu od nuly. PSC je hodnota předděliče frekvence, která dělí hodinový signál vstupující do časovače. [29]

2.2.3 Klíčové části řídicího firmwaru

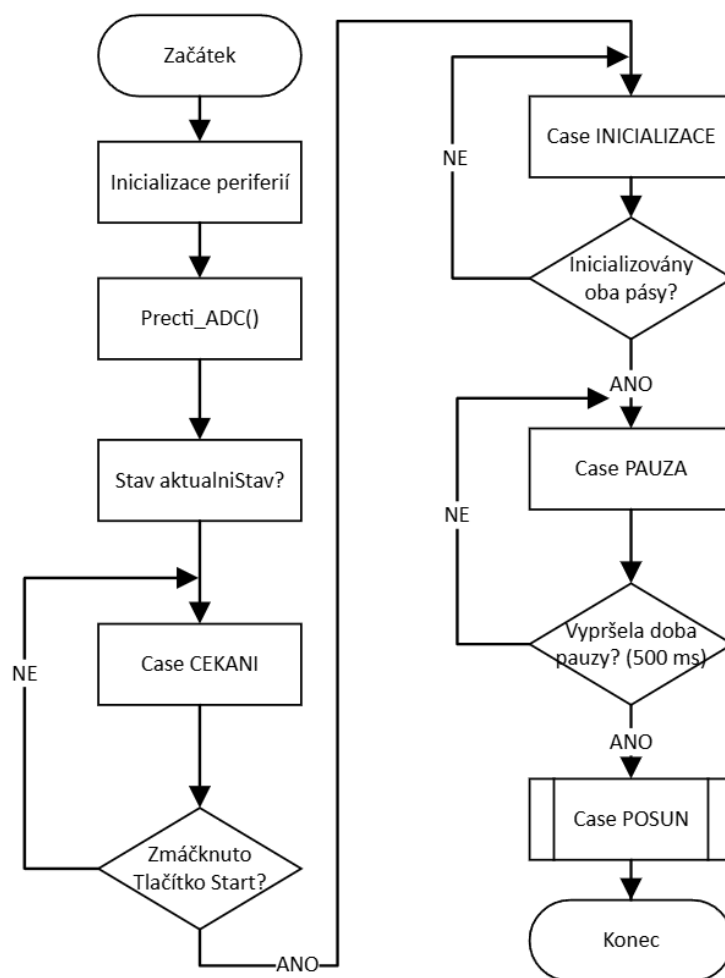
Zdrojový kód pro mikrokontroler STM32 je napsán v programovacím jazyce C ve vývojovém prostředí STM32Cube IDE s podporou HAL (Hardware Abstraction Layer) knihoven. V počáteční fázi programu, ještě před hlavní funkcí programu `int main(void)`, jsou deklarovány proměnné, výčtový typ pro stavový automat systému a funkce, které budou využity v hlavní smyčce.

```
enum Stav // Definice výčtového typu pro stavový automat
{CEKANI, // Systém čeká na zmáčknutí START tlačítka
 INICIALIZACE, // Inicializace systému
 PAUZA, // Systém je dočasně pozastaven
 POSUN // Systém vykonává transport DPS po dopravníku };

enum Stav aktualniStav = CEKANI; // Deklarace aktuálního stavu
uint32_t adcHodnoty[3]; // Pole pro hodnoty z ADC kanálů

void Precti_ADC(void)
{HAL_ADC_Start(&hadc1); // Spuštění ADC konverze
 HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 1000); // Čekání na konverzi
 adcHodnoty[0] = HAL_ADC_GetValue(&hadc1); // Hodnota kanál 1 - První
potenciometr
 HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 1000); // Čekání na konverzi
 adcHodnoty[1] = HAL_ADC_GetValue(&hadc1); // Hodnota kanál 2 - Druhý
Potenciometr
 HAL_ADC_PollForConversion(&hadc1, 1000); // Čekání na konverzi
 adcHodnoty[2] = HAL_ADC_GetValue(&hadc1); // Hodnota kanál 3 - Třetí
Potenciometr
 HAL_ADC_Stop(&hadc1); // Zastavení ADC konverze }
```

V příložené ukázkové části deklarační části programu lze vidět deklaraci výčtového typu “Stav” pro stavový automat dopravníku. Proměnná “aktualniStav” uchovává aktuální stav systému. To bude nutné pro následné použití struktury switch-case v hlavní smyčce programu. Dále je deklarovaná funkce “Precti_ADC()”, která převádí hodnoty z AD převodníku na třech kanálech a ukládá je do pole “adcHodnoty[3]”. Pole “adcHodnoty[3]” má 3 hodnoty, pro získání hodnot ze tří potenciometrů, pomocí kterých uživatel nastaví různé rychlosti pásů dopravníku. První potenciometr nastavuje rychlost pro inicializaci a transport DPS po jednotlivých segmentech mezi čidly. Druhý potenciometr nastavuje rychlost pro příjem DPS na dopravník a přesun mezi jednotlivými pásy. Třetí potenciometr řídí rychlost při odevzdání DPS z dopravníku.



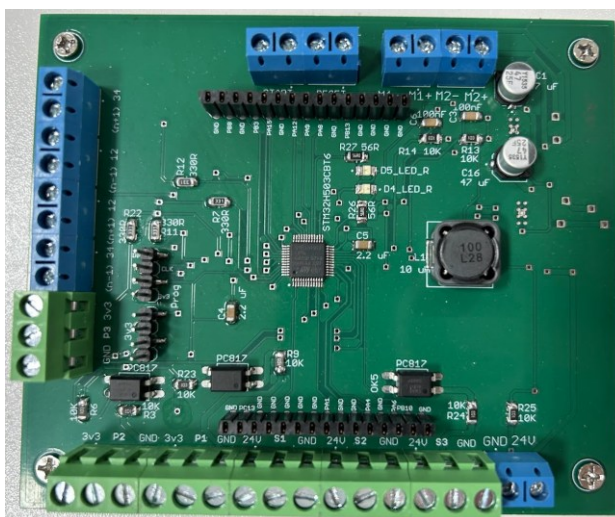
Obrázek 21 Vývojový diagram zdrojového kódu

Hlavní program “int main(void)” je znázorněn na Obrázku 21. Na Obrázku 22 je znázorněn podprogram části vývojového diagramu. V hlavním programu je využita struktura “switch-case“, která přepíná proměnnou “aktualniStav“ mezi 4 stavy: Case CEKANI, INICIALIZACE, PAUZA a POSUN. Tyto 4 hlavní stavy se přepínají sekvenčně. Po stisknutí tlačítka, inicializaci dopravníku a krátké časové prodlevě 500 ms, má Case POSUN své vnitřní stavy: Příjem DPS, Transport DPS ze Senzoru 1 na Senzor 2, Transport DPS ze Senzoru 2 na Senzor 3 a Odevzdání DPS. Tyto jednotlivé stavy jsou znázorněny ve vývojových diagramech na Obrázku 22.

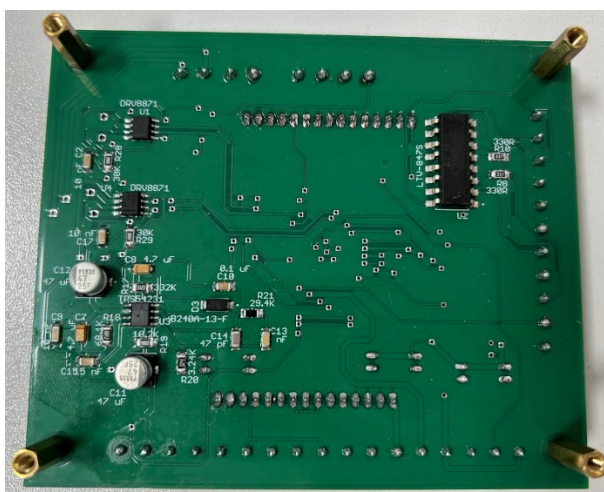
2.3 Mechanická konstrukce

2.3.1 Montážní box pro elektroniku

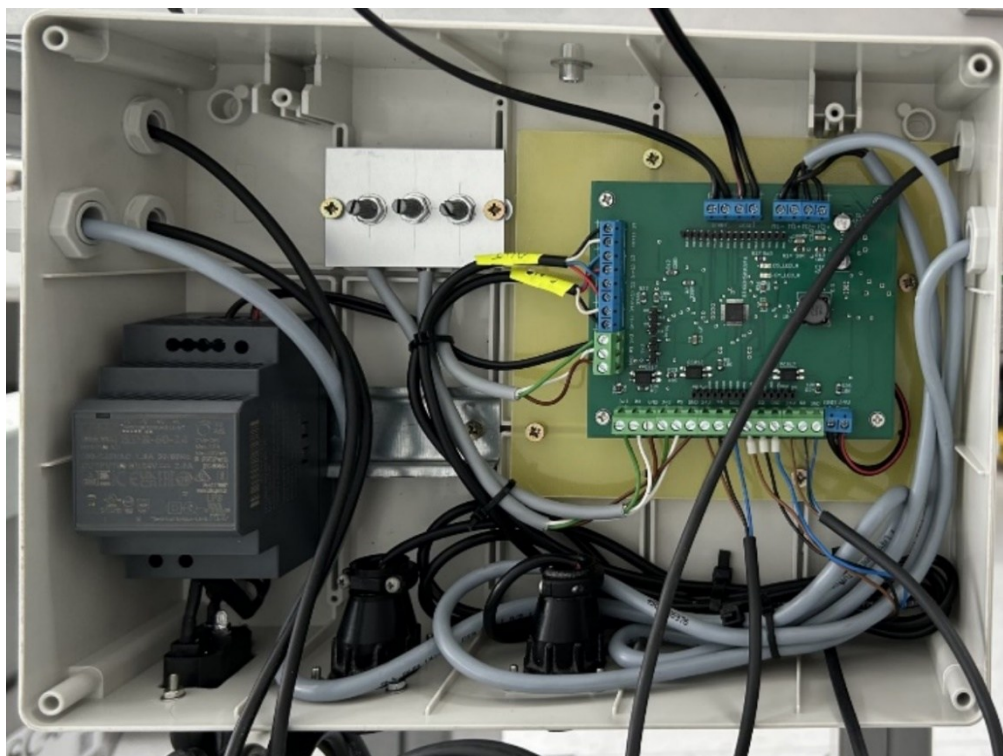
Cílem této práce bylo navrhnout a sestavit desku plošných spojů, zobrazenou na Obrázku 23 a Obrázku 24. Výsledná deska plošných spojů byla navržena oboustranně, se systematickým rozložením svorkovnic pro vhodnou implementaci do montážního boxu na elektroniku ve výsledném dopravníku. Dále byly použity konektorové lišty pro naprogramování procesoru a možné rozšíření do budoucna. Deska plošných spojů byla přišroubována na laminátovou desku, která byla připevněna do montážního boxu pro elektroniku. Společně s deskou plošných spojů byl do boxu uložen i zdroj 24 V na DIN lištu a potenciometry pro ovládání rychlosti. Rozvržení umístění jednotlivých prvků je zobrazeno na Obrázku 25. Montážní box je dále vybaven kabelovými průchodkami pro vedení a upevnění kabelů k motorům a sensorům, konektory pro SMEMA rozhraní, síťovým konektorem pro napájení a tlačítky pro zapnutí a vypnutí dopravníku.



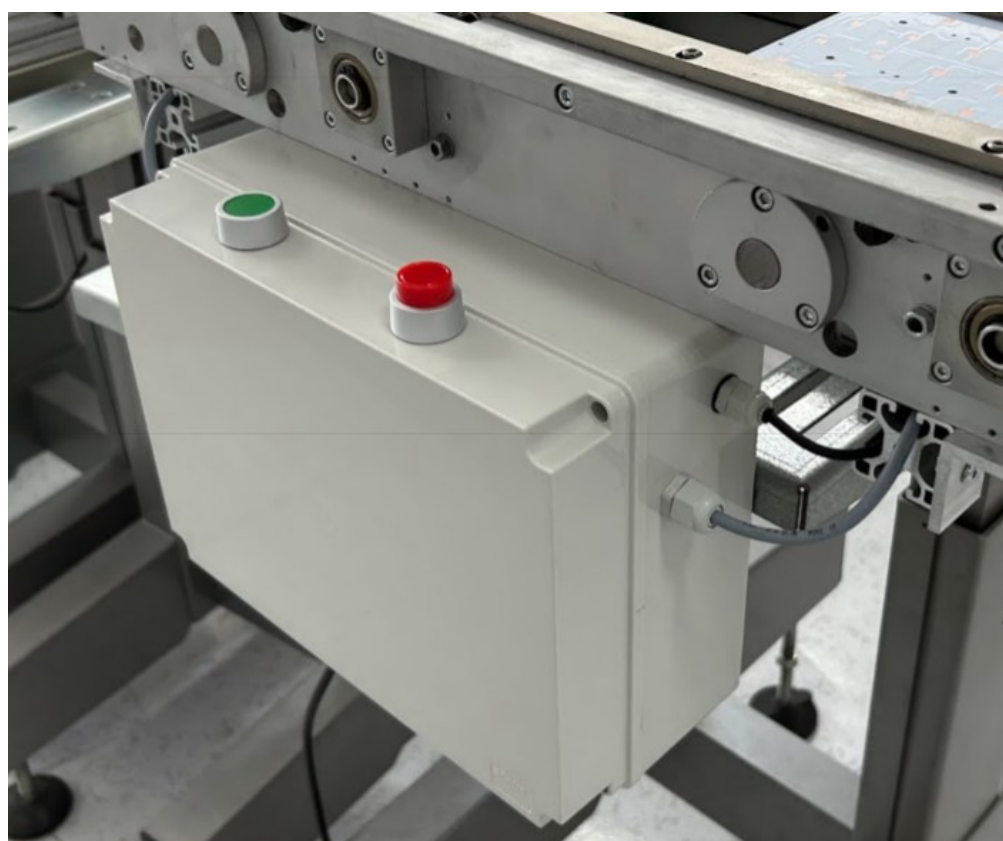
Obrázek 23 DPS řídicího obvodu Vrchní strana



Obrázek 24 DPS řídicího obvodu Spodní strana



Obrázek 25 Montážní box pro elektroniku – vnitřní část



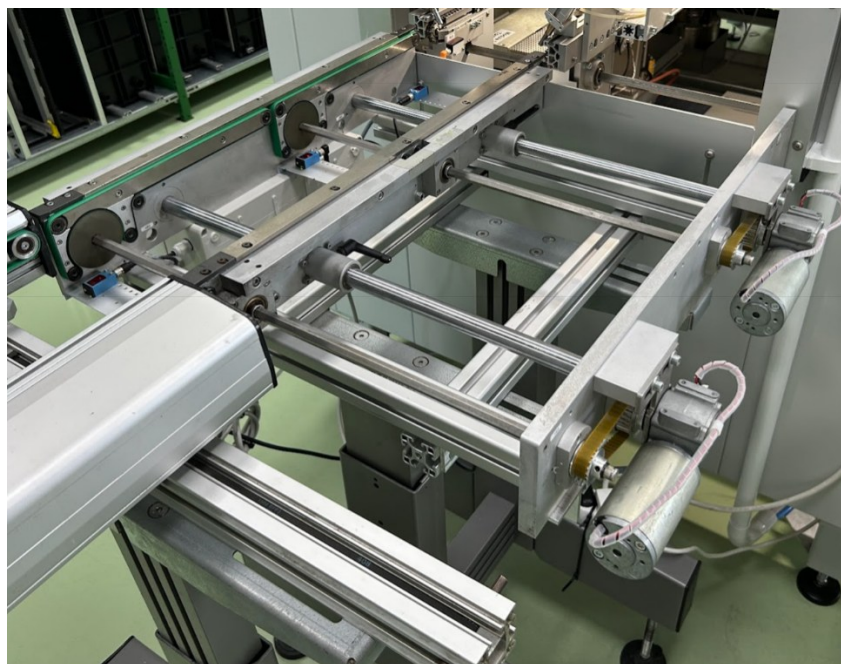
Obrázek 26 Montážní box pro elektroniku – vnější část

2.3.2 Mechanická konstrukce dopravníku

Na Obrázku 27 a Obrázku 28 je zobrazena mechanická konstrukce výsledného pásového dopravníku. Dopravník má nastavitelnou výšku dle výrobní linky. V tomto případě 100 cm. Celková délka dopravníku je 63,5 cm a šířka mezi pásy je nastavitelná v rozsahu od 5 cm do 48 cm, což umožňuje přizpůsobit dopravník různým typům přepravovaných desek plošných spojů. Konstrukce dopravníku umožňuje upravit pozici optických senzorů na jejich podstavci, v případě různých tvarů a typů převážených desek plošných spojů.



Obrázek 27 Mechanická konstrukce dopravníku: přední pohled



Obrázek 28 Mechanická konstrukce dopravníku: zadní pohled

2.4 Obsluha zařízení

Zařízení je navrženo tak, aby dopravník fungoval samočinně, s důrazem na automatizaci a jednoduchost obsluhy. Pro uvedení dopravníku do provozu stačí připojit napájecí síťový kabel a párové SMEMA propojovací kabely s předchozím a následujícím zařízením ve výrobní lince.

Požadované různé rychlosti dopravníku je možné upravit pomocí tří potenciometrů, které se nacházejí uvnitř úložného boxu pro elektroniku. První potenciometr nastavuje rychlost při inicializaci dopravníku a přesunu desky plošných spojů mezi segmenty. Druhý určuje rychlost při příjmu DPS na dopravník a jejím přesunu mezi pásy. Třetí potenciometr ovládá rychlost odevzdání DPS z dopravníku.

Zařízení je vybaveno dvěma ovládacími tlačítky, která zajišťují jednoduchou obsluhu. Po stisknutí zeleného START tlačítka se dopravník automaticky spustí, inicializuje a je připraven k nepřetržitému chodu bez nutnosti další konfigurace. Červené STOP tlačítko představuje bezpečnostní prvek. Je určeno pro okamžité přerušení provozu dopravníku v případě poruchy nebo chyby v manipulaci s deskou plošných spojů. Po jeho stisknutí se dopravník ihned zastaví a zůstává nečinný až do jeho znovuspuštění pomocí zeleného tlačítka. V Tabulce 3 jsou shrnuté vlastnosti jednotlivých komponent v případě potřeby úprav do budoucna.

Tabulka 3 Technické parametry dopravníku

Napájecí napětí zdroje 24 V DC	Síť 230 V, 50 Hz
Maximální výstupní proud zdroje 24 V DC	2,5 A
Vstupní napětí step-down měniče	3,5 - 28 V DC
Výstupní napětí step-down měniče	0,8 - 36 V DC
Maximální výstupní proud step-down měniče	2 A
Napájecí napětí H-můstků	6,5 - 45 V DC
Maximální výstupní proud H-můstků	3,6 A
Napájecí napětí optických senzorů	10 - 30 V DC

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a realizovat řízení pásového dopravníku na desky plošných spojů mezi jednotlivými stanicemi výrobní linky ve společnosti AWOS s.r.o. Výsledkem této práce je plně funkční zařízení, přizpůsobené výrobním požadavkům, přičemž hlavní důraz byl kladen na spolehlivost, jednoduchost obsluhy, bezpečnost a kompatibilitu s průmyslovým komunikačním protokolem SMEMA.

Bylo dosaženo všech stanovených cílů. Řídicí jednotka skutečně umožňuje automatizované řízení dopravníku s možností nastavení různých rychlostí pomocí potenciometrů a komunikuje s předchozím a následujícím zařízením prostřednictvím SMEMA rozhraní. Díky galvanické oddělenosti signálů pomocí optočlenů, bezpečnostního STOP tlačítka, proudového omezení motorů a ochranného uzemnění dopravníku je zajištěn i bezpečný provoz. Dopravník je skutečně schopen nepřetržitého provozu, funguje plynule a spolehlivě.

V průběhu vývoje této řídicí jednotky bylo vytvořeno několik verzí. Základní návrh a koncepce výsledného programu pro řízení dopravníku byl vytvořen na platformě Arduino s mikrokontrolerem ATMEGA328PB-AU. Po vytvoření programu pro cílené chování dopravníku na zkušebním modelovém přípravku, byla navržena nová a finální deska plošných spojů s mikrokontrolerem řady STM32 od výrobce STMicroelectronics. Program pro tento mikrokontroler byl vytvořen v softwaru STM32CubeIDE v jazyce C a byl laděn již na reálném dopravníku. Zvolený mikrokontroler STM32H503CBT6 se prokázal jako velmi výkonné a efektivní řešení. Celková cena výsledné desky plošných spojů, zahrnující cenu jak samotné DPS, tak každé jediné součástky, se pohybuje kolem 1200 Kč. V případě využití PLC pro řešení by bylo velmi náročné se přiblížit k takové cenové relaci.

Mechanické provedení dopravníku spolu s návrhem desky plošných spojů umožňuje díky volnému prostoru v montážním boxu a vyvedení pinů mikrokontroleru prostřednictvím pinových lišt snadné budoucí rozšíření zařízení o další funkce. Dopravník by bylo možné do budoucna rozšířit například o světelnou signalizaci, pro zřetelné zjištění stavu, ve kterém se dopravník nachází. Dalšími možnostmi rozšíření daného dopravníku by mohlo být vybavení pokročilejším komunikačním protokolem Hermes oproti stávajícímu protokolu SMEMA, případně různé automatické inspekční systémy nebo zavedení systému pro evidenci převážených desek plošných spojů.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] EXAPRO, 2013. *Dopravník Nutek NTM410XXL-1000-1*. Online. In: *Exapro.cz*. 2013. Dostupné z: <https://www.exapro.cz/nutek-ntm410xxl-1000-1-p230810037/>. [cit. 2025-04-20].
- [2] OCS SYSTEM, 2019. *Jiné typy dopravních systémů*. Online. In: *OCS System*. 2019. Dostupné z: <https://ocssystem.cz/conveyor-expertise/jine-typy-dopravnich-systemu/>. [cit. 2024-04-10].
- [3] LAPP CZECH REPUBLIC S.R.O., 2023. *Více možností díky protokolovým standardům*. Online. In: *Lapp.com*. 2023. Dostupné z: <https://www.lapp.com/cs/cz/CZK/reseni/prumyslova-komunikace/standardy-protokolu/e/000251>. [cit. 2025-04-20].
- [4] Ocmmanufacturing.com, 2007. *IPC-SMEMA-9851*. Online. In: *Ocmmanufacturing.com*. 2007. Dostupné z: <https://ocmmanufacturing.com/wp-content/uploads/2016/01/IPC-SMEMA-9851.pdf>. [cit. 2025-04-20].
- [5] HighTech communications GmbH, 2024. *Hermes Standard IPC-HERMES-9852*. Online. In: *The Hermes Standard*. 2024. Dostupné z: <https://www.the-hermes-standard.info/>. [cit. 2025-04-20].
- [6] SMTHELP.COM, 2023. *SMEMA: What is it?*. Online. In: *Smthelp.com*. 2023. Dostupné z: <https://www.smthelp.com/smema-what-is-it>. [cit. 2025-04-20].
- [7] Elektroprumysl.cz, 2022. *Co je programovatelný logický automat (PLC) – 1. část*. Online. In: *Elektroprumysl.cz*. 2022. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/co-je-programovatelny-logicky-automat-plc-1-cast>. [cit. 2025-04-20].
- [8] WOSTL, Marek, 2019. *Co je to mikrokontrolér?*. Online. In: *Zonepi blog*. 2019. Dostupné z: <https://blog.zonepi.cz/maker-uno-ve-vyuce-1-5-co-je-to-mikrokontroler/>. [cit. 2025-04-20].
- [9] Microchip Technology Inc., 2023. *8-bit AVR MCUs*. Online. In: *Microchip.com*. 2023. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors/8-bit-mcus/avr-mcus>. [cit. 2025-04-20].
- [10] ROOT.CZ, 2011. *STM32: mikrokontrolér vstřícný k amatérům*. Online. In: *Root.cz*. 2011. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/stm32-mikrokontroler-vstricny-k-amaterum/>. [cit. 2025-05-04].
- [11] STMicroelectronics, 2023. *STM32H503xx datasheet*. Online. In: *Mouser.com*. 2023. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/389/stm32h503eb-3106984.pdf>. [cit. 2025-04-20].
- [12] Microchip Technology Inc., 2023. *ATMEGA328PB-AU Datasheet*. Online. In: *Mouser.com*. 2023. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/268/40001906C-3323958.pdf>. [cit. 2025-04-20].

- [13] GeeksforGeeks, 2024. *Introduction of Finite Automata*. Online. In: *GeeksforGeeks*. 2024. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/introduction-of-finite-automata/>. [cit. 2025-04-20].
- [14] Javatpoint, 2024. *DFA (Deterministic finite automata)*. Online. In: *Javatpoint.com*. 2024. Dostupné z: <https://www.javatpoint.com/deterministic-finite-automata>. [cit. 2025-04-20].
- [15] Javatpoint, 2024. *Finite State Machine*. Online. In: *Javatpoint.com*. 2024. Dostupné z: <https://www.javatpoint.com/finite-state-machine>. [cit. 2025-04-20].
- [16] GeeksforGeeks, 2024. *Mealy and Moore Machines in TOC*. Online. In: *GeeksforGeeks*. 2024. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/mealy-and-moore-machines-in-toc/>. [cit. 2025-04-20].
- [17] P. Dalmaris, “Taming Complexity: A Guide to Implementing Finite State Machines on Arduino Uno”, *Techexplorations.com*, 22. 6. 2023, <https://techexplorations.com/blog/arduino/finite-state-machines-on-arduino-uno/>
- [18] BYJU'S, 2024. *Pulse Width Modulation*. Online. In: *BYJU'S*. 2024. Dostupné z: <https://byjus.com/physics/pulse-width-modulation/>. [cit. 2025-04-20].
- [19] Encyclopedia.pub, 2023. *H Bridge*. Online. In: *Encyclopedia.pub*. 2023. Dostupné z: <https://encyclopedia.pub/entry/30808>. [cit. 2025-04-20].
- [20] DAHL Øyvind Nydal, 2024. *What Is an H-Bridge?*. Online. In: *Build Electronic Circuits*. 2024. Dostupné z: <https://www.build-electronic-circuits.com/h-bridge/>. [cit. 2025-04-20].
- [21] OMRON Corporation, 2025. *Photoelectric Sensors*. Online. In: *OMRON Industrial Automation*. 2025. Dostupné z: <https://www.ia.omron.com/support/guide/43/introduction.html>. [cit. 2025-04-20].
- [22] ifm electronic gmbh, 2025. *Úvod do fotoelektrických senzorů*. Online. In: *ifm.com*. 2025. Dostupné z: <https://www.ifm.com/cz/cs/shared/technologies/magic-cube/fotoelektricke-senzory>. [cit. 2025-04-20].
- [23] Texas Instruments, 2024. *DRV8871 – 3.6-A Brushed DC Motor Driver With Internal Current Sense (PWM Control)*. Online. In: *TI.com*. 2024. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/DRV8871>. [cit. 2025-04-20].
- [24] WENGLOR, 2025. *HK12PB8 – reflexní fotoelektrický senzor s potlačením pozadí*. Online. In: *Setron.cz*. 2025. Dostupné z: <https://www.setron.cz/hk12pb8/>. [cit. 2025-04-20].
- [25] Texas Instruments, 2024. *TPS54231 – 3.5 to 28V Input, 2A, 570kHz Step-Down Converter with Eco-mode™*. Online. In: *TI.com*. 2024. Dostupné z: <https://www.ti.com/product/TPS54231>. [cit. 2025-04-20].
- [26] STMicroelectronics, 2024. *Getting started with STM32H5 MCU hardware development*. Online. In: *STMicroelectronics*. 2024. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/an5711-getting-started-with-stm32h5-mcu-hardware-development-stmicroelectronics.pdf. [cit. 2025-04-20].

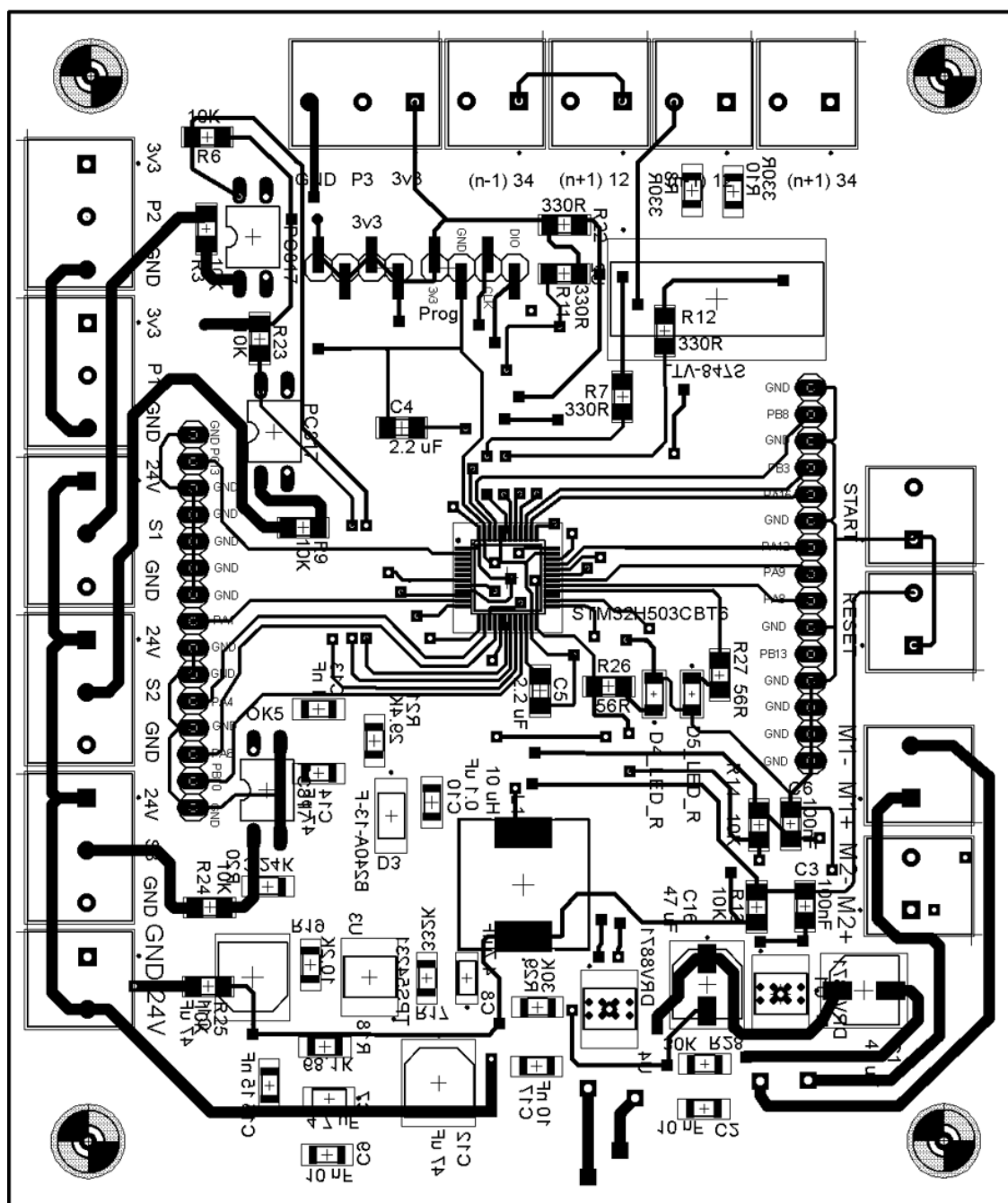
- [27] STMicroelectronics, 2025. *STLINK-V3MINIE – debugger a programátor pro mikrokontroléry STM32*. Online. In: *Botland.com.pl*. 2025. Dostupné z: <https://botland.com.pl/programatory/22109-stlink-v3minie-debugger-i-programator-do-mikrokontrolerow-stm32-stmicroelectronics.html>. [cit. 2025-04-20].
- [28] STMicroelectronics, 2023. *Getting started with ADC*. Online. In: *STM32 MCU Wiki*. 2023. Dostupné z: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/Getting_started_with_ADC. [cit. 2025-04-20].
- [29] MAGDY, Khaled, 2020. *STM32 PWM Example – Timer PWM Mode Tutorial*. Online. In: *DeepBlueMbedded*. 2020. Dostupné z: <https://deepbluembedded.com/stm32-pwm-example-timer-pwm-mode-tutorial/>. [cit. 2025-04-20].

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A: Návrh plošného spoje – Horní vrstva

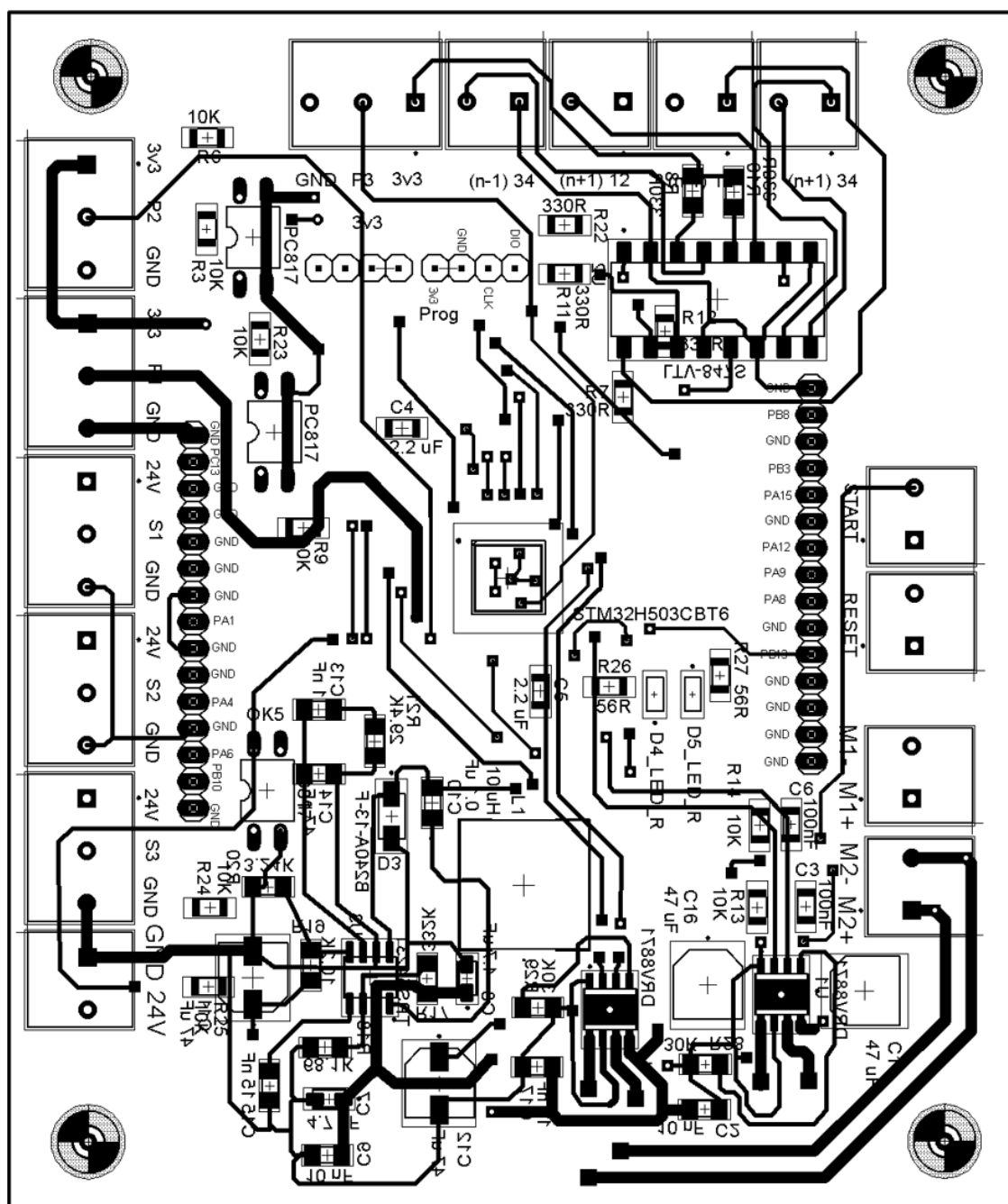
Příloha B: Návrh plošného spoje – Spodní vrstva

PŘÍLOHA A: Návrh plošného spoje – Horní vrstva



Obrázek 29 Návrh desky plošných spojů – Horní vrstva

PŘÍLOHA B: Návrh plošného spoje – Spodní vrstva



Obrázek 30 Návrh desky plošných spojů – Spodní vrstva