



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

UPLATNĚNÍ AUTONOMNÍCH MOBILNÍCH ROBOTŮ VE VÝROBĚ

APPLICATION OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOTS IN MANUFACTURING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Čurda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Jakub Čurda**
Studijní program: Výrobní stroje, systémy a roboty
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Uplatnění autonomních mobilních robotů ve výrobě

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ve výrobní společnosti se autonomní robot využívá pro převoz dílů mezi dvěma pracovišti ve formě dvou překládacích stanic a vozíku s nástavbou, určeného pro převoz dílů. Úkolem diplomové práce je návrh logistického řešení převozu dílů a konstrukční řešení překládacích stanic, případně vezené nástavby autonomního vozíku, pro možné rozšíření o další pracoviště. Dále má být vytvořena mapa okolního prostředí pomocí skenování v reálném provozu a pro nastavení chování–činnosti autonomního robotu.

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je vypracovat kompletní přehled současného stavu poznání týkající se autonomních mobilních robotů (AMR) a jejich využití v běžné praxi ve strojírenské nebo elektrotechnické společnosti. Praktická část práce se bude zabývat optimalizací vybraných technicko–provozních parametrů při využití AMR a dále návrhem rozšíření o další stanice a AMR vozíky na základě požadavků společnosti, ke kterou je zadání DP společně vytvořeno, a to takto:

Rešerše současného stavu poznání v oblasti konstrukce a aplikace AMR.

Systémový rozbor řešené problematiky.

Analýza současného stavu využívání autonomního mobilního vozíku ve firmě.

Návrh logistiky o využití vozíku na dalším pracovišti nejméně ve dvou variantách.

Vyhodnocení navržených variant multikriteriální metodou.

Propracování vybrané varianty řešení překládacích stanic a nástavby na AMR.

Aplikace SW MobilePlanner a vytvoření mapových podkladů.

Vypracování výkresové dokumentace v potřebném rozsahu.

Ekonomicko–technické zhodnocení vybrané varianty řešení.

Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

SIEGWART, Roland; NOURBAKSH, Illah Reza a SCARAMUZZA, Davide. Introduction to autonomous mobile robots. 2nd ed. Cambridge, Mass.: MIT Press, c2011. ISBN 9780262015356.

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

TZAFESTAS, S. G. Introduction to mobile robot control. Elsevier insights. Amsterdam: Elsevier, [2014]. ISBN 0124170498.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D., FEng.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá kompletním návrhem logistického systému využívajícího mobilní robot OMRON LD-90. Zahrnuje řešerši dané problematiky, přehled trhu a rozhovory se zástupci firem, systémový rozbor celého projektu, šestici koncepčních variant a jejich vyhodnocení multikriteriální metodou, konstrukční vypracování zvolené varianty nástavby vozíku a periferního dopravníku, tvorbu kompletních mapových podkladů pro pohyb AMR po hale a konečně ekonomicko-technické zhodnocení celého projektu. Dále byla také vypracována kompletní výkresová dokumentace, bezpečnostní analýza rizik a příručka operátora. Celá práce je průběžně doplněna praktickými znalostmi získanými prací s vozíkem.

ABSTRACT

This thesis focuses on the complete design proces of a logistical system utilizing the OMRON LD-90 mobile robot. It includes a literature review of the topic, market overview, interviews with company representatives, a systematic analysis of the entire project, six conceptual variants subjected to a multi-criteria evaluation, the development of the selected design of the cart superstructure and peripheral conveyor, the creation of map data used for the AMR navigation throughout the facility, and finally, the economic-technical assessment of the project. Additionally, comprehensive technical drawings, a risk safety analysis, and an operator handbook were developed. Most of the chapters in this thesis are supplemented with practical knowledge gained from working with the cart.

KLÍČOVÁ SLOVA

mobilní robot, autonomní robot, AMR, OMRON, nástavba.

KEYWORDS

Mobile Robot, Autonomous Robot, AMR, OMRON, superstructure.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČURDA, Jakub. *Uplatnění autonomních mobilních robotů ve výrobě*. Online, diplomová práce. Radek KNOFLÍČEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/166129>. [cit. 2025-03-12].

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych zde poděkovat celé firmě THK RHYTHM AUTOMOTIVE CZECH a.s, díky které mohla tato práce vznikat prakticky, a to bez jakýchkoliv dalších sponzorů. Speciální díky patří i celému týmu AMD za možnost využívat jejich vývojovou dílnu pro samotnou montáž navržených sestav.

Obrovské poděkování patří také mému vedoucímu, panu Radku Knoflíčkovi, za všechny jeho čas a odborné rady, bez kterých by tato práce nikdy nevznikla.

Dále chci poděkovat i všem zástupcům firem, kteří se mnou byli ochotni vést rozhovory.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Radka Knoflíčka s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 12. března 2025

.....

Jakub Čurda

OBSAH

1	ÚVOD	17
2	MOTIVACE.....	18
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	19
3.1	Pohyb	19
3.1.1	Mobilní roboty s nohami	21
3.1.2	Mobilní roboty s koly	22
3.1.3	Pásové, hybridní a jiné mobilní roboty.....	27
3.2	Systémový rozbor řízení mobilního robotu	30
3.3	Vnímaní a chápání okolí	31
3.3.1	Senzory	31
3.3.2	Linearita a nelinearita	33
3.3.3	Dynamický rozsah a rozsah měření.....	33
3.3.4	Citlivost	33
3.3.5	Rozlišení	33
3.3.6	Přesnost.....	33
3.3.7	Správnost	34
3.3.8	Šířka pásma.....	34
3.3.9	Čas odezvy.....	34
3.4	Navigace, lokalizace, plánování a vyhýbání se překážkám.....	34
3.4.1	Lokalizace.....	35
3.4.2	Plánování	38
3.4.3	Vyhýbání se překážkám.....	41
3.5	Řízení a ovládání	44
4	SYSTÉMOVÝ ROZBOR A ANALÝZA	
	AKTUÁLNÍHO STAVU POUŽÍVÁNÍ.....	47
4.1	Analýza současného stavu trhu.....	47
4.1.1	ABB	48
4.1.2	Agilox	49
4.1.3	Bosch Rexroth	50
4.1.4	CEIT	50
4.1.5	ek robotics.....	52
4.1.6	Etisoft.....	54
4.1.7	INDEVA.....	55
4.1.8	Jungheinrich.....	55
4.1.9	Kivnon	56
4.1.10	KUKA.....	57
4.1.11	Linde	59
4.1.12	Mobile Industrial Robots	59
4.1.13	OMRON	59
4.1.14	SEW.....	61
4.1.15	SSI Schaefer	61
4.1.16	Stäubli	62
4.1.17	STILL	63
4.2	Analýza současného použití AMR ve firmě THK.....	64
4.2.1	Konstrukční provedení	64
4.2.2	Mapa a pohyb po hale.....	67

4.2.3	Logika převozu.....	68
4.3	Systémový rozbor.....	69
5	NÁVRH VARIANT A JEJICH VYHODNOCENÍ MULTIKRITERIÁLNÍ METODOU.....	73
5.1	Varianta A – Pohyblivý dopravník na dvou lineárních osách.....	74
5.2	Varianta B – Pohyblivý dopravník na čtyřech lineárních osách.....	75
5.3	Varianta C – Pohyblivý dopravník s kuličkovým šroubem.....	77
5.4	Varianta D – Dvoupatrový stacionární dopravník.....	78
5.5	Varianta E – Pick&Drop přístup.....	79
5.6	Varianta F – Pick&Drop stojan.....	80
5.7	Metoda multikriteriálního hodnocení pro výběr konstrukční varianty.....	81
6	FINÁLNÍ KONSTRUKČNÍ VARIANTA.....	85
6.1	Sestava vozíku s nástavbou.....	85
6.2	Nosná deska.....	87
6.3	Krytování motoru.....	88
6.4	Nosná konstrukce a krytování nástavby.....	89
6.5	Sestava pro napínání řemenu.....	91
6.6	Sestava motoru a polohovadla.....	91
6.7	Sestava řídicí elektroniky.....	92
6.8	Sestava dopravníku vozíku.....	93
6.9	Posuvová sestava.....	94
6.10	Sestava stacionárního dopravníku.....	94
6.11	Nosná soustava dopravníku.....	95
6.12	Sestava elektrických zařízení dopravníku.....	96
6.13	Dopravníky.....	96
6.14	Separátor dopravníku.....	97
6.15	Přepravní bedny.....	98
6.16	Konstrukční nedostatky odhalené při montáži – praktické poznatky.....	98
7	MOBILE PLANNER A MAPOVÉ PODKLADY.....	99
7.1	Tvorba skenu a prvotní úprava map.....	99
7.1.1	Sken prostředí.....	99
7.1.2	Úprava mapy.....	101
7.2	Doplnění mapy o logické bloky a zóny.....	101
7.2.1	Body.....	101
7.2.2	Zóny.....	105
7.2.3	Čáry.....	106
7.3	Doplnění mapy o makra a úprava konfigurace vozíku.....	107
7.3.1	Makra.....	107
7.3.2	Konfigurace.....	108
7.4	Fleet Manager.....	110
7.5	Ověření funkčnosti programu a optimalizace.....	112
7.5.1	Celkový přehled programu.....	112
7.5.2	Princip funkce logistické sítě.....	113
7.5.3	Optimalizace funkčnosti programu.....	113
7.5.4	Měření lokalizace při pohybu halou.....	114
7.5.5	Měření signálu Wi-Fi při pohybu halou.....	115
7.5.6	Úpravy okolního prostředí vozíku na hale.....	116

8	EKONOMICKO-TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ A VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE	119
9	BEZPEČNOSTNÍ ANALÝZA RIZIK	121
10	DOPORUČENÍ PRO PRAXI A DISKUZE.....	125
10.1	Praktické doporučení pro provozování AMR robotů	125
10.2	Diskuse diplomové práce	127
11	ZÁVĚR.....	129
12	SEZNAMY POUŽITÝCH ZDROJŮ	132
12.1	Seznam informačních zdrojů	132
12.2	Seznam tabulek	145
12.3	Seznam obrázků	146
13	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	150
14	SEZNAM PŘÍLOH	153

1 ÚVOD

Mobilní roboty se rychle stávají nedílnou součástí moderního výrobního procesu a poskytují flexibilní, efektivní a inteligentní řešení složitých logistických problémů. Díky pokroku v oblasti robotiky, senzoriky a automatizace mohou průmyslová odvětví využívat autonomní systémy k zefektivnění pracovních postupů, zvýšení produktivity a snížení závislosti na lidské práci při některých opakujících se nebo nebezpečných úkonech. Jedním z mnoha příkladů technologie mobilních robotů je platforma LD-90 (obr. 1) od společnosti OMRON.

Tato diplomová práce se zabývá implementací tohoto robotu v průmyslovém prostředí. Zkoumá všechny důležité komponenty pro tvorbu mobilních robotů a jejich současné aplikace v různých odvětvích, analyzuje jejich praktické využití a dopad na produktivitu a bezpečnost. Práce dále obsahuje systémový přístup potřebný pro efektivní proces návrhu, společně s výběrem nejlepšího řešení pomocí metody multikriteriálního hodnocení. Návrhová a konstrukční část obsahuje tvorbu nástavby, kterou bude robot využívat k převážení beden. Navrženo je i provedení periferních zařízení spolupracujících s robotem v logistické síti, to celé doplňuje vytvoření podrobných technických výkresů.

Další klíčovou součástí této práce je programování logistiky robotu prostřednictvím softwaru Mobile Planner a také tvorba komplexních mapových podkladů, které bude robot využívat, a příprava systému na rozšíření o druhý vozík či případně více vozíků. Ekonomicko-technické zhodnocení finální varianty celého projektu a posledně závěr a doporučení pro praktickou aplikaci autonomních systémů vyplývajících z nabytých zkušeností.

Mimo hlavní rámec zadání práce obsahuje i několik dalších podsekcí. Například bezpečnostní analýzu rizik spojených s provozem robotu, sepsání uživatelské příručky a proškolení zaměstnanců, kteří budou s mobilním robotem pracovat. Bylo také provedeno vyhodnocení lokalizačních a signálových skóre v rámci celého výrobního komplexu, ve kterém bude robot působit. S tím je spojen i program psaný v jazyku Python využívající strojové vidění pro extrakci právě těchto dat, jejichž analýza a implementace do celého systému je klíčová pro zajištění hladkého provozu robotu ve složitém prostředí kombinovaných logistických sítí, efektivnějšího vyhýbání se překážkám (jako jsou vysokozdvizné vozíky) a celkově jednodušší koordinace logistického komplexu.



Obr. 1 Mobilní roboty OMRON LD-90 [76]

2 MOTIVACE

Práce s mobilními roboty, zejména na této aplikaci pro LD-90, bude doufám transformační zkušeností v mém profesním rozvoji. Již jako student mám příležitost účastnit se projektu, který zahrnuje širokou škálu inženýrských disciplín, od konstrukčního návrhu přes elektroinstalaci a programování PLC, logistiku až po bezpečnost provozu. Možnost kombinovat praktickou aplikaci ve škole nabytých zkušeností se strategickým rozhodováním mi doufám dodá základy potřebné pro to, čelit složitějším výzvám i v budoucnu.

Širší dopad mé práce, a robotiky obecně, však přesahuje technickou stránku věci. Mobilní roboty jako LD-90 představují jedno z potenciálních řešení rostoucího rozdílu mezi poptávkou po kvalifikované pracovní síle a její omezenou dostupností. Automatizací určitých úkonů mohou firmy pokračovat v inovaci a růstu i tváří v tvář nedostatku pracovníků. Je však více než důležité podotknout, že to nutně neznamená nahrazování lidí, ale spíše umožnění toho, aby byly lidské zdroje nasměrovány do oblastí, kde je nezbytná kreativita, rozhodování a další výhradně lidské schopnosti. Zatímco roboty mohou přebrat pouze opakující se nebo nebezpečné úkoly, které je možné najít v každé části výrobního procesu. Tímto způsobem nejen zvyšují efektivitu, ale také podporují udržitelný růst v neustále se měnícím a vyvíjejícím prostředí světového průmyslu.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

K rešeršní části diplomové práce bylo přistoupeno s cílem uplatnit co nejvíce systémový přístup ke všem hlavním částem autonomních mobilních robotů (dále také AMR). Tento přístup má za účelem zvýraznit vzájemnou propojenost jednotlivých subsystémů AMR v širším kontextu jejich funkce.

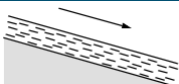
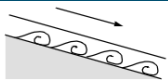
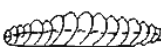
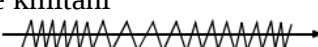
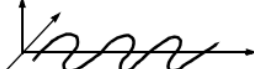
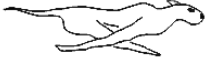
Vzhledem k rychlému rozvoji technologií v oblasti mobilní robotiky byla hlavním zdrojem zejména odborná anglická literatura. Tímto přístupem jsou do tematiky přineseny nové a aktuální informace, které v českých a slovenských zdrojích ještě nebyly pokryty. Příkladem tohoto je kniha *Roboty a robotizované výrobní technologie* od Z. Kolíbal [1], která, i přestože je výborně a pochopitelně zpracovaná, se v kapitole týkající se mobilní robotiky opírá především o regionální zdroje, a proto by její použití spíše jen opakovalo již známé informace. Současný rozvoj v oblasti mobilní robotiky zdůrazňuje důležitost využívání aktuálních zdrojů, což se odrazilo i v rešeršní metodice, kde se autor zaměřil na využití co nejnovějších článků.

Na rozdíl od jiných studií jsou v rešeršní části vědomě vynechány jakékoliv výpočty, které by byly nad rámec práce. Tyto analýzy jsou již kvalitně zpracovány v literatuře (například právě v knize Z. Kolíbal [1]) a zde by nijak neobohatily hlavní cíle rešerše zaměřené především na koncepční a systémové aspekty mobilních robotů.

3.1 Pohyb

Mobilní robot musí využívat nějaké formy lokomoce, aby se mohl nevázaně pohybovat okolním prostředím. Těch existuje velké množství a rozsah způsobů a přístupů k pohybování je u mobilních robotů poměrně obsáhlý. I přesto, že se nejčastěji využívají v již známých a říditelných prostředích jako jsou sklady či výrobní haly, vyskytují se i případy, kdy je okolí nebezpečné či nestandardní (mnohdy je právě z tohoto důvodu využito robotu). [2; 3]

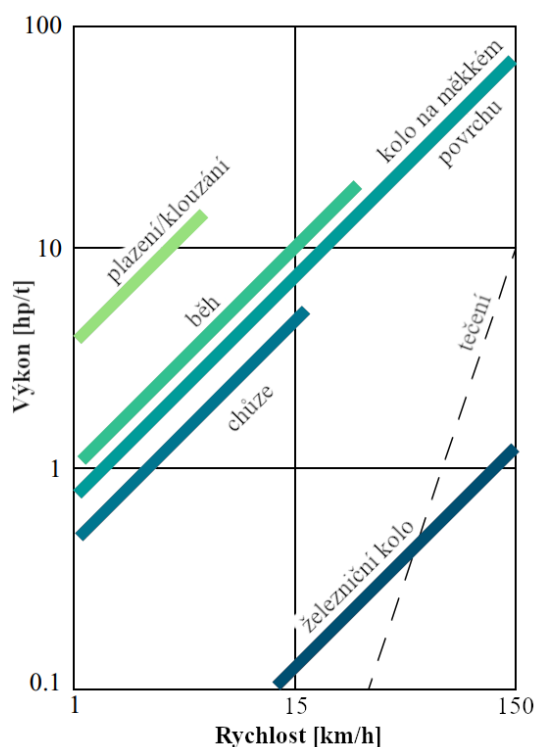
Tab. 1 Základní typy pohybů v přírodních systémech, upraveno a přeloženo dle [2]

Typ pohybu	Hlavní odpory	Kinematický model
tečení v korytu 	hydrodynamické síly	výry 
Plazení 	třecí síly	podélné kmitání 
klouzání 	třecí síly	příčné kmitání 
běh 	ztráta kinetické energie	oscilační pohyb kyvadla 
skákání 	ztráta kinetické energie	oscilační pohyb dvoudílného kyvadla 
chůze 	gravitační síly	válení polygonu 

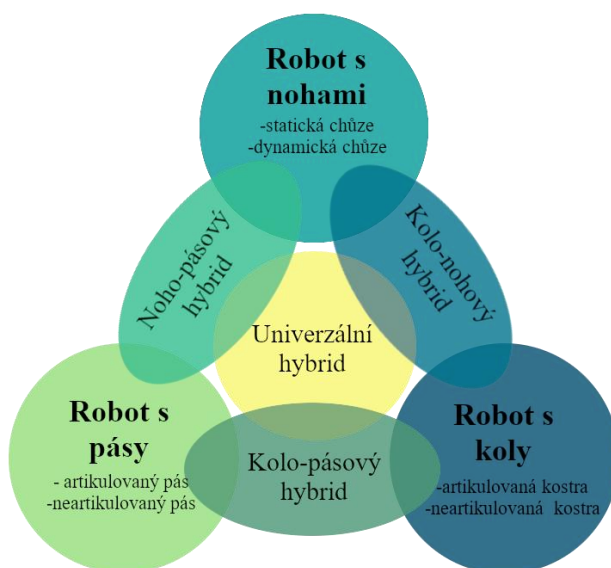
Volba formy pohybu ovlivňuje téměř všechny ostatní aspekty robotu a jeho chování, proto je důležité vždy zvolit způsob nejvhodnější pro danou aplikaci. Tu však ovlivňuje nejen povrch nebo médium, po kterém se robot pohybuje, ale i další technická kritéria jako je ovladatelnost, efektivita, stabilita apod. V laboratořích po celém světě již existují roboty, které se umí kutálet, plazit se, chodit, běhat, skákat, plavat či létat. [2; 3]

To vše jsou formy inspirované přírodou (viz tab. 1), přesněji živými tvory s podobným tvarem jako robot využívajícími podobný styl pohybu jako oni. Tyto biologické systémy excelují v pohybu skrz široký rozsah komplikovaných prostředí, jejich replikace ve světě robotiky je však často obtížná. Jako příklad lze využít hady. Ti jsou schopni, stejně jako všechny ostatní žijící organismy, pomocí buněčného dělení poměrně nekomplikovaně a rychle (ještě před narozením) vytvořit velké množství svalů potřebných k plazení. U člověkem vytvořeného robotu je však zapotřebí každý ze svalů jednotlivě vyrobit, namontovat a pohánět. Dalším rozdílem je živá buňka, ta je i se svými mikroskopickými částmi schopna pracovat jako samostatná jednotka vykonávající celou řadu činností, a to za využívání zdrojů energie na přeměnu v mechanickou práci, s efektivitou jen velmi obtížně napodobitelnou stroji podobných rozměrů. Pro lidmi vyrobené stroje je tak zcela neekonomické a většinou i nelogické snažit se dosáhnout takovéto komplexnosti a miniaturizace. [2]

Nejčastěji používanou formou lokomoce v robotice, která se však v přírodě nikde nevyskytuje, je poháněné kolo, to dosahuje až extrémně vysoké účinnosti na rovných površích (viz obr. 2). Nejblíže se kolu z biologických mechanismů podobá chůze, tu jsme schopni aproximovat jako otáčení polygonu, kde je každá ze stran stejně dlouhá jako délka kroku. Začne-li se vzdálenou mezi jednotlivými kroky snižovat, polygon se limitně přibližuje ke kružnici, znázorněno v tabulce 1. Existují však i chodící roboty. Chůze vyžaduje více stupňů volnosti a tím tak zvyšuje mechanickou komplexnost a cenu, nicméně pohyb pomocí noh má i nemalou řádku výhod. Dalším využívaným typem mechanismu pro pohyb je pás,



Obr. 2 Porovnání výkonu a dosažitelné rychlosti různých mechanismů, upraveno a přeloženo dle [5]



Obr. 3 Kategorie pozemních mobilních robotů, upraveno a přeloženo dle [4]

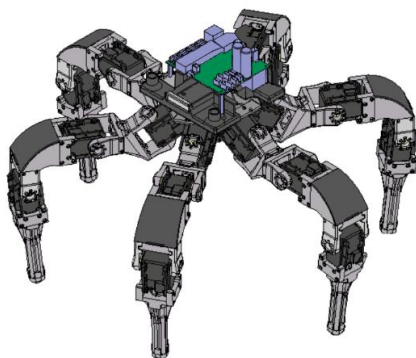
ten je jako forma pohybu často uplatňován v prostředích, která jsou nestrukturovaná nebo konstruovaná pro pohyb lidí. Všechna tato provedení je pak možné mezi sebou vzájemně kombinovat, vzniká tak několik základních kategorií vyobrazených na obrázku 3. [2; 4; 5]

Kvůli zmíněným limitům, a hlavně i oblasti aplikace, mobilní roboty využívají k pohybu převážně kola, výjimečně pak nižší počty nohou s klouby. Kloubové mechanismy spolu totiž přinášejí některé dodatečné problémy. Ke komplexnějším pohybům vyžadují více stupňů volnosti a tím i větší komplexnost, je zde také nutno lépe rozvrhnout váhu a její rozložení. Na rozdíl od nich jsou kolové mechanismy markantněji méně složité, a navíc na rovných površích i o jeden až dva řády účinnější. Je zde však důležité podotknout, že na rozdíl od kol je pohyb pomocí noh díky prakticky bodovému kontaktu se zemí méně ovlivnitelný pevností povrchu. Kdežto u kol dochází k nárůstu mechanických ztrát, a to především díky valivému odporu (viz obr. 11). Nicméně průmyslové mobilní roboty jsou téměř výhradně využívány na rovných a pevných plochách, ať už venku nebo uvnitř, a tak téměř všechny využívají k pohybu právě kola. [2]

3.1.1 Mobilní roboty s nohami

Pro kloubové mechanismy napodobující končetiny je typický pohyb pomocí série bodových styků se zemí. Hlavními výhodami je jejich adaptabilita a manévrovatelnost v obtížných prostředích. Jak bylo již zmíněno, právě díky bodovému kontaktu mezi zemí a robotem jsou tyto mechanismy méně náchylné na špatnou strukturu a pevnost povrchu. V tomto ohledu je omezuje pouze nutnost dosažení dostatečné rovnováhy a potřeba světlé výšky mezi robotem a zemí pro přetočení kinematického mechanismu nohy. Jejich pohyb také bývá pomalejší než u kolového provedení. Chodící roboty jsou také schopny překonávat díry v povrchu (s menší šířkou, než je délka kroku) a lépe manipulovat s předměty v prostoru. [2; 4; 5]

Tato obratnost však často vyžaduje provedení nohy se zvýšeným počtem stupňů volnosti, aby byla schopna působit silou ve více směrech. Hlavní nevýhodou pohybu využívajícího nohy je především vyšší úroveň mechanické složitosti. Její mechanismus musí vždy obsahovat více stupňů volnosti než kolo a v některých případech je také nutné, aby se robot zvedal a snižoval. [2]



Obr. 4 Konstrukce šestinožého robotu Hexapod, upraveno dle [153]



Obr. 5 Čtyřnohý robot BigDog, upraveno dle [154]



Obr. 6 Robot Atlas, upraveno dle [155]

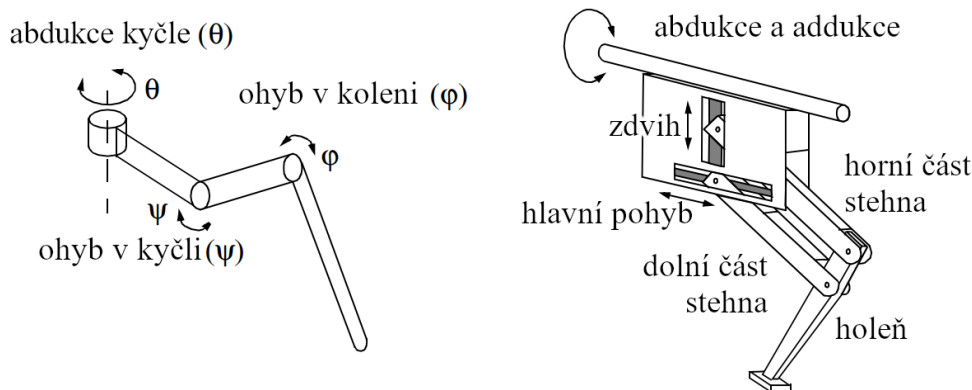
Nohy je možné použít v mnoha různých uspořádáních, obecně se však vždy volí řešení s dostatečnou stabilitou a co nejnížší komplexitou. Podle úrovně stability lze toto provedení rozlišit na nestabilní, staticky stabilní a dynamicky stabilní, kde staticky stabilní jsou mechanismy schopné odolávat reakčním silám prostředí, dynamicky stabilní pak odolávají nejen reakčním ale také setrvačným silám. [2]

Vývoj a vzhled robotů s končetinami je do jisté míry značně inspirovaný světem zvířat. Příklady pro každé provedení podle stability mohou být člověk, laň a pavouk. Pavouk je již od narození schopen stabilně stát i chodit, jeho šest noh totiž dovoluje trojici z nich stabilně stát, zatímco druhá trojice se nadzvedne a přesune. Podobně navržené roboty jsou tak velice stabilní, nevyžadují při chůzi tolik kontroly, ale bohužel jsou také materiálově náročné. Z hlediska pohybu se pak jedná o staticky stabilní provedení se statickým pohybem (obr. 4). Laně na rozdíl od pavouků neumí hned po narození chodit, jsou však schopné okamžitě vstát. Jejich čtveřice noh nedovoluje stabilní chůzi, umožňuje však stabilní stání. Roboty se čtyřmi nohama jsou tak staticky stabilní, ale s dynamickým pohybem (obr. 5). Lidské dítě není kvůli pouze dvěma nohám schopné okamžitě po narození chodit ani stát, dvojice podpor neumožňuje stabilní chůzi ani stání. Takto provedené roboty bývají lehčí a materiálově méně náročné, vyžadují však vyšší úroveň aktivní kontroly nejen při chůzi, ale i při stání. Jedná se o provedení staticky nestabilní s dynamickou chůzí (obr. 6). V praxi se nejčastěji vyskytují provedení se dvěma až osmi nohama, uplatnění lze však najít i pro vícenohé roboty, s každým dalším párem noh se zvyšuje jejich stabilita a nosnost. [2; 3; 4; 6]

Provedení každé nohy je vždy minimálně o dvou stupních volnosti (potřebné pro zvednutí nohy a její pohyb vpřed, viditelné na obrázku 7), nejčastěji je však přidáván další stupeň, který umožňuje více komplexní pohyby. U bipedních robotů se často využívá i čtvrtý, a to ve formě kotníku, díky němu pak dochází k lepšímu kontaktu se zemí. Obecně pak lze tvrdit, že s každým dalším stupněm volnosti se zlepšuje manévrovatelnost a adaptabilita na různé typy povrchů. Také se však zvyšuje složitost, hmotnost a komplexnost řízení. [2; 5]

3.1.2 Mobilní roboty s koly

Kolo je nejvyužívanějším pohybovým mechanismem ve všech okruzích lidské produkce, této oblíbenosti dosáhlo zejména kvůli své poměrně jednoduché konstrukci a výborné efektivitě, obzvláště při pohybu po tvrdých površích. Kolové roboty také nemívají při provozu problémy se stabilitou, jsou totiž téměř vždy navrženy tak, aby se při provozu všechna jejich kolečka neustále dotýkala země. To znamená, že i při pouze třech bodech kontaktu je celá platforma kompletně stabilní. Stability lze však docílit i u dvoukolových robotů, viz tabulku 2,



Obr. 7 Příklady noh se třemi stupni volnosti, přeloženo dle [2]

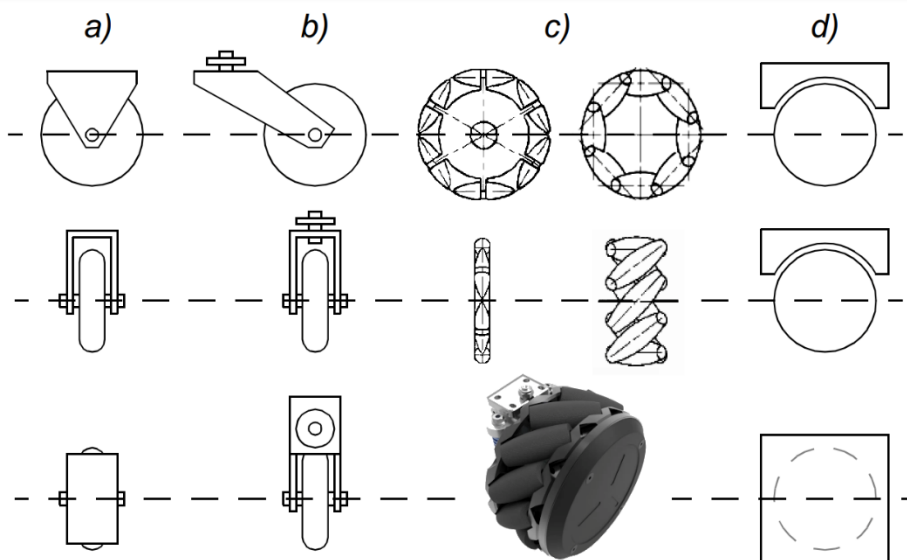
v takovémto případě se ale vždy jedná o stabilitu dynamickou. Statická stabilita vyžaduje minimálně tři kola, kde těžiště vozíku musí být vždy umístěno uvnitř trojúhelníku vytvořeného body kontaktu kol se zemí. Stabilitu lze dále zlepšit přidáním dalších kol; jakmile však počet kontaktních bodů překročí tři, robot bude vyžadovat nějakou formu flexibilního odpružení jednotlivých koleček. Nelze totiž tvrdit, že povrch podlahy je vždy perfektně rovný. [2]

Provedení různých typů podvozků ovlivňuje především nutná trakce (například pro mastnější podlahy), manévrovatelnost (jistá dynamika pohybu při výkonnějších logistických sítích) a kontrolovatelnost pohybu (možnost vozíku otočit se na místě, nebo potřebovat i dopředný pohyb) požadovaná po každé specifické aplikaci. [2]

Použití kol je ve většině průmyslových využití jednodušší a levnější než použití pásů nebo noh. Kola jsou snadnější na výrobu, tím se snižuje i jejich cena. Díky této jednoduchosti může být i celé pohybové ústrojí zjednodušeno a naprogramovat robota, který se pohybuje po rovném povrchu, je taktéž méně obtížné. Jejich ovládání je méně složité a kola samotná způsobují menší opotřebení povrchu, po kterém se pohybují. Hlavní nevýhodou kol je, že mimo hladké a rovné povrchy bez větší míry znečištění, není vhodné je používat. [2; 3]

Existují čtyři hlavní provedení kol (jak je znázorněno na obrázku 8). Každý z typu kol má své specifické kinematické vlastnosti, a proto má volba provedení kola velký vliv na celkovou kinematiku mobilního robota. Kolo je tak možné konstruovat jako [2; 3]:

- Standardní kolo: základní a nejjednodušší provedení kola se dvěma stupni volnosti, s rotací pouze kolem bodu kontaktu se zemí. Je schopno vykonávat řídicí pohyby bez přídavných nežádoucích účinků, protože střed rotace leží v ose rotace kola (obr. 8a).
- Otočné kolo: má tři stupně volnosti, otáčí se kolem vyoseného otočného bodu podvozku a kolem bodu kontaktu se zemí (obr. 8b). V porovnání se standardními koly nabízí lepší manévrovatelnost. Střed rotace již však neleží na ose rotace a to může způsobovat dodatečné silové působení během zatáčení.
- Všesměrové kolo (stanfordské/švédské): má tři stupně volnosti, může se otáčet kolem osy kola, kolem bodu kontaktu se zemí a kolem jednotlivých válečků, ze kterých je kolo složeno (obr. 8c, zobrazena jsou kola se sklonem



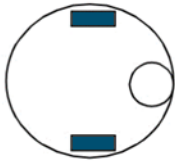
Obr. 8 Čtveřice základních konstrukčních typů kol, upraveno dle [2; 156]

válečků 45° a 90°). Díky tomu klade nízký odpor i v jiném směru, než je hlavní směr rotace. Malé válečky po obvodu kola bývají obvykle pasivní a hlavní osa kola slouží jako jediná aktivně poháněná rotační vazba.

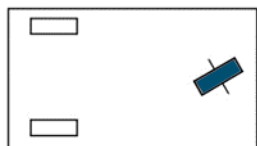
Sférické kolo (koule): jedná se o skutečně všesměrové kolo, které je často navrženo tak, aby bylo aktivně poháněné a mohlo se otáčet v libovolném směru. Má tři stupně volnosti, jeho implementace je však technicky složitá. Největším nedostatkem bývá neschopnost kolo pohánět a zároveň zajistit jeho upevnění ke zbytku pohybového ústrojí. Jeden z mechanismů pro implementaci tohoto provedení napodobuje starší počítačové myši (před rozvojem optického sledování pohybu), kde aktivně poháněné válečky tvoří lůžko, v němž leží koule, která se tak začne otáčet. Schematické provedení sférického kola je na obrázku 8d.

V tabulce 2 je přehled konfigurací kol seřazený podle počtu, konkrétního typu, a jejich uspořádání na podvozku robota. Některé z uvedených konfigurací však nemají téměř žádné využití v mobilní robotice. Jsou zde také uvedeny příklady robotů využívajících jednotlivá uspořádání, další lze nalézt v kapitole Analýza současného stavu trhu nebo v příloze 1. [2]

Tab. 2 Rozložení kol na podvozku, upraveno a přeloženo dle [2]

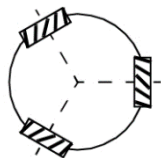
Počet kol	Uspořádání kol	Popis	Příklady použití
2		jeno řízené kolo vepředu, jedno poháněné vzadu	kolo či motorka (pouze dynamicky stabilní)
		dvě poháněná kola s diferenciálem, kde těžiště musí ležet na ose mezi nimi	Cye Personal Robot [7](pouze dynamicky stabilní)
3		dvě poháněná kola ve středu (s diferenciálem) a dodatečně nepoháněné kolo	Nomad Super Scout II [8]
		dvě nezávisle poháněná kola a sférické kolo	naprostá většina domácích vysavačů a PygmalionSmartRob [9]
		dvě nezávisle poháněná kola a dodatečné řízené kolo	minidodávky Piaggio

4



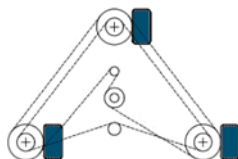
dvě nepoháněná kola
a jedno poháněné
a řízené kolo

Hero-1 [10]



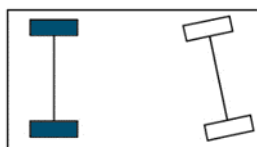
tři poháněné a řízené
všesměrové, nebo
sférické, kola umístěná
do trojúhelníku

Palm Pilot Robot Kit
[11]



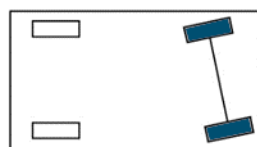
tři synchronní poháněná
a řízená kola.

Nomad 200 mobile
robot [12]
(uspořádáním kol
není říditelné)



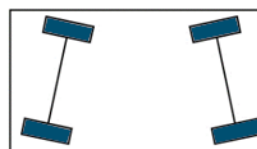
dvě poháněná kola
vzadu, dvě řízená kola
vepředu (diferenciál)

auto s pohonem
zadních kol



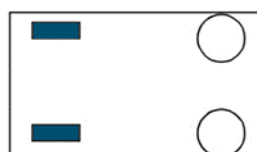
dvě poháněná kola
vepředu, dvě řízená kola
vzadu (diferenciál)

auto s pohonem
předních kol



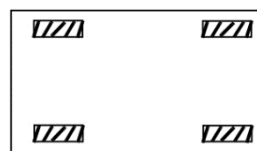
čtveřice poháněných
a řízených kol

auto s pohonem čtyř
kol, Hyperion
MiR200 [13]



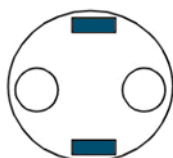
dvě poháněná kola
(s diferenciálem)
a dvě řízená kola

Stretch RE1 [14]



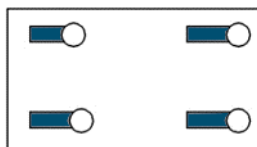
čtveřice všesměrových
kol

Uranus mobile robot
[15]



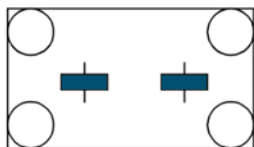
dvě poháněná kola
s dvojicí přidavných
podpěrných bodů

Khepera mobile robot
[16]



čtveřice poháněných
a řízených otočných kol

Nomad XR4000 [17]



dvě poháněné a řídicí
kola zarovnané na střed,
v každém z rohů jedno
všesměrové kolo



dvě poháněná kola
po stranách
(s diferenciálem)
a v každém rohu jedno
všesměrové kolo

The Terregator
Mobile Robot [18]

Popis ikon použitých pro zobrazení kol v celé tabulce:



nepoháněné kolo schopné zatáčení bez prokluzu
(otočné, všesměrové nebo sférické)



poháněné všesměrové/standfordské kolo



nepoháněné standartní kolo



poháněné standartní kolo



poháněné a řízené otočné kolo



řízené standartní kolo



spojená kola

3.1.3 Pásové, hybridní a jiné mobilní roboty

Pásové mobilní roboty.

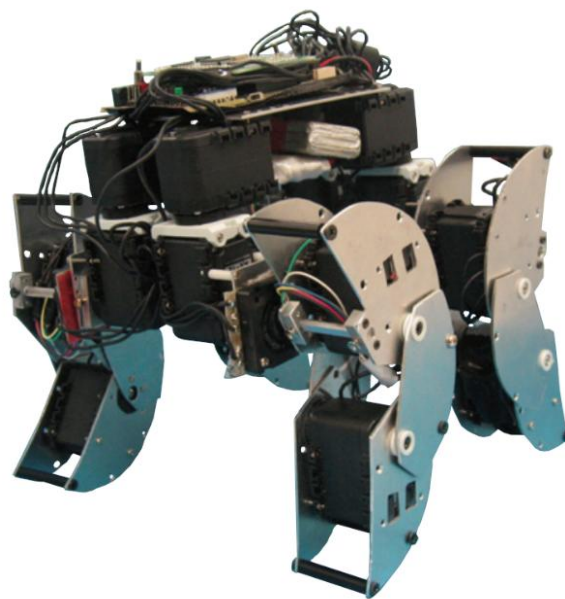
Přestože si roboty s koly pro pohyb po rovné a přizpůsobené podlaze již našly uplatnění v praxi při převážení komponent a produktů uvnitř průmyslových budov, využití pásových robotů pro pohyby na obtížnějším, mnohdy neupraveném povrchu, je pouze nově se rozvíjející aplikace. Pásové roboty se vyznačují markantněji větší kontaktní plochou se zemí, což má za následek nárůst manévrovatelnosti na nestabilním povrchu (v porovnání s kolovými i chodícími roboty). Nevýhodou tohoto přístupu je nutnost zatačet prokluzováním, při kterém musí prokluzovat velká část pásů. To činí určení úhlu pootočení z odměřování na kolech velmi nepřesným a závislým na koeficientu tření mezi pásem a podkladem. Ten může být v nějakých případech příliš velký a kvůli nedostatku kroutícího momentu na motoru tak zcela zamezit otáčení. [3; 19; 20; 21]

Efektivita pohybu pomocí pásů je přijatelná na volném sypkém povrchu, na ostatních však zaostává za jinými metodami. Jejich hlavní využití tak najdeme v aplikacích, kde by byl pohyb pro kolové či jiné roboty náročný z důvodů nedostatku trakce, nutnosti rovnoměrně rozložit váhu apod. Jedná se především o odvětví zemědělské produkce, vesmírného průzkumu, průzkum nebezpečných a nepřístupných míst (například při úniku nebezpečných látek) a policejní či armádní využití, jako je odminování, monitorování, pyrotechnické zákroky atd. [21; 22; 23; 24]

Roboty s pásy jsou už ze své podstaty náchylné k vibracím, boční profil pásu totiž obvykle bývá polygon s pohybujícími se vrcholy a většina takovýchto robotů nebývá vybavována tlumicími systémy. To omezuje maximální rychlost a dále snižuje efektivitu pohybu. Takovéto roboty jsou většinou děleny podle provedení na: s artikulovaným pásem a s neartikulovaným pásem (obr. 9). Artikulovaný pás (pás s proměnnou geometrií) je vybaven kloubem nebo jiným polohovacím mechanismem pro dodatečné pohyby viditelné v příloze 1. V obou případech však bývá mechanické provedení robotu poměrně jednoduché, nejčastěji se jedná o sadu paralelních pásů řízených diferenciálně. [20; 21]



Obr. 9 Pásový robot Nanokhod od ESA, upraveno dle [157]



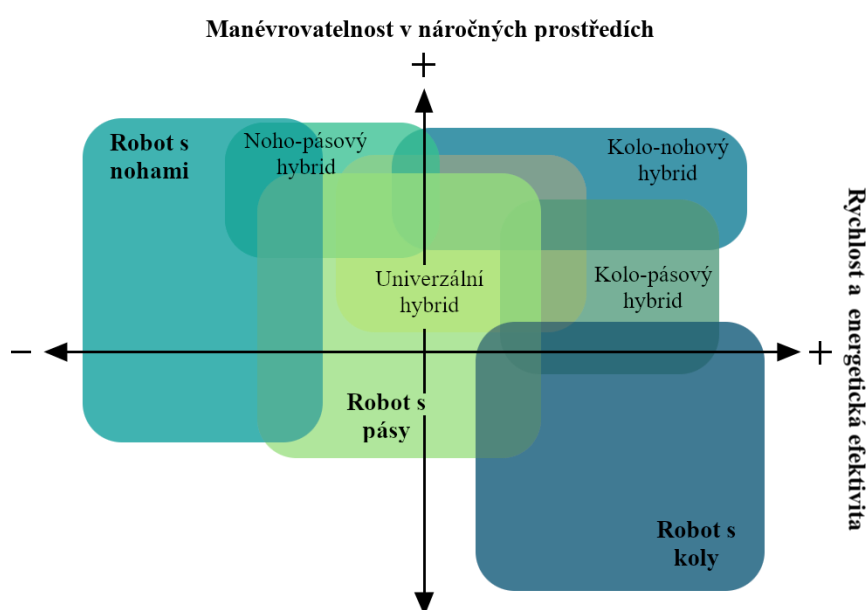
Obr. 10 Kolo-nohová konstrukce robotu, upraveno dle [158]

Hybridní mobilní roboty.

Hybridy jsou mobilní roboty, u kterých je pohybové ústrojí tvořeno více než jedním typem mechanismu (uvedených výše nebo na obr. 11). Tato řešení kombinují žádoucí vlastnosti využitých mechanismů při zamezení nebo omezení nežádoucích, jako je například efektivita kola a schopnost překonávat překážky při kráčení, a vytváří tak nové unikátní provedení se svými specifickými možnostmi reakce na okolí. Hybridní roboty bývají obvykle rozdělovány podle čtyř hlavních provedení: kolo-nohový, páso-nohový, kolo-pásový a univerzální. [3; 4; 25]

Kolo-nohový hybrid kombinuje efektivitu kola s flexibilitou končetiny, obvykle za účelem sestrojení robotu schopného překonávat schodiště a prahy dveří (viz obr. 10). Jejich konstrukční uzpůsobení lze rozdělit do tří základních kategorií [4; 26; 27]:

- K tělu robotu jsou přidány dodatečné končetiny. Tento přístup je dnes již téměř nevyužívaný, přestože je tento design robotu koncepčně velmi jednoduchý na zkonstruování. Instalace druhého separátního mechanismu pro pohyb totiž znamená markantní nárůst celkové váhy mobilního robotu. Oddělení pohybových ústrojí také znamená, že při pohybu pomocí noh není využívána efektivita kol.
- Využití zatahovacích modulů: Provedeno jako zatahovací kola nebo nohy, nevýhodou je náchylnost k čistotě a prašnosti prostředí, a nižší stabilita při rázovém zatížení. Adaptací tohoto provedení je však také transformace či pasivní úprava kola, ta může v závislosti na komplexnosti předcházet některým problémům.
- Umístění kol jako koncový článek končetiny. Kola jsou zde využívána namísto kotníku jako dodatečný stupeň volnosti pro nohu. Robot je tak schopen kráčet a zároveň využívat valení kol. Jedná se tedy o nejefektivnější z těchto tří způsobů, mnohé příklady jsou uvedeny v příloze 1.



Obr. 11 Porovnání lokomočních ústrojí využívaných v mobilní robotice, upraveno a přeloženo dle [4]

Hybridní mobilní roboty s nohama a pásy našly své využití především v obtížných prostředích, kde rychlost a efektivita pohybu není primárním cílem. Nejjednodušším provedením tohoto typu je využití více než jednoho páru pásů (obvykle dvou), kde každý přidáný pár je vůči hlavní konstrukci/kostře dodatečně mobilní. Takto uzpůsobené roboty jsou odolné a robustní, s pohybem podobným pásovým robotům, ale s lepší schopností překonávat překážky (obr. 12). [4]

Kolo-pásový hybrid je často využíván v aplikacích, které vyžadují dobrou mobilitu na sypkém a nerovném podloží, v kombinaci s úsporou energie při pohybu na pevné a rovné části povrchu (viz obr. 13). Transformace z kola na pás a obráceně nejčastěji probíhá změnou relativní pozice kola nebo tvaru pásu, obě tyto možnosti zpřístupňují nebo zamezují kolům kontakt se zemí. [4; 28]

Univerzální hybridy se vyznačují výbornou přizpůsobitelností naprosté většině pracovních prostředí. Jejich nevýhodou však bývá velká mechanická komplexnost a nedostatek vhodných využití. Možností konstrukčního provedení je bezpočet, nejčastěji se však jedná o čtveřici noho-pásovo-kolových článků. Existují však i případy, kde jsou kola umístěna na konci rotujících končetin, to je pozorovatelné na obrázku 14. [4; 29]

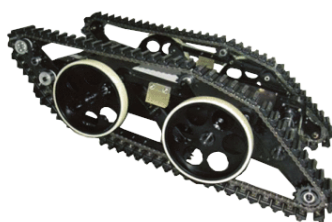
Další možná provedení.

V praxi se často objevují i další, zcela odlišné typy platforem, které se již nepohybují po zemi anebo využívají netradičních mechanismů pohybu:

- Bezpilotní letoun, běžně také známý jako dron, je robot, který je schopen provádět předem naprogramovaný úkol s nebo bez lidské interakce. Jeho konstrukce je inspirována principem helikoptéry nebo letadla. Drony jsou dnes již schopné vzlétat a přistávat zcela nezávisle na operátorech. Původně byly používány převážně v armádních aplikacích, díky své univerzalitě se ale rychle rozšířily i do dalších oblastí, jako jsou vědecké aplikace, zemědělství, rekreace, policejní a sledovací aplikace, doručování produktů, distribuce a logistika, letecká fotografie a mnoho dalších. Příklady dronů viz příloha 1. [3]
- Jednou z nejvíce rozvíjejících se oblastí mobilní robotiky jsou autonomní podvodní roboty. Ty nacházejí uplatnění v aplikacích jako jsou například námořní záchranné služby, oceánografie a offshore průmysl. Intervenční zákroky k provádění požadovaných úkolů v podmořských oblastech, které jsou normálně nepřístupné, mohou provádět ponorky s obsluhou (jejichž provoz však často bývá nákladný a nebezpečný) nebo právě dálkově ovládaná vozidla



Obr. 12 Hybridní noho-pásový robot, upraveno dle [159]



Obr. 13 Kolo-pásový hybridní robot, upraveno dle [160]



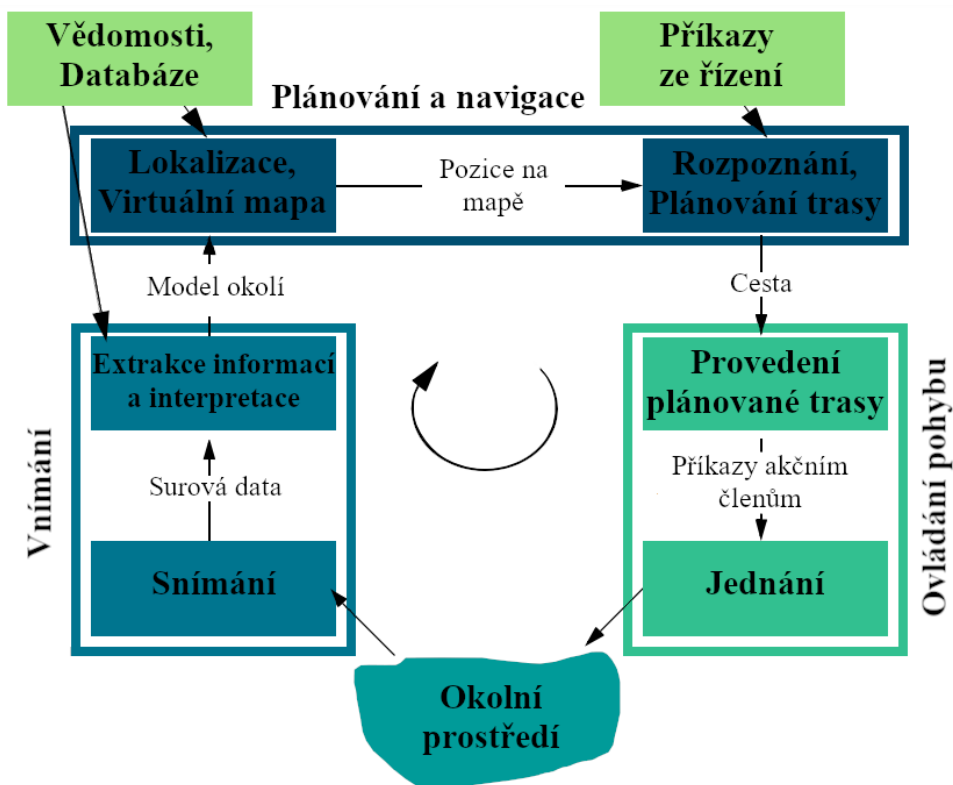
Obr. 14 AZIMUT univerzální hybridní robot, upraveno dle [161]

(vyobrazená v příloze 1). Ta bývají, stejně jako ponorky, vybavená robotickým ramenem. Na rozdíl o nich je však možné je provozovat téměř bez přestání. Nevýhodou stále zůstává potřeba drahého oceánografického plavidla s těžkým jeřábem, automatickým systémem správy kabelu (TMS) a systémem dynamického polohování (DP). [3; 30; 31]

Hadům podobné provedení robotů, viditelné v příloze 1, bývá vysoce artikulované. Takovéto mobilní roboty mohou koordinovat své vnitřní stupně volnosti k provádění různých typů pohybů, ze kterých je většina mimo možnosti konvenčních robotů s nohama nebo koly. Hlavní výhody těchto robotů spočívají v jejich všestrannosti a ve vykonání pohybů, které nejsou omezené na lezení, plazení a plavání. [3]

3.2 Systémový rozbor řízení mobilního robotu

Mobilní roboty jsou složité autonomní systémy navržené pro funkci v dynamických prostředích, kde je nutné se neustále přizpůsobovat měnícím se podmínkám. Řízení a celkově řídicí systém/smyčka těchto vozíků musí umožňovat jejich správnou funkci, zajišťovat co největší spolehlivost a včas reagovat na veškeré vnější podněty. Nejčastějším provedením je právě cyklická smyčka, kterou lze rozdělit na čtyři hlavní bloky: vnímání a chápání okolí; navigace, lokalizace, plánování a vyhýbání se překážkám; řízení a ovládání; interakce s okolním prostředím. Tato smyčka funguje na principu zpětné vazby, kdy se informace získané z prostředí pomocí senzorů postupně zpracovávají. Na základě předem zadaných pokynů a map se transformují do rozhodnutí, jež je pak s využitím motorů a jiných akčních členů přeměněno ve fyzické jednání. To má za následek změnu v okolí, a tak se nakonec nové informace z tohoto jednání vrací zpět do systému. Tento proces umožňuje robotu efektivně



Obr. 15 Referenční schéma řídicího systému mobilních robotů, upraveno a přeloženo dle [2]

navigovat v prostoru, adaptovat se na nové překážky a měnící se podmínky, a tím vykonávat požadované činnosti s určitou úrovní autonomnosti. [2; 32]

Schéma tohoto přístupu k řízení je představeno na obrázku 15. Jednotlivé podokruhy jsou dále rozebrány v následujících kapitolách. Existuje mnoho jiných systémových přístupů k řízení mobilních robotů, ve všech se však projevuje vzájemná provázanost jednotlivých událostí.

3.3 Vnímání a chápání okolí

Pro autonomní systémy, zejména pak mobilní roboty, je klíčové získávat informace o svém okolí i o sobě samých. To se provádí měřením pomocí různých senzorů, následným zpracováním získaných dat a extrahováním potřebných informací. [2; 3]

3.3.1 Senzory

Použití senzorů umožňuje provádět lokalizaci mobilních robotů v prostoru, ale také mapování a reprezentaci okolního prostředí a důležitých stavových veličin. Kromě toho jsou velmi užitečné v dalších robotických aplikacích, jako je například rozpoznávání objektů/strojové vidění. Nejmodernější využití sensoriky (obvykle ve spojení s umělou inteligencí) je v systémech rozpoznávání řeči, které hraje klíčovou roli při napodobování lidských interakcí. [2; 3]

Mobilní roboty využívají širokou škálu senzorů. Jednoduší z nich mohou sloužit k měření fyzikálních hodnot, jako je vnitřní teplota elektroniky nebo rychlost otáčení motorů. Sofistikovanější senzory jsou schopny získávat informace o okolí robotu nebo dokonce přímo měřit jeho globální polohu. Právě to je nejdůležitější funkce sensoriky vozíků, a proto je tato kapitola zaměřena převážně na senzory určené k získávání informací o okolním prostředí. Přestože se mobilní robot obvykle pohybuje v již zmapovaném prostředí, často se setká s nepředvídatelnými překážkami, což činí takovéto senzory obzvláště důležitými. [2; 3; 33]

Senzory lze klasifikovat podle dvou důležitých funkčních a konstrukčních rozhraní: proprioceptivní nebo exteroceptivní a pasivní či aktivní. [2]

- Proprioceptivní senzory měří hodnoty vnitřních systémů; například rychlost otáčení motoru, zatížení jednotlivých kol, úhly kloubů robotického ramene nebo napětí na baterii. [2]
- Exteroceptivní senzory získávají informace z okolního prostředí; například měření vzdálenosti od překážek, intenzitu světla nebo amplitudu či frekvenci zvuku. Měření z exteroceptivních senzorů robot interpretuje za účelem extrakce významných prvků z okolí. [2]
- Pasivní senzory měří energii z prostředí, která vstupuje do senzoru z okolí. Příkladem pasivních senzorů jsou teplotní sondy, mikrofony nebo CCD či CMOS kamery. [2; 34]
- Aktivní senzory naopak energii vysílají a následně měří odezvu prostředí. Díky možnosti řídit tuto interakci s okolím mohou aktivní senzory dosáhnout lepšího výkonu. Nicméně vysílání energie přináší i určitá rizika, protože je tak možno ovlivnit vlastnosti/veličiny, které senzor měří. Aktivní sensorika může také způsobovat interferenci: signály vysílané jinými blízkými roboty nebo podobnými senzory na stejném robotu mohou ovlivnit měření. Nejpoužívanějšími typy těchto senzorů jsou ultrazvukové senzory a laserové dálkoměry. [2]

Přehled nejpoužívanějších senzorů nalezneme v tabulce 3:

Tab. 3 Klasifikace a popis senzorů užívaných v mobilní robotice, upraveno a přeloženo dle [2]

Klasifikace - typické použití	Senzor či senzorový systém	Proprioceptivní či exteroceptivní	Aktivní či pasivní
tlakové senzory	kontaktní spínače a nárazníky	EC	P
- detekce kontaktu nebo přiblížení, bezpečnostní senzory	optické zábrany	EC	A
	bezkontaktní senzory přiblížení	EC	A
senzory kol a motorů - otáčky a poloha natočení	kartáčové enkodéry	PC	P
	potenciometry	PC	P
	resolvery	PC	A
	optické enkodéry	PC	A
	magnetické enkodéry	PC	A
	induktivní enkodéry	PC	A
	kapacitní enkodéry	PC	A
	kompasy	EC	P
	gyroskopy	PC	P
senzory směru - orientace vzhledem k referenci	inklinometry	EC	A
	GPS	EC	A
	optické nebo RF majáky	EC	A
	ultrazvukové majáky	EC	A
	reflexní majáky	EC	A
senzory pro měření vzdálenosti - reflektivita, doba odrazu nebo geometrická triangulace	senzory reflektivity	EC	A
	ultrazvukové senzory	EC	A
	laserové dálkoměry	EC	A
	optická triangulace (1D)	EC	A
	strukturované světlo (2D)	EC	A
senzory pohybu a rychlosti - rychlost vztažená k okolním objektům	Dopplerův radar	EC	A
	Dopplerův zvuk	EC	A
senzory založené na strojovém vidění - vizuální měření vzdálenosti, analýza obrazu, segmentace obrazu, rozpoznávání objektů	CCD/CMOS kamery	EC	P
	systémy vizuálního měření vzdálenosti	EC	P
	systémy sledování objektů	EC	P

Třídy senzorů uvedené v tabulce jsou uspořádány podle vzrůstající složitosti a klesajícího počtu aktivně využívaných instancí senzoru. Tlakové a proprioceptivní senzory jsou klíčové pro téměř všechny mobilní roboty, jsou dobře zmapovány, snadno použitelné a konstrukčně jednodušší. Na opačném konci, co se týče složitosti, poskytuje strojové vidění pomocí jedné nebo více kamer mnohé možnosti uplatnění, od vyhýbání se překážkám a lokalizace až po rozpoznávání lidských tváří, cenově se však ne vždy vyplatí. [2]

Těchto složitějších senzorů využíval v nemalé míře robot na misích Mars Exploration Rover. Používal strojové vidění k vytvoření lokální mapy terénu určené pro navigaci.

Dvě stereo kamery byly nepohyblivě upevněny na stožár, nahrazující tak pohyblivou kameru, z důvodu předejití poruchám. Stereo vidění je pasivní senzorová technologie, to znamená, že k provozu vyžaduje méně energie než aktivní senzor. [3]

Senzory je důležité charakterizovat pomocí základních proměnných popisujících výkon, jako je linearita, dynamický rozsah a rozsah měření, citlivost, rozlišení, přesnost, správnost, chybovost měření, systematické chyby, náhodné chyby, určitost a mnoho dalších. Tato problematika je velice komplexní, a proto mají informace uvedené v této práci čistě přehledovou funkci. Pro detailnější rozbor je autorem referován H.R. Everett a jeho *Sensors for Mobile Robots* [35], nebo R. Siegwart et al. a *Introduction to autonomous mobile robots* [2] společně s velmi podrobným popisem funkcí jednotlivých typů senzorů. [2]

3.3.2 Linearita a nelinearita

Senzor je považován za lineární, pokud je jeho odpověď y na měřený podnět x reprezentována lineární nebo afinní funkcí. Linearita hraje zásadní roli při interpretaci signálu. Vysoce nelineární senzory jsou obvykle složitější na modelování, šum zde má tendenci měnit se v závislosti na magnitudě měření. [33]

3.3.3 Dynamický rozsah a rozsah měření

Rozsah měření $[z_{min}, z_{max}]$ je určen nejmenšími a největšími hodnotami signálu, které je senzor schopný zachytit. Měřené veličiny ležící mimo tento interval nelze zaznamenat, nebo jsou měřeny s nepřijatelnými chybami. V některých případech jsou schopny senzor i poškodit. Poměr mezi z_{max} a z_{min} se nazývá dynamický rozsah, který se často vyjadřuje jako desítkový logaritmus, vynásobený 20 a měřený v decibelech. [33]

3.3.4 Citlivost

Citlivost senzoru je definována jako sklon d_y/d_x – jeho odezvy v . Určuje, jak moc se odezva senzoru změní v důsledku změny počtu měření. Efektivní senzor by měl mít vysokou citlivost, pro lineární senzory je citlivost měření konstantní. Senzor, který na určité změny vstupního signálu nereaguje žádnými změnami na výstupu, se nachází ve stavu přesycení. K tomu dochází například v případě, když pracuje mimo svůj rozsah měření. [33]

3.3.5 Rozlišení

Rozlišení je míra minimální změny měřeného signálu, která vyvolá detekovatelnou odezvu na výstupu senzoru. U lineárního, jednorozměrného, digitálního senzoru se rozlišení obvykle vyhodnocuje jako poměr dynamického rozsahu a počtu možných diskretních výstupních hodnot, které senzor poskytuje. Na obrázku 16 jsou znázorněny dvě možné rozlišení pro senzor poskytující dvourozměrný výstup. [33]

3.3.6 Přesnost

Přesnost je statistický parametr popisující reprodukovatelnost měření při neměnném měřeném signálu, u kterého by ideální senzor s nekonečnou přesností v průběhu času poskytoval stejný výstup. Skutečné senzory však místo toho poskytují rozsah hodnot, které jsou v čase statisticky rozloženy podle hustoty pravděpodobnosti (viz obr. 16). Obvykle se přesnost hodnotí s předpokladem, že toto rozložení je gaussovské, což umožňuje její vyhodnocení výpočtem rozptylu skupiny měření. [33]

3.3.7 Správnost

Správnost kvantifikuje shodu výstupu senzoru ve srovnání se skutečnou hodnotou měřeného signálu (obr. 16). Správnost lze určit jako rozdíl mezi průměrem měření stálého měřeného signálu a jeho skutečnou hodnotou; odhad skutečné hodnoty lze získat použitím senzoru s vyšší přesností nebo uskutečněním pečlivého experimentálního měření předem známých veličin. [33]

3.3.8 Šířka pásma

Šířka pásma senzoru bývá typicky reprezentovaná maximální frekvencí a kvantifikuje, jak senzor reaguje na vstupy s měnícími se frekvencemi. Senzor s nízkou šířkou pásma není schopen správně měřit vysokofrekvenční změny v měřeném signálu (například vibrace, pohyby atd.) Často bývá omezena horním limitem propustnosti, to má za cíl předejít nechtěnému měření vysokofrekvenčního šumu. [33]

3.3.9 Čas odezvy

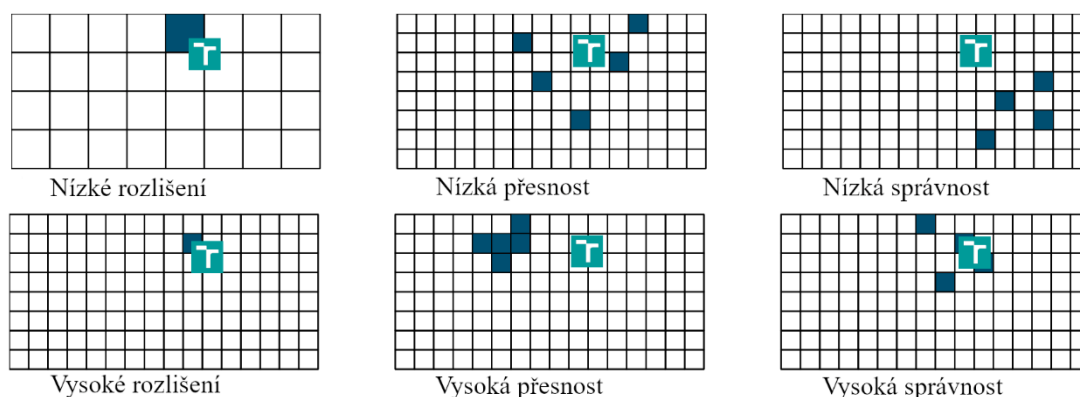
Doba potřebná pro obvod nebo měřicí zařízení vystavené změně vstupního signálu, aby upravilo svůj stav o určitou část své celkové odezvy ekvivalentní pro tuto změnu. [33]

Senzory tak lze považovat za okno z robotického řídicího systému do okolního světa. Žádný mobilní robot není schopen efektivně fungovat bez těchto zařízení a k nim přidruženého softwaru. Nejnovější oblasti vývoje těchto technologií, jako jsou drony a autonomní vozidla, jsou bez senzorů zcela nemožné. [3]

3.4 Navigace, lokalizace, plánování a vyhýbání se překážkám

Navigace mobilního robotu je schopnost jednat na základě neúplných znalostí o okolním prostředí a aktuálních informací získaných ze senzorů za účelem dosáhnout předem určených cílových pozic co nejefektivněji a nejspolehlivěji. Během vývoje mobilní robotiky bylo navrženo mnoho různých přístupů k navigování, a přestože se tyto přístupy na první pohled mohou lišit, ve skutečnosti všechny vycházejí ze stejných parametrů. Klíčovým rozdílem mezi jednotlivými architekturami navigace je způsob, jakým rozkládají tento obsáhlý problém na menší, jednodušší řešitelné podproblémy. Vždy je však nutné robotu poskytnout alespoň nějaké minimum informací. O tom jaké, rozhoduje právě zvolená navigační architektura. [2; 3]

K úspěšné navigaci skrze prostředí je však potřeba čtveřice klíčových schopností: správná interpretace dat ze senzorů (kapitola Vnímání a chápání okolí), lokalizace robotu v prostoru, plánování nové trasy k cíli a vyhýbání se překážkám, na které robot narazí během cesty.



Obr. 16 Vizualizace rozdílu mezi rozlišením, přesností a správností, upraveno a přeloženo dle [33]

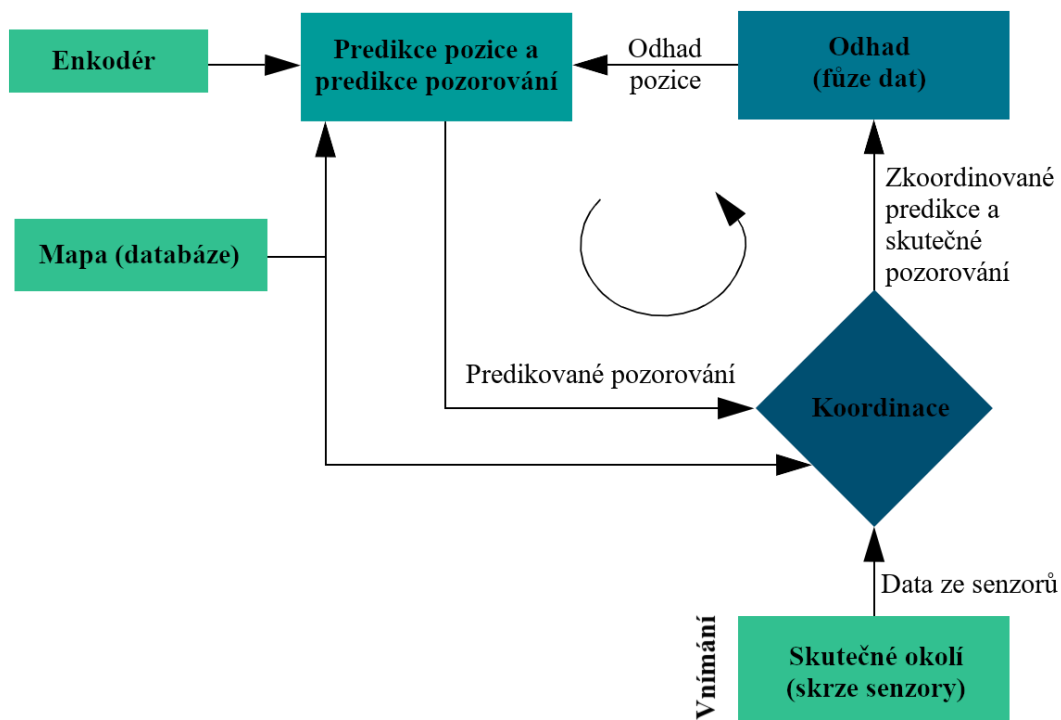
3.4.1 Lokalizace

Aby se vozík mohl pohybovat prostorem, musí nejdříve určit svou polohu. Lokalizace (spolu s vnímáním a řízením pohybu) je tak důležitým problémem v navigaci robotů. Lokalizace úzce souvisí s reprezentací okolí v systému robotu. Pokud by bylo možné na robot nainstalovat přesný GPS systém, který vždy naprosto bezchybně určí jeho aktuální polohu, nebylo by nutné lokalizaci komplikovaně řešit. Bohužel nynější systémy nejsou pro takovou aplikaci finančně dostupné, nebo nejsou dostatečně přesné a responzivní. [3]

Pod pojmem lokalizace je zahrnuta nejen informace o absolutní poloze robotu v pracovním prostoru, ale také jeho relativní poloha vztahená k požadovanému cíli. Za tímto účelem vozík zcela logicky potřebuje informace o vzhledu svého okolí neboli mapu. V praxi je tak poloha robotu vztahena nikoli k reálné pozici v prostoru, ale právě k reprezentaci tohoto prostoru prostřednictvím mapy. [2; 3]

Senzory jsou tak zásadním prostředkem pro úspěšné lokalizování robotu, jakákoli nepřesnost a neúplnost v popisu okolí tento proces negativně ovlivní. Také šum a nejistoty senzoru snižují užitečné informace, chyby by ideálně měly být zcela minimalizovány. Správná lokalizace tak tvoří pevný základ k úspěšnému fungování robotu. Právě na základě ní se snaží změnit svou polohu a určit, jestli dosáhl cíle. [3]

Klíčovou otázkou pro lokalizaci na mapě je právě reprezentace samotné mapy. Během let bylo vyvinuto bezpočet způsobů, jak zaznamenat reálný svět do virtuální mapy, z nichž mnohé byly použity při plánování cest. Při volbě reprezentace je nejdůležitější sjednotit požadovanou úroveň detailu se schopnostmi vozíku, stejně tak i rozlišení mapy a rozlišení senzorů robotu. Všechny charakteristiky reálného světa však není možné (a většinou ani výhodné) přesně zobrazovat v mapách použitelných v mobilní robotice. Reprezentace je tak jednou z nejvíce vyvíjejících se částí robotiky. Obsáhlým zdrojem aktuálního poznání společně s bezčetnými příklady lze najít v *Survey of maps of dynamics for mobile robots* od T. Kuncer et al. [36].



Obr. 17 Lokalizační smyčka při použití statické (neproměnné) mapy, přeloženo a upraveno dle [2]

Největší překážkou je schopnost jednoduše rozlišovat mezi statickými a dynamickými překážkami. Reálný svět je neustále v pohybu, to má za následek, že překážky se v praxi obvykle pohybují. Problémy zde způsobuje jak aktivní pohyb překážek přímo před robotem, tak přesun překážek „na pozadí“. Ve většině případů je mapa v robotu uložena jako statický (neproměnný) objekt (viz obr. 17), takže náhlý přesun například bedny, podle které je robot naučený se orientovat, může způsobit kompletní ztrátu lokalizace. Robustnější systémy proto využívají prvků dynamické údržby mapových podkladů (obráz. 18), nejčastější je SLAM navigace (Simultaneous Localization and Mapping). Odhadování vektorů pohybu dynamických objektů za účelem vyhnutí se kolizi (odborně označováno jako sledování a predikce) je stále důležitou částí výzkumu a vývoje mobilní robotiky a nejdůležitější otázkou týkající se bezpečnosti sdíleného provozu robotů a lidí. Další výzvou jsou otevřené prostory, jako například prázdná parkoviště, pole a vnitřní atria. Ty představují problém kvůli velmi řídké hustotě zachytných bodů, podle kterých je robot schopný určit svou pozici. [2; 3; 36]

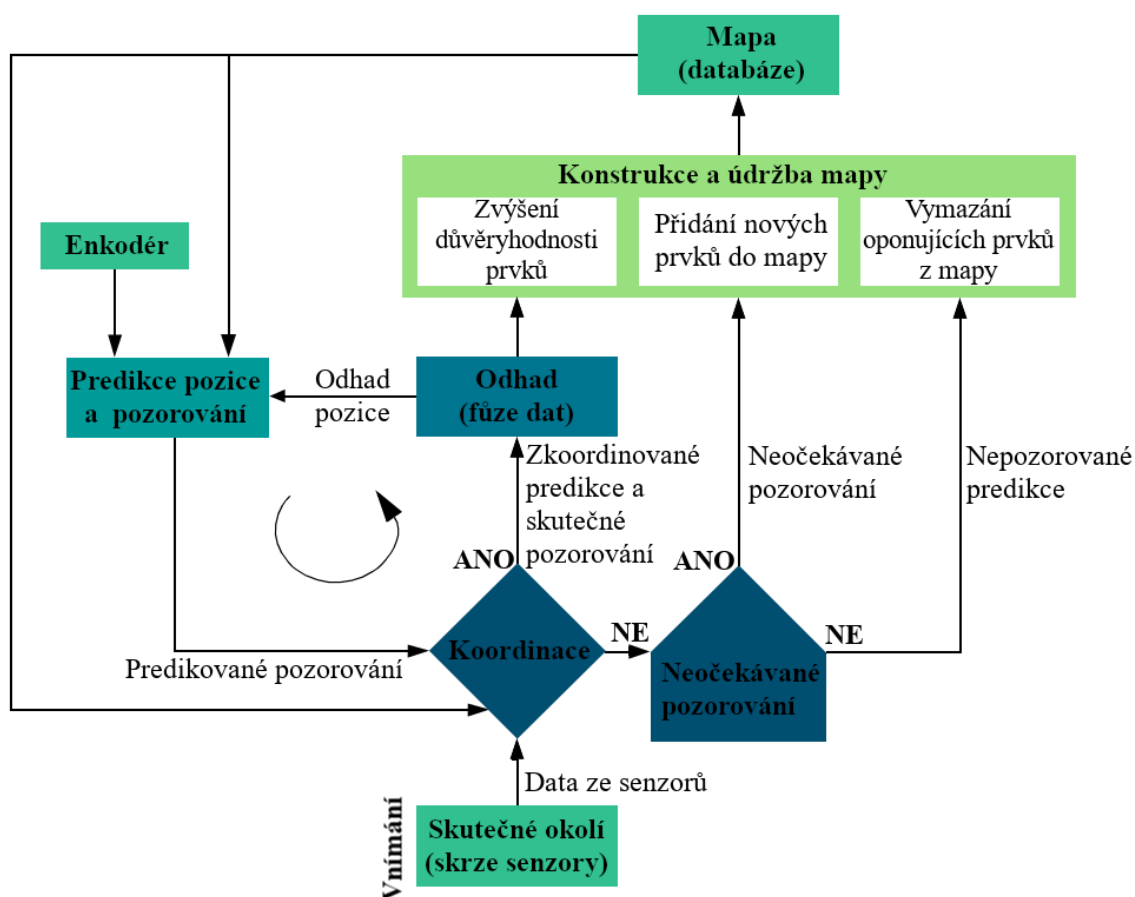
Jedním z nejrevolučnějších přístupů k lokalizaci je přestat roboty lokalizovat úplně, odborně nazývána jako behaviorální navigace, jejíž podstata spočívá ve stanovení podmínek, které robot během pohybu neustále následuje (např. při pohybu z *A* do *B* vždy jed' nalevo od stěny, při pohybu z *B* do *A* vpravo). Hlavní výhodou tohoto přístupu je, že může být rychle implementován v prostředí, které není zcela známo, avšak s omezeným počtem cílových pozic. Tento přístup však trpí několika velkými nevýhodami [2]:

- Metoda není snadno přenositelná do odlišných nebo větších prostředí. Sekvence příkazů pro navigaci je často specifická pro konkrétní místo, takže při přesunu robota do nového prostředí je třeba opět provést rozsáhlé programování a ladění.
- Základní procedury, jako například sledování levé stěny, musí být pečlivě navrženy a zkoumány v daném prostředí, mají-li vést k požadovanému chování. To může být časově náročné a silně závislé na konkrétním hardwaru robota a charakteristických vlastnostech okolí prostředí.

- System založený na těchto jednoduchých podmínkách může mít v jeden okamžik více aktivních módů chování. Toto je spíše výhoda než nevýhoda. Bohužel je však jednotlivá chování nutno vyladit pro optimalizaci výkonu a správné funkce. Jejich fúze a rychlé přepínání mezi nimi může toto ladění negovat. Přidání každého nového profilu chování může vyžadovat přeladění všech stávajících.

Na rozdíl od behaviorálního přístupu musí přístup založený na mapě obsahovat jak kognitivní (senzory), tak lokalizační prvky. Robot se zde musí explicitně lokalizovat tím, že sbírá data ze senzorů a aktualizuje svou představu o své poloze vzhledem k virtuální mapě prostředí, kterou má již uloženou. Nedostatkem zde bývá nesouhra mapy v robotu s reálným prostředím. Nejdůležitější výhody tohoto přístupu jsou [2]:

- Explicitní koncept lokalizace na mapě umožňuje transparentní dostupnost informace o poloze robotu pro lidské operátory (například při koordinaci s vysokozdvihnými vozíky na křižovatkách).
- Existence mapy slouží jako médium pro komunikaci mezi člověkem a robotem. Robotu lze jednoduše dodat novou mapu, pokud se nachází v novém prostředí. Veškeré rutiny (např. nájezd k dopravníku) naučené na staré mapě budou po drobné úpravě schopné fungovat i na nové.
- Mapu (vytvořenou robotem) mohou využít i lidé, čímž je dosaženo oboustranného užítkování. To dosáhlo až extrémní popularity v oblasti zemědělství, kde je pomocí monitorovacího dronu vytvořena mapa, kterou následně využívají autonomní (kvůli legislativě ale stále pod dozorem lidského operátora) traktory [37].



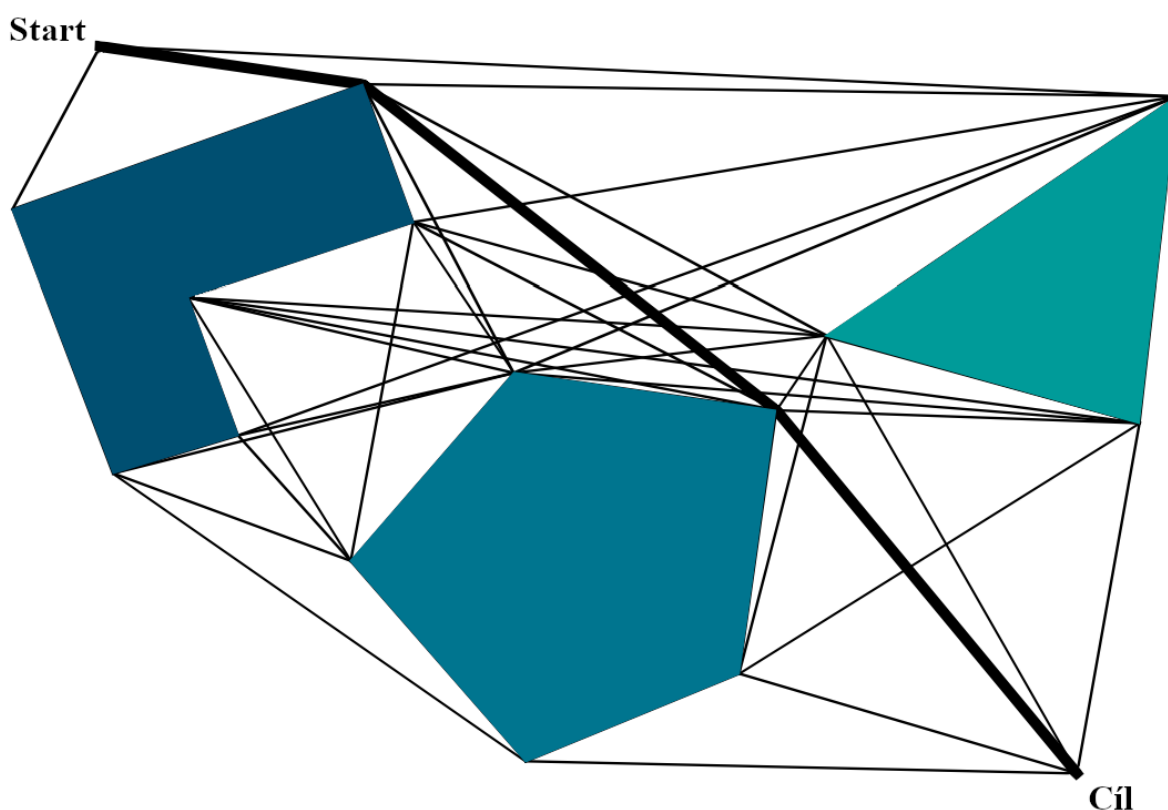
Obr. 18 Lokalizační smyčka při použití dynamické (proměnné) mapy, přeloženo a upraveno dle [2]

Přístup založený na mapě vyžaduje více úsilí na začátku projektu. Je potřeba zcela vytvořit navigační systém pro mobilní robot. Tento přístup avšak poskytuje architekturu, která může úspěšně pracovat a navigovat v různých prostředích, čímž se v delším časovém úseku snižují náklady na vývoj. [2]

3.4.2 Plánování

Celý proces plánování spočívá v nalezení trajektorie, která umožní robotu dosáhnout cílové pozice. To představuje strategický problém, při kterém robot rozhoduje o tom, jak se dlouhodobě chovat pro dosažení svých cílů. Tato problematika předchází využití mobilních robotů, plánování trajektorie bylo totiž velmi zkoumanou oblastí zejména kvůli jejímu využití v oblasti robotiky pro víceosé manipulátory. U manipulátoru se šesti stupni volnosti je naplánování trasy mnohem složitější než u diferenciálního robotu, který se pohybuje v rovném prostředí. Ačkoliv se tak v mobilní robotice můžeme inspirovat technikami vyvinutými pro manipulaci, algoritmy u mobilních robotů jsou často jednodušší vzhledem k výrazně sníženému počtu stupňů volnosti. Víceosé manipulátory také často pracují při maximální možné rychlosti kvůli produktivitě výrobní linky, proto je při plánování trajektorie významná nejen jejich kinematika, ale i dynamika, to problém dodatečně komplikuje. V porovnání s tím je většina mobilních robotů tak pomalá, že dynamika při plánování nehraje žádnou roli, to problematiku dále zjednodušuje. V dalších podkapitolách jsou uvedeny některé příklady nejvyužívanějších typů plánovacích algoritmů [2; 3]:

- Přístupy předem určené cesty zaznamenávají spojitost okolního prostoru robotu pomocí sítě 1D křivek nebo přímek. Tyto cesty pak tvoří síť pro plánování pohybu tak, že výsledná cesta je spojením výchozí a cílové pozice. Tyto metody rozdělují okolní prostor na základě překážek tak,

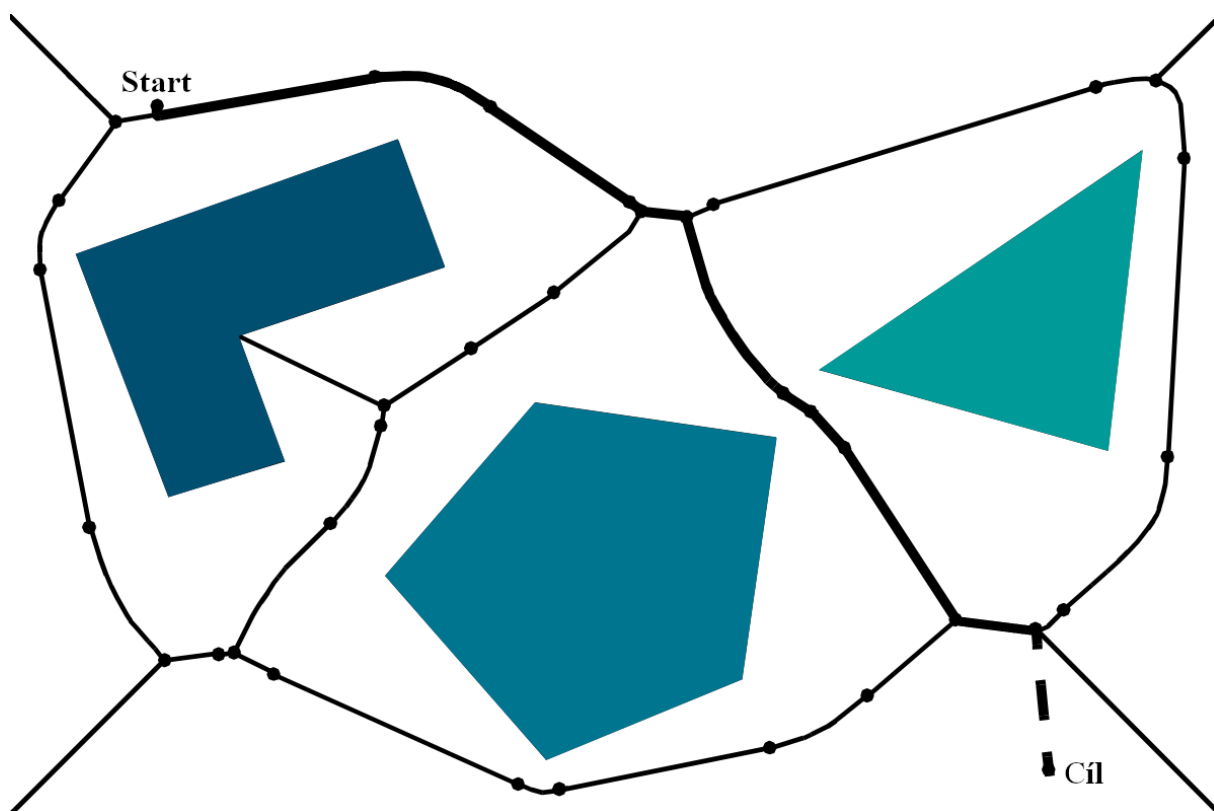


Obr. 19 Graf viditelnosti, přeloženo a upraveno dle [2]

aby celkový počet cest schopný ho pokrýt celý byl co nejmenší. Existují dva hlavní typy: graf viditelnosti a Voronoiho diagram. [2]

- Graf viditelnosti z obrázku 19 využívá reprezentaci prostoru pomocí polygonů. Ze začátečního bodu se pomocí přímek vytvoří spojnice se všemi viditelnými rohy, to samé se následně provádí ze všech takto propojených rohů, dokud není celý prostor zmapován. Výslednou cestou je pak nejkratší možné spojení využívající vytvořené přímky. Tento přístup je pro jednoduché modely rychlý a efektivní, u větších s sebou však přináší některé komplikace: počet hran a rohů roste s počtem polygonálních překážek. Druhý a závažnější problém je, že takto nalezené cesty vždy vedou robot přímo na rohy překážek. [2]
- Voronoiho diagram (vyobrazen na obr. 20) je metoda, která v porovnání s grafem viditelnosti maximalizuje vzdálenost robotu od překážek. Každému bodu ve volném prostoru je přiřazena vzdálenost k nejbližší překážce. Body, které jsou stejně vzdálené od dvou či více překážek, tvoří Voronoiho diagram, jedná se tak prakticky o obálky překážek. Algoritmy hledající cesty ve Voronoiho diagramu zaručují, že cesta existuje, často ale nejsou optimální, co se týče délky či využitelnosti cesty. Právě díky této maximální možné vzdálenosti od překážek nemusí senzory vozíku detekovat průjezd okolo překážek a může tak dojít ke ztrátě lokalizace. [2]

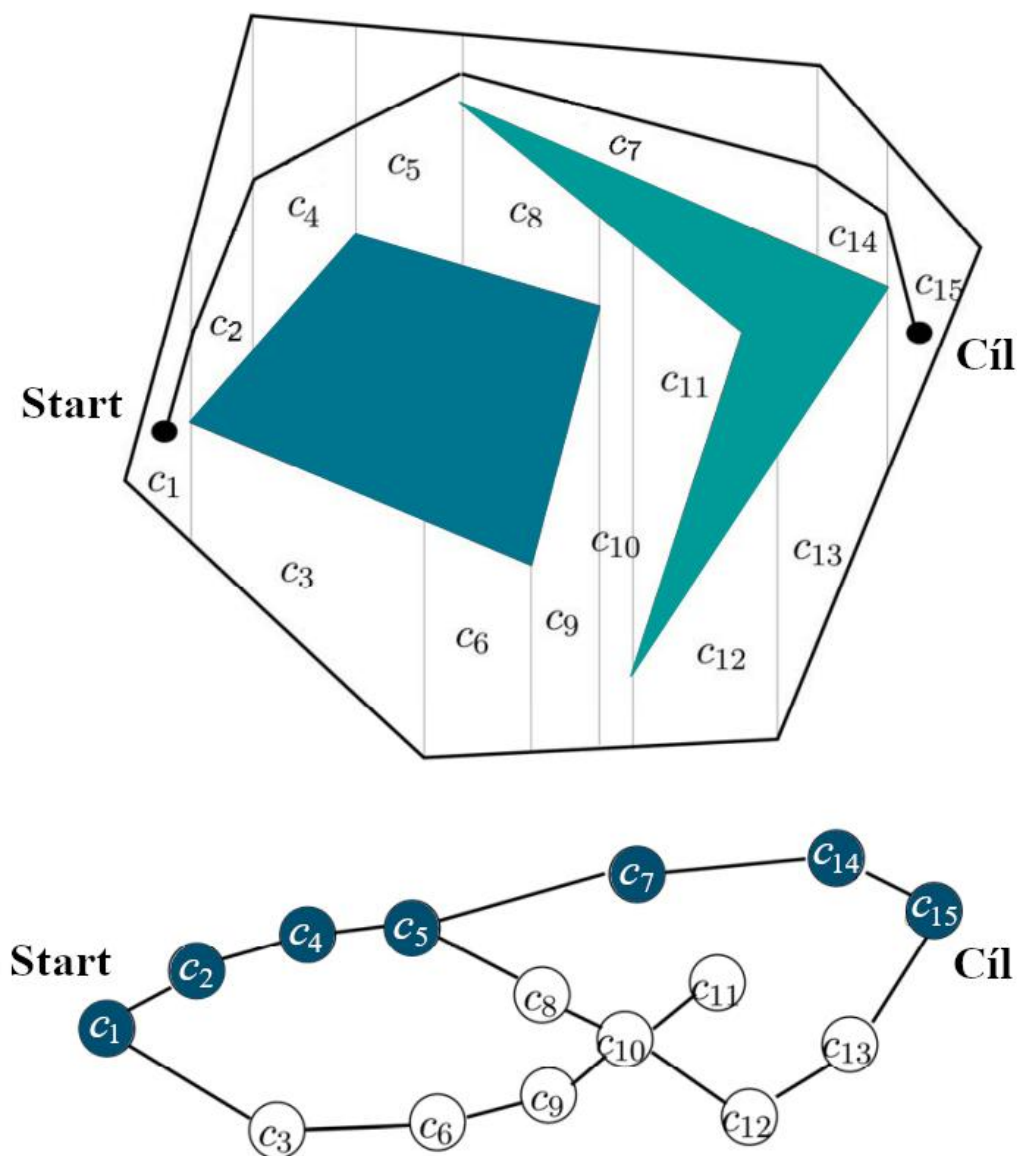
- Základem rozkladu prostoru na buňky je rozlišit mezi buňkami, které představují volný prostor, a oblastmi, které jsou obsazené objekty, viditelné na obrázku 21. Základní algoritmus plánování cesty pomocí rozkladu prostoru na buňky začíná rozdělením prostoru na jednoduché propojené oblasti pomocí rovnoběžných přímek. Každá z nich prochází právě jedním rohem. Je určeno, které otevřené buňky spolu sousedí, a tím je vytvořen graf propojení. Začíná se s buňkami, ve kterých se nacházejí počáteční



Obr. 20 Voronoiho diagram, přeloženo a upraveno dle [2]

a cílové body, a následně je v grafu nalezena propojovací cesta, která je spojí. Z takto definované sekvence buněk je vypočítána cesta v každé buňce například tak, že prochází středy hranic buněk. [2; 38]

Metoda potenciálového pole považuje robot za bod pod vlivem umělého potenciálového pole. Ten se pohybuje podle tohoto pole podobně jako míč kutálející se z kopce. Cíl (globální minimum) působí na robota jako přitažlivá síla a překážky (lokální maxima) jako odpudivé síly. Takovéto umělé potenciálové pole hladce vede robot směrem k cíli a současně mu umožňuje vyhýbat se známým překážkám. Je však důležité poznamenat, že tato metoda nenabízí pouze plánování trajektorie. Výsledné pole představuje také řídicí zákon vozíku, pokud se dokáže lokalizovat ve vztahu k mapě a potenciálovému poli, může vždy určit svůj další potřebný pohyb. [2; 39]



Obr. 21 Metoda rozkladu do buněk, přeloženo a upraveno dle [39]

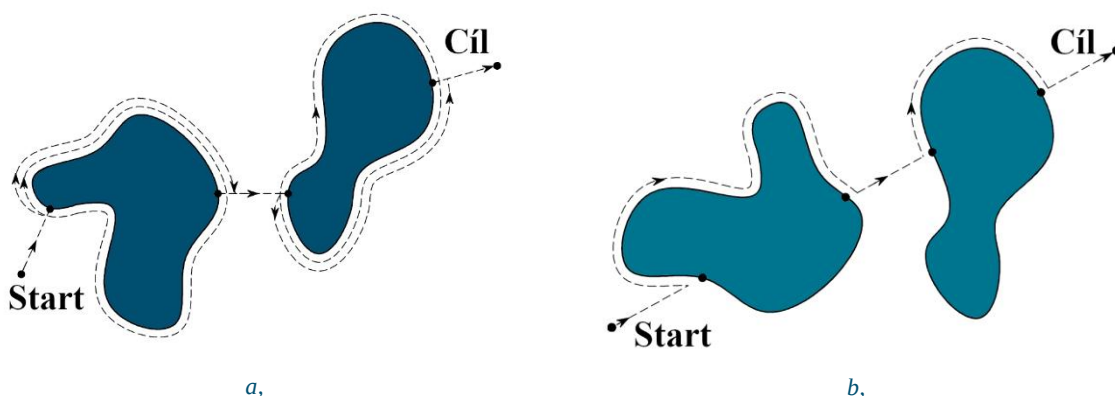
- A*, Dijkstrův algoritmus a Greedy algoritmus:
Všechny tyto algoritmy rozdělují prostor na mřížku, ve které jsou průchozí pouze buňky, které neprochází překážkami. Proces plánování trajektorie vždy zahrnuje přiřazení určité váhy (nebo penalizace) jednotlivým buňkám, přičemž způsob tohoto přiřazování se liší podle konkrétního algoritmu. Dijkstrův algoritmus začíná (na rozdíl od D*) u robotu a každému následujícímu poli přiřazuje vyšší váhu. Toto přiřazování probíhá ve všech směrech bez ohledu na polohu cíle, výsledná trasa je složena z polí s co nejnižší možnou hodnotou. Greedy algoritmus již zohledňuje směr, ve kterém se nachází cíl, a proto přiřazuje nižší váhy polím ve směru k němu. Při prozkoumávání však nezohledňuje již prošlá pole, což může vést k neoptimálním trasám (zejména u konkávních překážek, kde by se musel vracet). A* je nejznámější a nejpoužívanější z těchto algoritmů. Zohledňuje směr k cíli a zároveň bere v úvahu již prošlá pole, což umožňuje dynamickou úpravu trasy během výpočtu. Trasa generovaná algoritmem A* je tedy již značně optimalizovaná. [3; 40]

3.4.3 Vyhýbání se překážkám

Vyhýbání se překážkám znamená změnu místní trajektorie robotu na základě informací ze senzorů získaných během pohybu. Výsledná trajektorie je tak kombinací aktuálních (či nedávných) dat ze senzorů a jeho relativní a absolutní polohy vzhledem k cíli. Algoritmy používané pro vyhýbání se překážkám často spoléhají na existenci globální mapy (reprezentace) a na přesné znalosti polohy robotu ve vztahu k mapě (lokalizace), není tomu tak však vždy. [2; 3]

Algoritmy na základě mapy závisí na geometrických modelech nebo topologických mapách prostředí. Tím, že vozík vždy zná svou aktuální polohu ve zmapovaném okolním prostředí, může detekovat kolize výpočtem vzdáleností. Zvolená reprezentace prostředí má velký vliv, protože určuje charakteristiky odpovídajícího algoritmu pro vyhýbání se překážkám. [41; 42; 43]

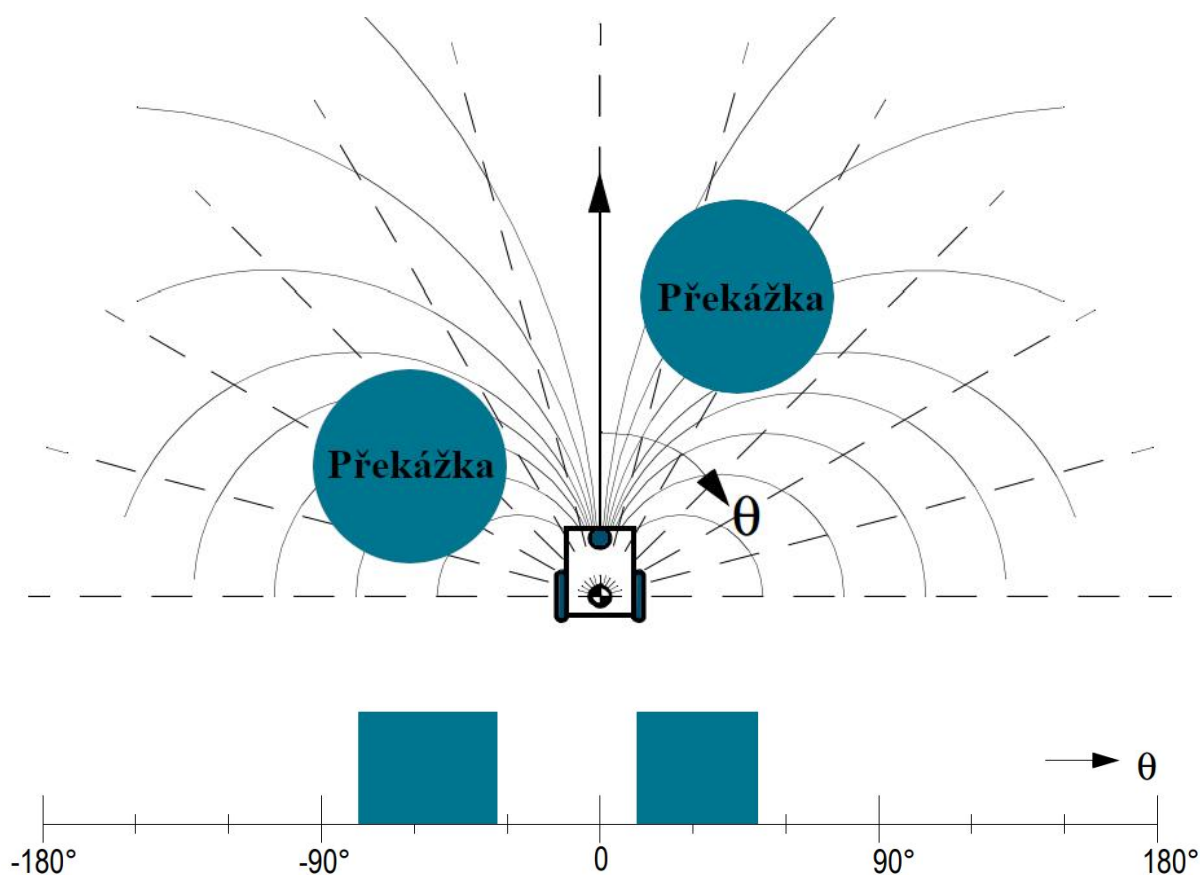
Metody, které nepoužívají žádnou explicitní reprezentaci prostředí, spoléhají na senzory pro pozorování prostředí. Například histogram vektorového pole a přístup pomocí dynamického okna jsou algoritmy, které dobře fungují s ultrazvukovými senzory a LiDAR skenery. Vzdálenosti zde lze získat přímo ze senzorů, kontrolér je tak snadno může použít nejprve pro detekci překážek a následně pro vyhnutí se kolizím. [2; 3]



Obr. 22 Ukázky algoritmu Bug1 (a) a Bug2 (b), upraveno a přeloženo dle [45]

Některé z nejznámějších algoritmů pro vyhýbání se kolizím:

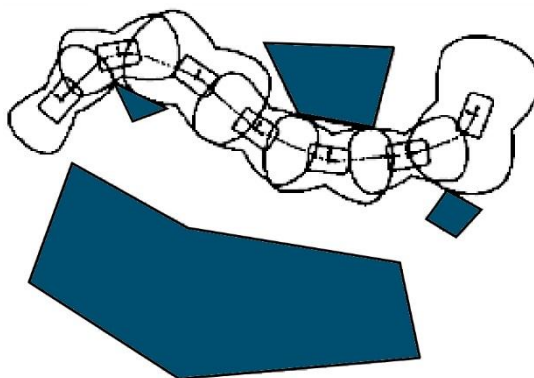
- Bug algoritmus: Jeho hlavní funkcí je sledovat obrys překážek nacházejících se v cestě robotu a obcházet je. Jedná se tak nejspíše o nejjednodušší algoritmus pro vyhýbání se kolizím. Základní myšlenka spočívá v tom, že robot následuje obrys každé překážky, která mu stojí v cestě, a tím ji objede. U algoritmu Bug1 robot nejprve celý objekt objede a pak se vydá směrem k cíli z bodu, který má k němu nejkratší vzdálenost (obr. 22.a). Tento přístup je velmi neefektivní, ale spolehlivě zaručuje, že robot dosáhne jakéhokoli dosažitelného cíle. Při použití Bug2 vozík začne následovat obrys objektu, ale odkloní se, jakmile může pokračovat po spojnici mezi příjezdovým bodem a cílem (obrázek 22.b). Tato vylepšená verze má obvykle mnohem kratší celkovou cestu, přesto lze najít mnoho situací, ve kterých je i Bug2 neefektivní. Existuje také řada dalších variací a rozšíření algoritmu Bug, například Tangent Bug. [3; 44; 45; 46]
- Metoda histogramu vektorového pole vytváří lokální mapu pracovního prostředí kolem robotu ve formě 2D histogramové mřížky. Ta je představena na obrázku 23 nahoře, a je naplněna pouze relativně nedávnými údaji ze senzorů. Následně je zjednodušena na jednu dimenzi a vzniká tak polární histogram (osa x představuje úhel, pod kterým byla překážka nalezena, a osa y představuje pravděpodobnost, že se pod tímto úhlem skutečně nachází). Sektory v polárním histogramu zobrazují hustotu překážek a trajektorie je určena výběrem sektoru s nejmenší hustotou těchto překážek (viz obr. 23 dole). Mapa modelovaná histogramovou mřížkou je neustále obnovována pomocí dat ze senzorů. [47]



Obr. 23 Metoda histogramu vektorového pole, přeloženo a upraveno dle [162]

- , Přístupy pomocí dynamického okna: Základním principem je řízení v imaginárním rychlostním prostoru. Trajektorie je zde tvořena sekvencí kruhových oblouků, které jsou definovány pomocí rychlostního vektoru translační a rotační rychlosti. Prostor, ve kterém lze hledat nové možné trajektorie, je tak zjednodušen vytvořením dynamických oken, která zohledňují trajektorii tvořenou kruhovými oblouky a definovanou rychlostním vektorem, a mohou být dosažena v rámci následujícího vzorkovacího období (při zohlednění akcelerace, které je robot schopen). Dalším krokem je výběr vhodného dynamického okna, které zaručuje, že se vozík může zastavit před tím, než narazí do překážky. [48; 49]
- , Metoda bublinového pásu: Bublina je zde definována jako maximální lokální podmnožina volného prostoru kolem dané konfigurace robotu, kterou je možné projít jakýmkoli směrem bez kolize. Generuje se pomocí zjednodušeného modelu vozíku ve spojení s informacemi o dosahu, dostupnými v mapě. I při použití zjednodušeného modelu geometrie je možné zohlednit skutečný tvar robotu při výpočtu velikosti bubliny. Ze série těchto bublin může být vytvořen pás podél trajektorie z počáteční k cílové pozici, pozorovatelný na obrázku 24, tím se zobrazí očekávané volné prostory během cesty. Jakmile kontrolér určí počáteční trajektorii a je vypočten bublinový pás, následuje její úprava. [50]
- , Metoda diagramu přiblížení využívá rozdělení analyzovaného prostoru na menší, jednodušeji vyhodnocované prvky, tím se značně podobá přístupu pomocí histogramu vektorového pole. Rozděluje pracovní prostředí na různé oblasti, které reprezentují polohu překážek a k vyhodnocení trajektorie následně využívá předdefinované skupiny stavových podmínek sestávající z různých problémů a jejich odpovídajících řešení. [51; 52]

Mezi další metody patří například: křivosti rychlostí, metody potenciálových polí, Schlegelův přístup, ASL přístup, metoda gradientu, přidávání dynamických podmínek, fuzzy a neurofuzzy přístupy, metody inspirované přírodou operující s neurální sítí a mnoho dalších. Obecné vyhodnocení všech zde uvedených metod lze nalézt v *Introduction to autonomous mobile robots*. od R. Siegwart, I.R. Nourbakhsh a D. Scaramuzza [2], tab. 6.1 na str. 287. [2]



Obr. 24 Metoda bublinového pásu, upraveno dle [50]

3.5 Řízení a ovládání

Všechny akční členy každého mobilního robotu vyžadují nějakou formu řízení, bez ní není robot jako celek schopný vykonávat žádné kontrolované pohyby či akce. Řídicí systém před vykonáním jakéhokoliv pohybu nejdříve vezme v potaz stav okolí (kapitola Senzory) společně s požadovaným zadáním úkolu (kapitola Plánování). Tyto informace jsou algoritmicky přepracovány v odpovídající příkazy, které jsou následně odeslány příslušným akčním členům, které pak pohybuje mechanickou strukturou robotu. Algoritmy, použité pro plánování pohybu, společně s dalšími prvky umělé inteligence, slouží jako pevné základy k určení toho, jak by měl robot interagovat s okolním prostředím: kontrolér například určuje, jak splnit požadovaný úkol bez srážky s překážkami, pádu apod. Toto řízení však musí pokrýt všechny různé podmínky pohybu na neomezeném množství kombinací překážek a limitací. Je proto nutné, aby řídicí struktura byla značně univerzální a robustní. V následujících letech se očekává aktivnější zapojení umělé inteligence a předem nacvičených sítí do zpracování informací, které robot shromažďuje, a při řízení ve více nestandardních situacích, které vychází z nově využívaných pohybových modelů (například pohyb několika vozíků/dronů v roji). [3; 32]

Roboty mají nelineární dynamiku, nelineární řídicí systémy využívají znalostí a předem definovaných parametrů systému k reprodukci a ovlivňování jeho chování. Nejběžnějším příkladem nelineárního ovládacího systému je termostat topení. Kotel je zde buď zapnutý nebo vypnutý (bez lineárního ovládání teploty). Vytápění se zapne, když teplota klesne pod předem stanovenou minimální hodnotu, a vypne, když dosáhne nastavené maximální teploty. Tento cyklus kolísání kolem požadované hodnoty je pro podobně řízené systémy typický. Nelineární řízení, odhadování korekce a pozorování reakcí na podněty vedou ke složitým algoritmům pro ovládání/sledování polohy robotu. Je zde nutno si definovat pozorovací chybu za účelem kategorizace a hodnocení řídicího modelu. Podle způsobu, jakým je tato chyba počítána a sledována, lze modely rozdělit do mnoha řídicích strategií uplatnitelných v mobilní robotice: [3; 53]

- Řízení založené na globální linearizaci: Tyto metody převádějí nelineární dynamiku do ekvivalentního, avšak lineárního stavového prostoru. Kontroléry používají zpětnou vazbu z tohoto stavu při řešení souvisejícího problému odhadu korekce. [3]
- Řízení založené na přibližné linearizaci: V těchto systémech jsou řešení problému nelineárního řízení dosažena pomocí výpočtů v lokálních lineárních modelech získaných z lokálních rovnovážných stavů. Lokální lineární modely musí být vytvořeny tak, aby zajistily stabilitu kontrolérů. Ty by pak měly být parametrizovány tak, aby celá řídicí smyčka byla stabilní a odolná vůči poruchám a nejistotám modelu. [3]
- Řízení založené na Lyapunovově teorii se snaží najít takové minimum Lyapunovových funkcí, aby byla zajištěna asymptotická stabilita řídicí smyčky. Lyapunovovy metody mají dva hlavní směry: metoda linearizace a Lyapunovova přímá metoda. Metoda linearizace poskytuje základ pro použití dalších lineárních metod řízení. Při jejím využití je nelineární systém lokálně stabilní, právě pokud všechny vlastní hodnoty jeho lineární aproximace leží v levé polorovině. Pokud alespoň jedna vlastní hodnota lineární aproximace leží v pravé polorovině, je celý systém nestabilní. Lyapunovova přímá metoda se opírá o základní vlastnosti termomechaniky: máme-li systém, jehož celková energie je neustále spotřebovávána, musí se nakonec ustálit v rovnovážném bodě (nebo lokálním miminu). Není však zřejmé, jak vybrat funkci,

která nejlépe popisuje kinetickou a potenciální energii řízeného systému. Cíle návrhu řízení se tak snaží definovat jednotlivé vlastnosti systému, což často usměrňuje vývoj Lyapunovovy funkce. [3; 54]

V průběhu let bylo vyvinuto několik specifických řídicích strategií, které jsou využívány pro dosažení požadovaného chování systému. Tyto strategie se snaží přizpůsobit nelineárním charakteristikám robotů v reálném čase a kompenzovat nejistoty a rušení. Každá z těchto metod pracuje s ohledem na jiné podmínky a požadavky specifických aplikací:

- Metoda řízení vypočítaného momentu: ten je definován pomocí druhých derivací aktuální polohy, požadované finální polohy a matice hmotnosti, vyjádřených se zpětnou vazbou. Většina řídicích strategií vyvinutých v posledních letech má své kořeny právě v řízení vypočítaného momentu. [3; 55]
- Robustní metody řízení: ty jsou podobné metodám řízení vypočítaného momentu, dodatečně však obsahují robustní zpětnovazební složku, která závisí na libovolné, malé a kladné konstantě. [3; 55]
- Metody řízení ve skluzovém režimu: zvyšováním frekvence kontroléru donutí systém „sklouznout“ po celém rozsahu, který využívá při své normální funkci. Při správném využití a změně hodnoty vychýlení (obzvláště v přechodových zónách) můžou zmenšit statickou chybu celého systému. [3; 56]
- Adaptivní metody: ve srovnání s předchozími strategiemi není nutné absolutně přesně znát dynamické vlastnosti řízeného systému. Lze také předpokládat lineární parametry popisující řízený systém. Tyto metody pouze odhadují dopředné podmínky, čímž snižují potřebu vysokých zisků (míry schopnosti obvodu zvýšit amplitudu řízeného signálu) a vysokých frekvencí jako kompenzaci nejistot v dynamickém modelu. [3]
- Využití neuronových sítí: tyto metody používají pouze aproximace funkcí popisující řízený systém. Výhodou aproximace funkcí je, že jejich nejistota nemusí být v aproximaci zahrnuta. [3]

Dalšími příklady mohou být metody založené na fuzzy logice, metoda invariantních variant a metoda řízení nulového momentového bodu. Ta se často používá pro řízení pohybu a dynamiky chůze, například pro humanoidní roboty. Všechny zde uvedené příklady jsou podrobně vysvětleny ve zdrojích u nich uvedených. Jedná se o komplexní problémy řešené již desetiletí, a tudíž o problematiku přesahující rámec této práce. [3; 57]

4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR A ANALÝZA AKTUÁLNÍHO STAVU POUŽÍVÁNÍ

4.1 Analýza současného stavu trhu

V této kapitole se autor pokouší shrnout informace o všech společnostech, které na českém či slovenském trhu nabízejí své unikátní mobilní roboty. Podrobný přehled jednotlivých katalogů je doplněn aktuálními informacemi o trhu a celkovém stavu mobilní robotiky v České republice. Tyto informace byly získány především prostřednictvím rozhovorů s obchodními zástupci některých zde uvedených firem, kterým autor takto hromadně děkuje za jejich čas.

Pro jednodušší orientaci na trhu bylo rozhodnuto mobilní roboty rozdělit do několika kategorií. Ty jsou definované autorem a mimo rámec této práce tak toto rozdělení nemusí být aplikovatelné. Nejstandardnějším typem je ploché provedení ve tvaru jezdící desky/platformy (dále jen pad). Takovéto vozíky bývají často velmi nízké, avšak široké či dlouhé, a jsou využívány pro převoz paletizovaných nebo v bednách uložených komponent. Provedení ve tvaru kostky (dále také box) je ve své podstatě vyšší verze provedení pad. Tyto vozíky bývají nejčastěji využívány v kombinaci s kolaborativním manipulačním robotem či nástavbou. V automotive montážních linkách se často využívá provedení jako tahač, a to pro tahání externích připojitelných vozíků po předem stanovených trasách (existují ale i provedení jako AMR). Provedení jako vysokozdvížený vozík je ve své podstatě pouze autonomní náhrada standardního vysokozdvížného vozíku využívaného pro přepravu palet. Nejméně častým provedením je robot určený pro převážení tzv. „dolley“ vozíků. Konstrukčně se většinou jedná o kombinaci padu, tahače a vysokozdvížného mobilního robotu, na trhu se jich však mnoho nevyskytuje.

Ohledně žádosti o rozhovor s firmami nabízejícími AMR/AGV na českém trhu se ne všichni obchodní zástupci vyjádřili, někteří dokonce vysloveně odmítli. To výrazně komplikuje autorovu snahu o objektivní a nepřibarvenou analýzu. Každá z firem má své specifické přednosti a unikátní přístupy, které je možno většinou poznat právě až z rozhovoru. Z tohoto důvodu se chce autor vyvarovat jakéhokoliv srovnávání jejich výhodnosti, nebo určování toho, kdo je v čem lepší.

Autor by tímto rád poděkoval zástupcům firem ABB, Bosch Rexroth, CEIT, KUKA, Kivnon, OMRON a Stäubli; kteří mu věnovali svůj čas a sdíleli s ním cenné informace. Jejich příspěvky byly klíčové pro pochopení trhu s autonomními mobilními roboty.

Nejzajímavější poznatky často vycházejí právě z rozhovorů, které se ne vždy ubírají stejným směrem. Je tak důležité zdůraznit, že pokud je u firmy 1 uvedeno, že nabízí určité služby nebo produkty, ale u firmy 2 to zmíněno není, neznamená to, že firma 2 tyto služby nenabízí. Tímto způsobem se autor snaží zachovat nestrannost a objektivitu v popisu jednotlivých společností a jejich nabídek. Zároveň ale také není fér nezohlednit ochotu obchodních zástupců, kteří s rozhovorem souhlasili a poskytli tak autorovi cenné informace, které proto záměrně nejsou jakkoli zkráceny, i když to znamená, že obsahem převyšují ostatní společnosti.

4.1.1 ABB

Celé portfolio firmy ABB je na českém trhu poměrně nové, nabízí například AMR tahače jako jsou T701, T702 a T901, poslední z nich je viditelný na obrázku 26. Jedná se o jedno směrové (v případě T702 dvousměrové) tahací vozíky s kapacitou dvě až deset tun taženého nákladu. V případě katalogu firmy ABB je poměrně komplikované rozlišovat mezi AMR a AGV pomocí klasické definice. Většina jejich výrobků nabízí možnost navigovat podle magnetické pásky (typické pro AGV), ale také pomocí SLAM či VSLAM technologií (moderní AMR způsob navigace). Všechny vozíky je zatím možné nabíjet pouze kontaktně, na dokovací stanici pro induktivní nabíjení se podle zástupců společnosti pracuje. [58; 59]



Obr. 25 Pad ABB AMR P604, upraveno dle [59]

Dalšími produkty jsou autonomní roboty provedení pad, jmenovitě P304, P404 a P604 (obr. 25). Všechny modely jsou schopny se pohybovat všesměrově s kapacitou 600, 1000 a 1500 kg. Zajímavostí je využití navigace pomocí QR kódů (modely P304 a P404), která nahrazuje navigaci pomocí tradičnější magnetické pásky v kombinovaných provozech, kde v důsledku pohybu standardních vysokozdvížných vozíků často dochází k jejímu porušení. QR kód zde slouží jako kontrolní průjezdový bod. [58; 59]

Celý katalog završuje dvojice autonomních paletových vozíků F602 a F702, provedených poměrně standardně. Prostorem navigují pomocí tradiční LiDAR technologie, pohyb mají dvousměrový, i kapacity zhruba odpovídají konkurenci. V čem však vynikají, je možnost zvedat náklad až do výšky osmi a půl metru. To je ve světě AMR nejvýše ze všech aktuálně nabízených modelů, model F702 je vyobrazen na obr. 27. Většina portfolia již nabízí komunikaci přes VDA 5050 Standard (umožňující kooperaci s vozíky jiných výrobců), některé AMR však tuto možnost stále nemají. [58; 59]



Obr. 26 Tahač ABB AMR T901, upraveno dle [59]



Obr. 27 Paletový vozík ABB AMR F702, upraveno dle [59]

Kromě automotive se roboty ABB hojně využívají v potravinářském a farmaceutickém průmyslu, například firma Nestlé v Olomouci. V porovnání s konkurencí vozíky vynikají především bezpečností provozu a inovativními navigačními technologiemi (VSLAM). Údajně mají navrch i v ceně celé implementace AMR do stávajícího provozu, tuto skutečnost však autor z důvodu nedostatku potřebných vstupních dat neověřoval. [58]

ABB se svými vozíky nabízí i celou řadu softwarových doplňků ve formě AMR Studio suite, určených pro programování a kontrolu mobilních robotů, logistickou optimalizaci a dohled nad flotilou. Společně s tím také poskytuje rozsáhlou předprojektovou a servisní podporu. ABB se nedávno spojilo se společností SevenSense, se kterou vzájemně spolupracují na vývoji jejich VSLAM navigační technologie. Jako doplňky pro vozíky lze dokoupit celou řadu plošin, vozíků a nástaveb, většinu z nich vyrábí ABB samo, některé dodávají partnerské OEM společnosti. [58]

ABB na český trh vstoupilo teprve začátkem října tohoto roku (2024), v zahraničí však operuje již déle. Všechny z aktuálně nabízených robotů byly původně roboty firmy ASTI Mobile Robotics, kterou ABB odkoupilo v červenci 2021. Každý z nich však byl více či méně upraven a celá nabídka byla standardizována a recertifikována (ASTI nabízelo spíše zakázkovou výrobu). Během tohoto převzetí a aktualizace produktů byly dodávky robotů kompletně odstaveny, produkty ABB tak mělo čas na splnění všech bezpečnostních požadavků podle ČSN EN ISO 3691-4. V prvním kvartálu 2025 ABB údajně uvede na trh čistě své, nové řešení, které bude pro zatáčení využívat smýkání (podobně jako například tank), více však autor uvést nemůže. Spuštěn je i projekt vyvíjející přímou kooperaci mezi AMR a manipulačními roboty ABB bez jakéhokoliv nadřazeného řídicího systému. [58]

Podrobnější informace poskytl v rozhovoru Radomír Nováček, ABB manažer prodeje za ČR a SR, za který mu tímto autor velice děkuje.

4.1.2 Agilox

V porovnání s ostatními dodavateli nelze katalog Agilox klasifikovat podle konstrukčních skupin, spíše se jedná o jednotlivé modely specifické pro dané provedení. Příklady celého portfolia společnosti Agilox lze také nalézt v příloze 1.

AGILOX ONE je univerzálnější provedení AMR, konstrukčně se jedná o hybrid mezi dolley a vysokozdvížným vozíkem. Určen je především pro výrobní společnosti, je navržen pro flexibilní a bezpečné manipulace s materiály a dodáván v provedení s jednou větší či dvojicí menších vidlic. Díky omnidirekčnímu pohonu je schopen se pohybovat i v úzkých uličkách. [60]

AGILOX OCF, tento model je uzpůsoben jako vysokozdvížný vozík sloužící pro přepravu těžkých břemen. Je vybaven senzory pro bezpečnou navigaci a může zvednout až 1200 kg. [60]

AGILOX ODM je navržen pro manipulaci s různými typy materiálů a nabízí výbornou flexibilitu. Jeho schopnost adaptace na měnící se prostředí je ideální využít ve velice dynamických provozech. Jedná se o typický příklad dolley konstrukce. [60]

AGILOX OPS je flexibilní platforma (provedení pad) AMR určená pro rychlou přepravu těžkých nákladů v úzkých uličkách a stísněných prostorách. Je vybavena standardizovanými rozhraními, což umožňuje použití různých manipulačních nástrojů a široké spektrum aplikací. [60]

4.1.3 Bosch Rexroth

Společnost Bosch a jejich Active Shuttle, viz obrázek 28, je navržen pro autonomní transport materiálu, obvykle uloženého v kontejnerech KLT nebo blistrech. Ty jsou umístěny na čtyřkolovém podvozku materiálového vozíku (tedy provedení dolley). Tento systém je schopen přepravit vozík o hmotnosti 260 kg na základě digitální mapy prostředí, kterou si sám vytvoří. Jakmile je mapa okolí zaznamenána, je neustále aktualizována, což eliminuje potřebu nového mapování i v proměnných prostředích. Technologie SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) zajišťuje sledování, navigaci a dynamickou aktualizaci mapy. [61; 62]

Active Shuttle umožňuje realizaci různých přepravních úloh, jako jsou cyklické dodávky nebo dodávky na základě dynamické spotřeby materiálu. Proces nakládky a vykládky přepravovaných vozíků na určeném místě probíhá zcela automaticky. [61; 62]

Je důležité poznamenat, že Active Shuttle není určen pro transport euro-palet, přičemž maximální rozměry nákladu jsou 400 x 600 mm. Systém lze integrovat s Active Shuttle Management System (AMS) nebo prostřednictvím standardu VDA 5050 s již existujícím softwarem jako správcem flotily. Je také vhodný pro použití v oblastech s nutným elektrostatickým vybitím (ESD) a vyžaduje pouze velmi úzké uličky o šířce 900 mm. [61; 62]

Podrobnější informace poskytl prostřednictvím emailové komunikace Petr Žalud, vedoucí odborné oblasti montážní techniky, za což mu tímto autor velice děkuje.

4.1.4 CEIT

Úvodem do portfolia společnosti Asseco CEIT je řada tahačů: 1300L-A, 1300A, 3000A (ten lze vidět na obrázku 31), 6000A, 8000A. Odlišují se v rychlosti pohybu, hmotnosti taženého nákladu, a možnosti použití v zastřešených venkovních plochách. Obecně jsou však dostupné s konturovou, laserovou či magnetickou navigací, tažností maximálně 6 tun a maximální rychlost 2 m/s. Jako doplňky k nim jsou nabízeny válečkové dopravníky či přepravní rámy. [63]

Jako zástupce vysokozdvížných vozíků firma nabízí modely 1500FCB, F800 AP, 1500FS a 1500FES. Všechny 1500 jsou variace na standardní provedení s rozdíly v rozsahu manipulace a možné manipulovatelné hmotnosti. F800 AP je pouze nízkozdvížné zařízení,



Obr. 28 Active Shuttle společnosti Bosch Rexroth, [61]



Obr. 29 1500UDS od společnosti CEIT, [63]

využívající neviditelné vidlicové rameno pro podebrání palet, je tak blíže provedení pad než vysokozdviznému vozíku. [63]

Portfolio vozíků doplňují modely v provedení pad pro podbírání: 1500UDS (obr. 29), 1500DE, 3200F, 1200F, 1000LC-F, 600LC-F; společně s provedením box: 800AF, 2000AF, 2000AF-BD (obr. 30), 1300L-AF. Modely se vzájemně liší způsobem zdvihu nákladu, maximální rychlostí, způsobem systému a nosností. [63]

Všechny modely pracují na principu AGV, v AMR firma nevěří a tvrdí, že je takto schopna lépe zajišťovat taktové časy u náročných aplikací. Modely jsou již připraveny pro VDA 5050 Standard, čeká se pouze na software schopný řídit vozíky jiných výrobců (viz níže). Z hlediska bezpečnosti byla společnost na ČSN EN ISO 3691-4 připravena a nemusela tak své vozíky více upravovat. [64]

CEIT se svými roboty nabízí i softwarovou podporu ve formě programu Twiserion, rozděleného do tří hlavních částí. První část poskytuje rozhraní pro plánování provozu, kde lze na základě vstupních dat vytvořit 3D vizualizaci a simulaci. Druhá část se zaměřuje na RTLS systémy, tedy návrh a využití systémů pro sledování polohy v reálném čase pomocí tagů. Třetí část tvoří AGV Fleet Manager, určený pro správu flotily autonomních vozidel. Aktuálně probíhá práce na upgradu, který by měl být dokončen koncem roku 2025. Nová verze má umožnit lepší přizpůsobení konkrétním požadavkům uživatelů a rozšířit možnosti automatizace některých úkolů tím, že aplikaci více zpřístupní uživatelé. Společně s tím přijde i softwarová kompatibilita s VDA 5050, na kterou se postupně připravují všechny jejich modely. [64]

Firma staví svou konkurenční výhodu na zákaznické zkušenosti a podpoře po dokončení projektu. Nabízí přizpůsobitelná řešení na míru s rychlou implementací a cenově se pohybuje ve středu. Má nasazeno přes 2000 AGV, na které poskytuje i servis s rychlou reakcí (např. u Škodovky garantuje 15minutovou reakční dobu). Návrat investice má průměrně stejný, jako všechny ostatní společnosti, tudíž cca dva roky. [64]

Ve Volkswagen mají 1200 kusů techniky (ne všechno jsou AGV), historicky nepopulárnější model je tahač. CEIT cílí na všechny, kteří chtějí automatizovat, přičemž hlavním segmentem je automotive. Ideální jsou pro provozy s nepřetržitým třísměnným provozem a opakovanou přepravou materiálu mezi dvěma body. Mezi jejich významné zákazníky patří Škoda, Volkswagen, Continental, Panasonic, ZF, Toyota, Porsche Leipzig a Audi Győr. [64]



Obr. 30 Platforma 2000AF-BD společnosti CEIT, [63]



Obr. 31 Tahač 3000A společnosti CEIT, [63]

Do budoucna se firma zaměřuje na vývoj softwaru Twiserion, který má být klíčovým inovátorem, a na nové typy vidlicových AGV. Dále plánuje rozšíření portfolia dodavatelů hardwaru ve spolupráci s asijským partnerem. Hlavní výzvou při implementaci mobilních robotů je podle ní příprava, jelikož často chybí jasné zadání a zákazníci nebývají plně informováni o specifických potřebách a možnostech implementace autonomních robotů. Úplnější vyobrazení portfolia CEIT lze nalézt v příloze 1. [64]

Podrobnější informace poskytl v rozhovoru Petr Goliáš, manažer klientů pro Asseco CEIT, za který mu tímto autor velice děkuje.

4.1.5 ek robotics

VARIO MOVE, viz obrázek 34, je modulární systém s univerzálním podvozkem, určený pro manipulaci s břemeny o maximální hmotnosti 1600 kg ve výškách do 5000 mm. K hnacímu modulu lze připojit různé nástavby prostřednictvím univerzálního rozhraní, čímž se mění konstrukční a funkční charakteristika vozíku. Tento systém může být realizován jako přepravní robot s protizávažím v modelu CB. Model AS je vybaven vnějšími kolovými rameny, to mu umožňuje přepravovat speciální nosiče nákladu a uzavřené palety. Je kompatibilní s válečkovými nebo řetězovými dopravníky (model CT) a může být vybaven příslušenstvím, jako jsou prvky pro přidržování nákladu. Model CTO umožňuje připojení libovolného počtu dopravníků k několika podvozkům, což poskytuje možnost pohybu ve všech směrech a vytváří tak větší přepravní platformu. Díky této modularitě však není možné VARIO MOVE snadno zařadit do žádné konkrétní konstrukční kategorie. [65]

X MOVE zahrnuje čtyři modely s nosností 150 kg, 600 kg (viz obr. 32), 1200 kg a 2000 kg. Konstrukčně jsou uzpůsobeny jako tradiční provedení pad ve formátu AMR, některé z nich jsou však doplněny i o možnost pracovat jako AGV. Všechny modely jsou vybaveny integrovanými zvedacími jednotkami, hodí se tak například pro skladování, přepravu a montáž. [65]



Obr. 32 Platforma X MOVE 600 společnosti ek robotics, [65]



Obr. 33 AGV skladovací plošina BHL MOVE od ek robotics, [65]

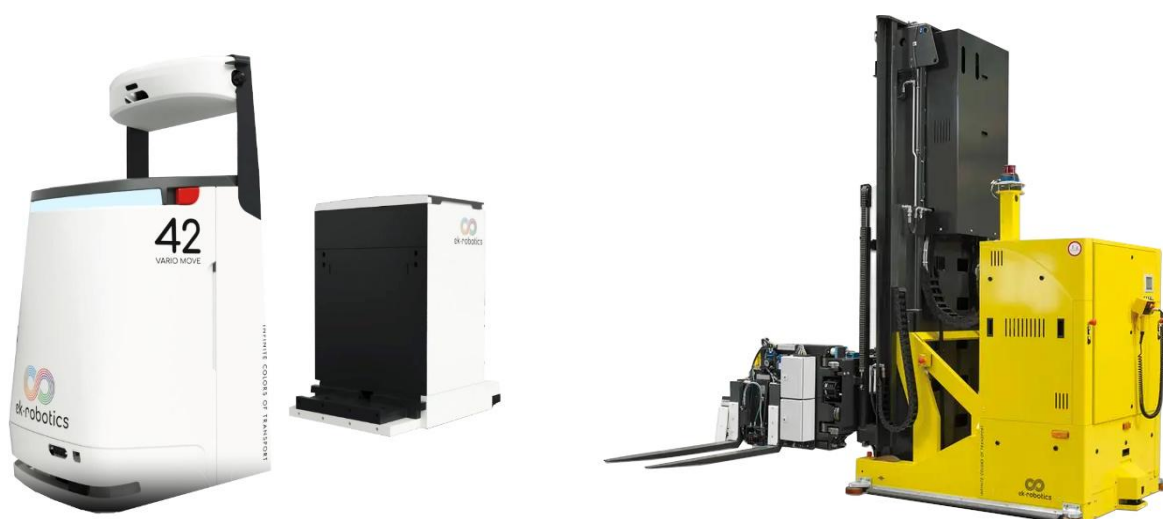
HEAVY MOVE je další modulární systém, který zahrnuje modely 01 až 06, navržený je pro manipulaci s těžkými břemeny. Model 01 je možno vybavit vidlicí nebo jiným příslušenstvím, specifickým pro manipulaci s břemenem. Model 02 (viz obr. 35) nabízí buď otočnou výsuvnou vidlici nebo teleskopickou vidlici. Model 03 je specificky navržen pro potravinářský průmysl a zahrnuje manipulační příslušenství, které může obsahovat individuálně konstruované pasivní zádržné prvky nebo aktivní upínací prvky. Model 04 je určen pro automobilový průmysl a je vybaven deskovým dopravníkem. Model 05 je vybaven několika manipulačními zařízeními, to mu umožňuje současně přepravovat až šest palet. Poslední model 06 je zaměřen na použití s vidlicemi. [65]

BHL MOVE, viditelný na obrázku 33, je vozík určený pro automatizovanou přepravu těžkých a nadměrně dlouhých nákladů. Je vybaven čtyřsměrným podvozkem, který mu umožňuje efektivní manévrování v úzkých prostorech a optimalizaci pohybu. Tento model je softwarově omezené AGV. Může být vybaven doplňkovými prvky, jako jsou nastavitelné vidlice a/nebo 3D rozpoznávání objektů. [65]

SMART MOVE L14/L16 je konstrukčně uzpůsoben jako vysokozdvíhový vozík, který kombinuje automatizaci s možností ručního řízení. Tento model je navržen tak, aby splňoval různé potřeby v oblasti manipulace s materiálem. Stejně jako ostatní modely od této společnosti i L14/L16 nabízí možnosti customizace, a přizpůsobení specifickým požadavkům uživatelů. [65]

Řada COMPACT MOVE zahrnuje kompaktní automatizované vozíky s protizávažím, konkrétně modely CB 10, CB 16 a CB 18/25. Model CB 10 je vybaven přídatným stavebnicovým systémem závaží, který umožňuje přizpůsobení vozíku pro manipulaci s břemeny o hmotnosti mezi 1000 a 1200 kilogramy. Model CB 16 může být vybaven nastavitelnými vidlicemi s nosností až 1600 kg. Tato řada je společností ek robotics označována jako standardní vozík pro středně těžká břemena. [65]

VNA MOVE je vysokozdvíhový mobilní vozík určený pro použití v úzkých a vysokých skladech s dosahem až 14 metrů. Tento vozík může být řízen buď pomocí podlahových vodicích kolejnic, nebo indukčním vedením, což z něj činí automatizované řízené vozidlo (AGV). Jeho nosnost dosahuje až 1500 kg. [65]



Obr. 34 Platforma VARIO MOVE společnosti ek robotics, Obr. 35 Platforma HEAVY MOVE 02 společnosti ek robotics, [65]
upraveno dle [65]

MEDI MOVE je vozík určený pro automatické transportní systémy (ATS) v nemocnicích, konstrukčně je velmi podobný padu. Je navržen tak, aby byl sterilní, což je klíčové pro udržení hygieny v zdravotnickém prostředí. Obsahuje integrovaný zvedací stůl s nosností 500 kg. [65]

FAST MOVE je nízkoprofilové AGV s výškou pouhých 14 cm. Tento vozík je k dispozici v několika verzích podle použité nástavby. Verze 50 1/2 s válečkovým posuvem je určena pro čtyři KLT bedny ve dvou patrech. Model 50 2/2 s válečkovým posuvem nabízí dvoupatrovou přepravní plošinu, která se může pohybovat ve všech směrech a lze ji prodloužit až na dva metry. Verze 90 s válečkovým posuvem je navržena pro manipulaci s paletami nebo GLT. [65]

A konečně CUSTOM MOVE je řada vozíků zcela navržená pro specifické a přizpůsobené potřeby zákazníků [65]. Portfolio společnosti ek robotics se zdá poměrně obsáhlé, důraz očividně kladou na přizpůsobitelnost a modularitu každého z vozíků.

4.1.6 Etisoft

IntraBot Fork je autonomní vysokozdvizný vozík určený k manipulaci s paletami. Je vybaven zvedacím mechanismem, který umožňuje zvedat a umisťovat palety na dokovací místa. Tento AGV je navržen pro zvedání a přepravu palet EUR1 (obr. 37) a EUR3 s nosností až 550 kg, představuje tak alternativu k tradičním vysokozdvizným vozíkům. Vozík lze přizpůsobit podle specifických potřeb uživatelů. [66]

IntraBot Flat je univerzálnější platforma s nízkým profilem, viditelná je na obrázku 36, dostupná ve dvou verzích: jedna pro přepravu nákladů s maximální hmotností do 500 kg a druhá pro transport těžkých nákladů až do 1100 kg, obě dodávány v několika subverzích. Model Lift je vybaven zvedacími nosníky pro standardní rozměry EUR1 nebo EUR3, zatímco verze Stand slouží k přepravě výrobních kontejnerů v regálu a je vhodná pro integraci s výrobními linkami nebo dopravníky. Verze Pull je určena k tahání vozíků nebo logistických košů na kolečkách, to umožňuje přepravu bez nutnosti zvedání. [66]

IntraBot Cart je navržen pro manipulaci s logistickými koši na kolečkách. Jeho plochý design (pad) umožňuje vjet pod přepravovaný koš a může se pohybovat v jakémkoli směru s maximální tažnou kapacitou 500 kg. [66]

IntraBot Picker slouží k přepravě KLT a dalších kontejnerů mezi regály a skladovacími stanicemi. Je navržen pro uzavřené skladové prostory, kde není povolen pohyb lidí. Tento model je vybaven žebříkem pro uskladnění nákladu a umožňuje vyzvedávání KLT kontejnerů z regálů nebo dopravníků a jejich umisťování na police vozidla. [66]



Obr. 36 Provedení pad IntraBot Flat společnosti Etisoft, [66]



Obr. 37 IntraBot Fork společnosti Etisoft, [66]

Kromě toho IntraBot nabízí také kooperativní zařízení, jako jsou pohonné a válečkové doky pro nakládku a vykládku palet, automatické zvedáky palet, inteligentní paletové buffery a automatizované sklady prázdných palet. [66]

4.1.7 INDEVA

INDEVA Tunnel AGV (obr. 38) je autonomní vozík s nosností 750 kg, určený k pohybu v dílnách a skladech. Jeho konstrukce (provedená jako box) umožňuje podebírat vozíky a je vybavena plně automatizovaným systémem pinhook. INDEVA Tugger AGV má nosnost od 750 do 1 500 kg a slouží k tahání vlaků vozíků. Tento model je přizpůsoben pro přepravu různých nákladů. [67]

Custom Gravity AGV je navržen pro transport boxů a malých kontejnerů v obou směrech. Používá jednoduchý mechanismus, který využívá gravitaci k posouvání boxů z AGV na regál a naopak. Rozměry válečkových drah jsou přizpůsobeny velikosti a počtu přepravovaných boxů. Na správném místě AGV navazuje kontakt s dopravníkem pomocí Wi-Fi a je dodáván s bezpečnostním světlem, nabíječkou baterií a kompletně označeným zapojením pro montáž. Všechny modely sledují magnetickou pásku a nabízejí řadu volitelných příslušenství, do trasy může být přidána RFID technologie pro dodatečné informace pro vozík. [67]

4.1.8 Jungheinrich

Základem portfolia společnosti Jungheinrich je řada autonomních vysokozdvizných vozíků, která zahrnuje modely ERE 225a, EKS 215a, ERC 213, ERC 217a, EKX 514a, EKX 516a a EKX 516a. ERE 225a je AGV s výškou zdvihu 125 mm a nosností 2500 kg, určený pro nízkou manipulaci s paletami. Modely EKS 215a a ERC 213/217a jsou také AGV s nosností přibližně 1500 kg, schopné zvedat náklady do výšky 2 750 až 6 000 mm, jsou vhodné pro kombinaci pozemní přepravy a zakládání beden do regálů. EKX 514a a EKX 516a jsou modulární AGV s maximální nosností 1600 kg a výškou zdvihu až 13000 mm určené pro zakládání do vysokých regálů. [68]

Ty doplňuje tahač EZS 350a s maximální přepravovanou váhou 5000 kg, opět se jedná o AGV. Příklady ze světa AMR jsou pak dvě verze provedení pad, jmenovitě arculee S (vyobrazený na obrázku 39) a arculee M, jedná se o zcela standardní provedení pad určené pro přepravu specializovaných stolů a beden metodou PickUp, avšak kompatibilní se standardem VDA 5050. [68]



Obr. 38 INDEVA Tunnel AGV, [67]



Obr. 39 arculee S od Jungheinrichu, [68]

4.1.9 Kivnon

Nejmenší modely vozíků v portfoliu společnosti Kivnon jsou K03 (viz obr. 40) a K05 Twister roboti (provedení box), ty jsou v základní verzi vybavené výsuvnými čepy pro použití v kombinaci s P&D stojany. K03 je velmi kompaktní všesměrový robot s unikátní možností otáčení nákladu o 360° bez pohybu vozíku díky otočnému stolu s nosností až 200 kg, K05 je větší jednotka specializovaná spíše pro cyklické úkoly ve skladištích vybavená novým systémem mapování vyvinutým ve spolupráci s BlueBotics. [69; 70]

Nejúspěšnějšími modely jsou „myši“ K10 a K1 (K1 se nachází na obr. 41) používané v provedení s Pick&Drop stojanem a tažnou silou pro 1200 kg nákladu. Automatizované výrobní linky poté doplňuje K41 provedený ve stylu pad, který díky nízké výšce a všesměrovému pohybu schopně zastupuje pojízdné montážní platformy. Tento model se v průběhu letošního roku (2024) dočká aktualizace, tvarově se přiblíží delšímu a užšímu provedení K10 a bude nést označení K07. [69; 70]

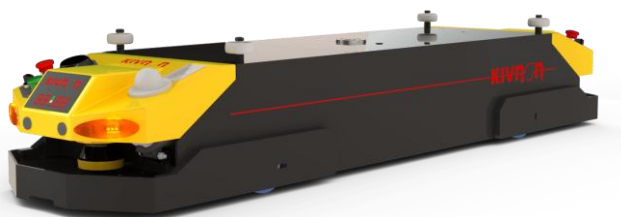
Součástí portfolia je i tahač pro přepravu těžších nákladů, okolo 2 tun, formou konvojového přívěsu (K32). Ten je však využíván jen občasné (například továrna Jaguar v Nitře). Celý katalog završují paletové vozíky K55, provedení typu A pro uzavřené a B pro otevřené palety, ty jsou na trhu již od roku 2021. Kivnon nabízí, stejně jako většina dodavatelů, širokou škálu příslušenství pro všechny své vozíky, například Pick&Drop stojany, spojovací systémy a dopravníky. [69; 70]

Všechny vozíky fungují jako AGV, nejčastějším způsobem navádění bývá magnetická páska. Relativně nově jsou také kompatibilní s VDA5050 Standardem, umožňující jednoduché propojení s MES a ostatními logistickými systémy. Nová je také možnost dohledávání špatně postavené bedny pomocí kamery.

Dle M. Puskara trh s mobilními roboty od roku 2021 stagnuje. Před covidovou pandemií a válečným konfliktem na Ukrajině trh s mobilními roboty raketově rostl (obzvláště významně pro Česko, Slovensko a Polsko). Jako důsledek nejistoty z těchto událostí však většina firem přestala investovat do dlouhodobějších projektů (návratnost zhruba 2 roky). Situace se v posledním roce stabilizovala, ale opětovný nárůst je pouze minuskulní. Komplikace také způsobila nová norma ČSN EN ISO 3691-4 týkající se právě mobilních systémů bez řidiče. Kivnon na ni naštěstí byl připraven již před několika lety (přibylo nové bezpečnostní PLC společně s řadou senzorů). [69]



Obr. 40 Mobilní robot K03 s otočným stolem, firma Kivnon, upraveno dle [70]



Obr. 41 Mobilní robot K11 „myš“, firma Kivnon, upraveno dle [70]

Hlavním rozdílem mezi společnostmi Kivnon a konkurencí je jejich důraz na zjednodušování a zvyšování robustnosti celého systému. Od jednoduššího přístupu k programování a zavádění AGV až po využívání právě AGV namísto AMR. Kivnon se specializuje zejména na automobilový průmysl, ve kterém je stabilita převozních časů (takt) velmi důležitá. Provedení stylem AGV sice znamená, že robot nebude při zablokování trasy vyhledávat nové způsoby, jak se k cíli dostat, v praxi to ale značí stabilnější provoz (nová trasa nebývá vždy ideální) a celkově levnější navigační systém. Všechny vozíky jsou také konstruovány z plechového krytování (namísto často se vyskytujícího plastu), jsou tak značně odolné vůči poškození. Své využití našly například v továrnách Stelantis, Jaguar, Renold a Volkswagen. [69]

Podrobnější informace poskytl v rozhovoru Marek Puskar, Kivnon manažer prodeje pro střední a severní Evropu, za který mu tímto autor velice děkuje.

4.1.10 KUKA

Vstupními modely vozíků z katalogu společnosti KUKA jsou menší roboty stylu pad: KMP 600-S diffDrive, KMP 600P diffDrive a KMP 1500P diffDrive, kde číselné označení je nosnost vozíku v kilogramech. Jedná se o modernizované provedení s diferenciálním pohonem kol (verze omni jsou dostupné přes 8 let, celkově se KUKA na trhu mobilních robotů pohybuje již téměř 30 let), které je při zachování stejné účinnosti levnější a spolehlivější. Nejnovější z nich je model 1500P, viditelný na obrázku 42, který se na trhu objevil koncem roku 2023. Navazující modely střední třídy nosnosti jsou KMP 1500 omni a KMP 3000P omni. Vozíky KUKA využívají například provozy Lamborghini, MANN, Ferrari, Mercedes, BMW a primární dodavatelé do automotive. [71; 72]

Unikátem z hlediska trhu je transportní platforma KUKA omniMove (obr. 44) vyvinutá pro těžké a nadrozměrné náklady. Má nosnost až 100 tun a délku až 30 metrů. Tyto parametry se však vždy odvíjejí od specifikace pro dané použití. Vozíky je také možno spojovat do vláčků a umožnit tak převoz ještě větších a těžších nákladů. Pro tuto možnost však KUKA musela vyvinout kontrolní modely, které zamezují zatížení nákladu na krut při zatáčení. Kvůli svým rozměrům je již nepraktické, aby platforma pracovala jako AMR (na rozdíl od předcházejících modelů), při navigaci se tak chová jako AGV doplněné o prvky umělé inteligence.



Obr. 42 Nový KMP 1500P, firma KUKA, upraveno dle [72]



Obr. 44 Platforma omniMove, firma KUKA, upraveno dle [72]



Obr. 43 Vozík iiva s manipulační rukou, firma KUKA, upraveno dle [72]

Využití tato platforma našla v automatizovaných výrobních linkách například při sestavování Airbus A380, svařování skříní pro vlakové vozy, převoz turbín a lopatek pro elektrárny a obecně leteckého průmyslu v Čechách. [71; 72]

KUKA také nabízí autonomní vozíky doplněné o manipulační ruku. Jedná se o modely KMR iisy, KMR iiwa (viz obr. 43) a KMR QUANTEC typicky použité pro zakládání a vykládání do obráběcích strojů. Příkladem jejich využití v praxi je transport elektrotechnických komponent, jako jsou křemíkové destičky pro výrobu čipů. Ty se vyrábí ve vysoce kontrolovaném prostředí (cleanroom, až ISO 3 certifikace), kde je zásadní minimalizovat riziko kontaminace, lidská přítomnost je tak prakticky nemožná. Omezení chyb při zakládání zde také chrání náklady na materiál. Cena jedné destičky může dosahovat až milionu korun, přičemž v zakládacím bloku obvykle bývá 14 destiček. [71]

Nejdůležitější součástí aplikace mobilních vozíků je řídicí systém koordinující jejich chování. Ten musí být robustní, jednoduchý na pochopení, s dobrou logikou, schopný bezchybně fungovat i při použití mnoha vozíků (obzvláště náročné pro Pick&Drop aplikace) a s možností propojení na MES systémy. Společnost KUKA k tomuto používá Fleet Manager, k jehož programování je využit no-code přístup. Systém je sám schopný interpretovat zadání od uživatelů, ti tak nemusejí být schopni programovat. Program je také schopný zahrnout vozíky jiných výrobců, ty však musejí podporovat VDA5050 Standart. [71]

Všechny vozíky KUKA je také možno doplnit o možnost induktivního nabíjení. To v kombinaci s řídicím systémem umožňuje vytvářet robustní strategie provozu, kdy například stanice, na které vozíky obvykle čekají může být doplněna o indukční nabíjení. Vozíky se tak během čekání průběžně dobíjejí (za 5 minut nabíjení robot získá cca 10 minut provozu), tím tak dochází k omezení neprovozních prostojů. [71]

Dle Radka Velebila je největším problémem při zavádění automatizace ve firmách jejich připravenost a nerozhodnost týkající se plánu technického rozvoje. Proto je vždy lepší před zadáním projektu nechat celý provoz auditovat. Lidé s praxí v oboru autonomních robotů jsou lépe schopni určit nejlepší způsob provedení, s nejrychlejší návratností investice. Ty se odvíjí od přepočtu na úsporu lidí, obecně se jedná o zhruba 2 roky. [71]

V příštím roce (2025) firma KUKA plánuje rozšíření portfolia autonomních vozíků o několik nových modelů. Patří mezi ně tahač, vysoko zdvižný vozík, nízkoprofilový pad a další produkty s nižší nosností. Celkově se jedná o zhruba šest nových modelů, informace o těchto novinkách jsou však stále důvěrné a nemohou tak být uvedeny. [71]



Obr. 45 AMR společnosti Linde: C-MATIC HP 10, [74]



Obr. 46 Robot MiR250 od Mobile Industrial Robots, [75]

Podrobnější informace poskytl v rozhovoru Radek Velebil, KUKA manažer prodeje pro ČR s SR, za který mu tímto autor velice děkuje.

4.1.11 Linde

Linde nabízí dvě řady autonomních mobilních robotů (AMR) v provedení pad. První z nich je C-MATIC, která zahrnuje modely 06, 10 a 15 (nosnost v x100 kg) určené pro přepravu materiálu na krátké a střední vzdálenosti. Tyto vozíky se orientují pomocí QR kódů a mohou být vybaveny plošinovým adaptérem nebo různými přepravními stoly. [73]

Druhou variantou, uvedenou i na obrázku 45, je C-MATIC HP 10, která je určena pro smíšené provoz, kde může snadno spolupracovat s lidmi, ručními vozíky a dalšími autonomními vozíky. Tento model je schopen přepravovat palety a pojízdné regály na střední a dlouhé vzdálenosti a využívá technologii navigace SLAM pro efektivní orientaci v prostoru. [74]

4.1.12 Mobile Industrial Robots

Mobile Industrial Robots nabízí v portfoliu autonomní mobilní roboty (AMR) v provedení pad, konkrétně modely MiR250, MiR600 a MiR1350, kde čísla označují jejich nosnost v kilogramech. MiR250 (obr. 46) je kompaktní robot určený pro extrémně úzké prostory (do 80 cm), lze ho vybavit nástavbou Hook pro tahání nebo Shelf Carrier pro podbírání regálů, včetně verze pro ESD aplikace. MiR600 je vybaven paletovými zvedáky a je prvním robotem na trhu s krytím IP52, je možné ho vybavit nástavbou s válečkovým dopravníkem. MiR1350 má rovněž krytí IP52 a nabízí podobné funkce jako MiR600, ale s vyšší nosností, což ho činí vhodným pro náročnější úkoly. [75]

Kromě již zmíněných robotických systémů, Mobile Industrial Robots rovněž nabízí autonomní vysokozdvizný vozík MiR1200 Pallet Jack. Tento vozík je navržen pro přepravu a manipulaci s paletami o hmotnosti až 1200 kg, a to i v omezených prostorech s minimální šířkou 850 mm. [75]

4.1.13 OMRON

Portfolio mobilních robotů společnosti OMRON lze rozdělit do několika kategorií, přičemž číslo v názvu každého modelu označuje jeho nosnost (viz Lowpad přebírka níže). První z nich tvoří roboty ve tvaru boxu, mezi které patří modely LD-60, LD-90 (viz obr. 1), LD-90X a LD-250 (obr. 48). Tyto modely, stejně jako všechny ostatní mobilní roboty OMRON,



Obr. 47 LD-60 ve verzi ESD společnosti OMRON, [76]



Obr. 48 LD-250 společnosti OMRON, [76]

jsou provedeny jako AMR, schopné navigace v prostoru bez pevných, předem stanovených, tras. Všechny roboty jsou navrženy s ohledem na vývojáře OEM a jsou určeny pro implementaci do již existujících provozů, disponují tak otevřeným a přizpůsobitelným softwarem. K dispozici jsou také verze s ESD ochranou, viditelná na obrázku 47. [76]

Druhou skupinou jsou roboty provedené jako pad, konkrétně modely MD-600, MD-900 a HD-1500. Ty jsou vybaveny 360° pokrytím LiDAR systémem, který zajišťuje bezpečnost při použití v náročnějších aplikacích. Součástí všech modelů je také integrace bezpečnostních funkcí pro AMR propojená prostřednictvím systému Sysmac a možnost nastavitelného bezpečnostního zónování na LiDARu. [76]

OMRON také postupně přebírá modely od firmy Lowpad, prvním z nich je letos (2024) uvedený OL-450S s původním označením Lowpad S, znázorněn je na obrázku 50. Tento model je uzpůsoben pro převážení dolley vozíků s bednami či jiným nákladem. Do konce roku 2025 se plánuje převzetí modelu Lowpad F a v roce 2026 je očekáváno převzetí modelu Lowpad M, tento časový plán je však pouze orientační. [77; 78]

Podle odborníků ze společnosti OMRON se v posledních pěti letech změnila poptávka na trhu: dříve firmy pořizovaly jednotlivé roboty pro testování a vývoj, dnes se zaměřují na celé flotily, které řeší kompletní logistiku. Tyto projekty často trvají dlouho, během nich dochází k změnám ve firmách, což způsobuje výkyvy v rozhodování. Další faktory jako války, ekonomické krize a nejistota vedou manažery k tomu, že investice do nových robotů ne vždy dokončí. [77]

OMRON dodává nejen roboty, ale hlavně celkové komplexní řešení, kde je mobilní robot pomyslnou třesničkou na dortu. Právě proto portfolio OMRON, přestože není v porovnání s konkurencí tak obsáhlé, pokrývá přes 90 % potřeb zákazníků. Obecně jsou jejich AMR určeny pro přepravu nákladů mezi 60 kg a 1 tunou, přičemž software a okolní vybavení umožňuje integraci do celých již postavených výrobních linek. Firma cílí na pět hlavních segmentů: potraviny a spotřební zboží, farmaceutika, logistika, automotive a SMT elektronika, ale pokrývá i mnohé další oblasti. [77]

Firma také spolupracuje s četnými certifikovanými partnery, jako jsou CTS GmbH, ROEQ, Nord Modules (příklad této spolupráce je na obrázku 49) a Interroll, kteří se specializují na integraci nastavbových řešení pro mobilní roboty. Tato spolupráce umožňuje implementaci nastavby v režimu plug-and-play, což zjednodušuje proces nasazení. Partneri obvykle dodávají nastavby výrobcům OEM, kteří následně poskytují kompletní řešení koncovým uživatelům, čímž se zajišťuje vysoká flexibilita a přizpůsobení konkrétním požadavkům zákazníka. [76; 77; 78]



Obr. 49 OMRON HD-1500 s nástavbou od Nord Modules, [163]



Obr. 50 Nový vozík OL-450S společnosti OMRON (původně Lowpad), [78]

Pro ČSN EN ISO 3691-4 nebylo nutné vozíky jakkoliv aktualizovat. Z hlediska bezpečnosti společnost také vyvíjí realtime sdílení bezpečnosti mezi vozíky a stanicemi za pomoci CIP safety. Nejjednodušším řešením (které je jednoduše aplikovatelné i na již zavedené systémy) je však propojení pomocí bezpečnostní RFID čtečky, která vždy u stanice načte kód. [77; 78]

V roce 2024 aktualizovali bateriový systém na verzi V3, jež umožňuje retrofit stávajících vozíků bezkontaktním nabíjením. Do budoucna OMRON plánuje pokračovat v přebírání modelů Lowpad společně s jejich vývojem (do konce roku má být také vydána verze OL-450S vybavená vidlemi), a rozvoj FleetManageru, který bude ovládat nejen roboty OMRON, ale i další systémy. Společně s tím bude pokračovat aktualizace rodiny LD a software Flowcore. Ten je ve verzi 4.1 kompatibilní s VDA 5050 standardem, i přestože je navigační systém AMR vozíků řádově komplikovanější a jeho integrace je tak velmi obtížná. [77; 78]

Podrobnější informace poskytli v rozhovoru za společnost OMRON Tomáš Engl a Jan Jasanský, za který jim tímto autor velice děkuje.

4.1.14 SEW

Společnost SEW Eurodrive nabízí modulární autonomní systém MAXOLUTION modular technology. Tento systém využívá standardizované komunikační rozhraní VDA 5050 a je schopen obousměrné komunikace. Vozíky jsou označeny jako logističtí asistenti, příkladem je obr. 51. Jejich společné pojmenování bez jakéhokoliv rozdělení ale může být matoucí, protože jednotlivé modulární varianty se liší téměř ve všech důležitých vlastnostech. Systém je vybaven bezkontaktním nabíjením a navigací pomocí technologie LiDAR, což jej klasifikuje jako AMR. Jako příklady využití SEW uvádí převoz regálů, palet, práce v cleanroomech, montážní linky a těžké náklady. [79]

4.1.15 SSI Schaefer

Společnost SSI Schaefer uvádí ve svém portfoliu autonomní vozíky (AGV) pro různé aplikace, včetně nízkozdvižných a vysoko zdvižných vozíků, retraků, čelních vysoko zdvižných vozíků, vozíků pro velmi úzké uličky (VNA), nízkých plošinových vozíků, vozíků s dopravníkem, manipulace pro více palet, Lift & Carry, vychystávání, těžkých břemen a montážních linek. Autorovi se bohužel nepodařilo zjistit konkrétní názvy jednotlivých modelů.



Obr. 51 Logistický asistent pro montážní aplikace a propojení procesů společnosti SEW, [79]



Obr. 52 AGV WEASEL společnosti SSI Schaefer, [80]

Společnost také nabízí modely WEASEL z obrázku 52 a WEASEL Lite, které jsou určeny pro přepravu standardních nákladů (např. bedny a regály) s hmotností do 35 kg. Dále spolupracují s DS AUTOMATION na vozíku Sally Compact, to je AMR vybavený technologií SLAM s nosností až 100 kg. [80]

4.1.16 Stäubli

Společnost Stäubli nabízí model MRS90, převzatý od společnosti HelMo, který představuje mobilní manipulátor (MoMa) s navigací pomocí LiDARu, jedná se o AMR. Tento model je vybaven integrovanou nádrží na stlačený vzduch, multi-couplings systémem pro výměnu nástrojů, nástrojovou stanicí a také integrovanou rotační jednotkou pro otáčení s robotem na nástavbě, viditelným na obr. 53. [81]

V portfoliu jsou také v nabídce autonomní vozíky (AGV) v provedení pad, jmenovitě řady PF3, PF3 OMNI, PF6, PF10, PF30 a PF80 (číslo označuje nosnost v tunách). Model PF3 je tříkolový, zatímco ostatní modely jsou vybaveny všesměrovými koly. Všechny varianty lze doplnit o dopravníkové pásy, couplings moduly, QR čtečky a další moduly pro specializovanou přepravu. Kromě modelu PF80 nabízejí i bezkontaktní nabíjení a navigaci pomocí laseru nebo QR kódů. Modely PF30 a PF80 jsou navíc vhodné pro venkovní použití. [82]

V roce 2025 (Q3) plánují uvedení vysoko zdvižného autonomního vozíku FL1500 (viz obrázky 54), jehož první dodávky jsou naplánovány na začátek roku 2026. Tento AGV s protizávažím bude mít modulární bateriový systém, přičemž nosnost se bude pohybovat mezi 500 a 1500 kg v závislosti na počtu baterií, které jsou součástí protizávaží. Vozík bude také vybaven bezkontaktním nabíjením. [83; 84; 85]



Obr. 53 Mobilní manipulátor (MoMa) MRS90 společnosti Stäubli, [81]



Obr. 54 Nadcházející vysoko zdvižný autonomní vozík FL1500 společnosti Stäubli, [84]

Podrobnější informace poskytl prostřednictvím emailové komunikace Zdeněk Táborský, člen technické podpory Stäubli, za které mu tímto autor velice děkuje.

4.1.17 STILL

Společnost STILL má v portfoliu autonomní mobilní roboty AMR ACH 06/10/15 iGo, které mají nosnost 145, 205 a 215 kg a jsou určeny pro krátké až střední vzdálenosti. Tyto vozíky využívají přesnou navigaci pomocí QR kódů a jsou schopny manipulovat s platformami a stoly, včetně přepravy palet. Vybaveny jsou diferenciálním pohonem s dvěma koly. Model ACH 06 je představen na obr. 55. [86]

Dále nabízí model AXH iGo (obr. 56), který je určen pro dlouhé vzdálenosti a využívá navigaci SLAM. Tento model zvládne manipulaci s vozíky a přepravu palet s maximální nosností 1 tuny, také s diferenciálním pohonem. [86]



Obr. 55 AMR od společnosti STILL: ACH 06, [86]



Obr. 56 AXH iGo z katalogu STILL, [86]

4.2 Analýza současného použití AMR ve firmě THK

V současné době firma THK provozuje jeden autonomní mobilní robot modelu OMRON LD-90 s dvojicí stacionárních dopravníků (obrázek 59), který spolupracuje se dvěma periferními dopravníky: jedním umístěným v hlavní výrobní hale a druhým na stanici kontroly kvality. Stanice kontroly kvality se nachází v klimatizované místnosti oddělené od hlavní haly a je vybavena automatickými vraty, kterými robot přistupuje do prostoru. Ta jsou relativně malá a integrovaná do zdi, což klade určité rozměrové omezení na nástavbu robotu, které bylo zohledněno v návrhu nového provedení. Celý logistický systém je určen pro převážení kusů v RL-KLT 6213 bednách.

4.2.1 Konstrukční provedení

Stacionární dopravník v hlavní hale (vyobrazen na obr. 57) je navržen jako dvoupatrový systém: horní patro slouží k odesílání beden s kusy na proměření, zatímco spodní je určeno pro jejich návrat po proměření. Oba dopravníky jsou poháněné, horní dopravník se vždy aktivuje tlačítkem Start a je vybaven separátorem beden. Tento separátor využívá jednoduchou pákovou konstrukci, kvůli krátké aktivační dráze ale nefunguje zcela spolehlivě. Robot se občas při najíždění zasekne a neaktivuje ho, a pokud je bedna umístěna nesprávně nebo je přeložená, může přes separátor přeskočit. Toto je jedna z mnoha věcí, které jsou následně upraveny v novém návrhu. Kvůli konstrukci dopravníku, umístění rozváděče a nedávnému přesunu, je také přístup k bednám na dolním dopravníku značně omezen.

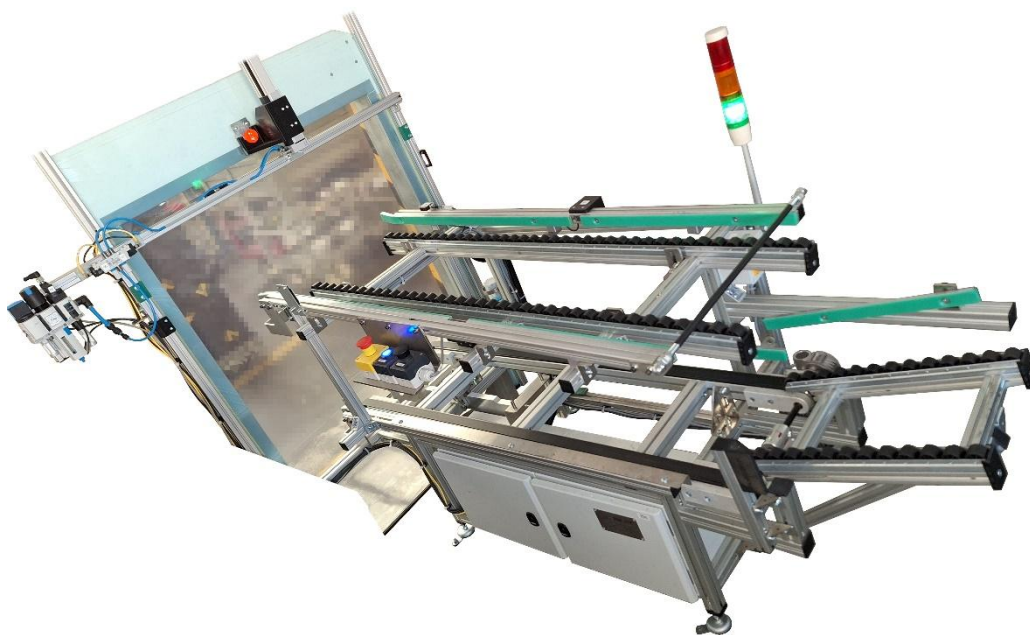
Systém také zahrnuje naváděcí trojúhelník, který vozík využívá pro navádění při fázi přiblížení. Pro zjednodušení nový návrh nadále využívá stávající naváděcí trojúhelník, i když je zcela možné definovat vlastní tvar. Po nedávné aktualizaci softwaru již nemusí být tento tvar spojitý, což umožňuje navigování například pomocí noh stolu. Na dopravníku se také nacházejí nárazníky, které měly usnadnit přístup robotu. Mechanismus, který tuto funkci zajišťoval, byl však deaktivován.



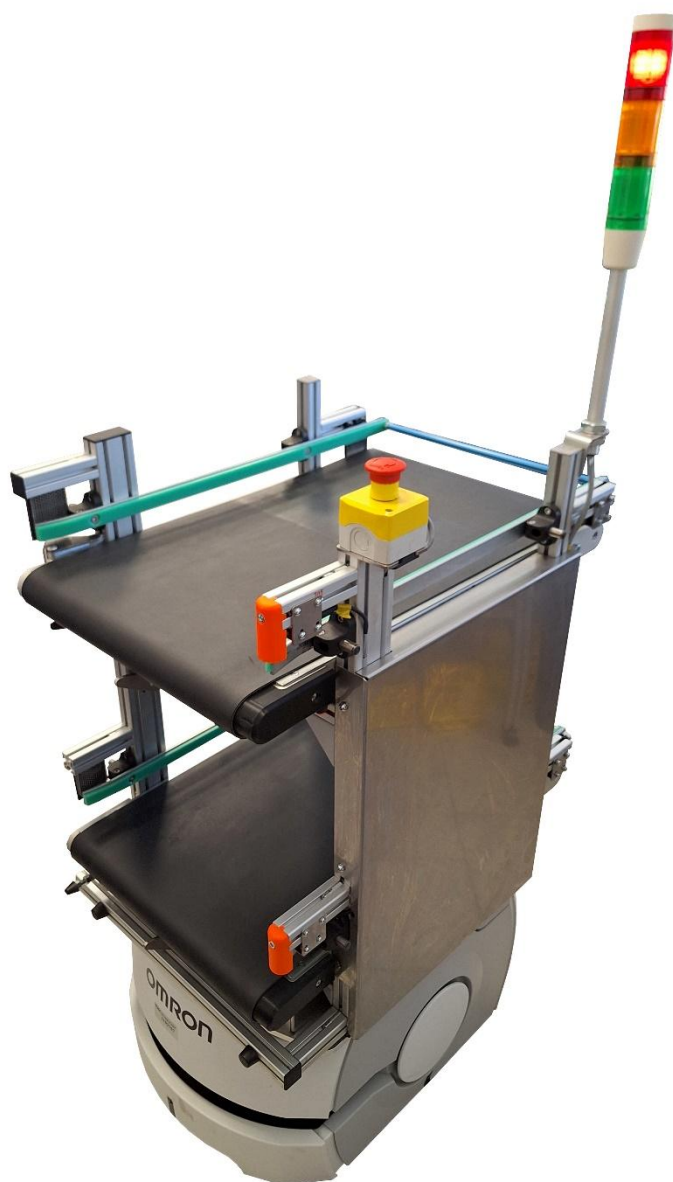
Obr. 57 Fotografie současného konstrukčního provedení dopravníku na hlavní hale [autor]

Stacionární dopravník na kontrole kvality (obr. 58) je rovněž dvoupatrový. Horní patro je kratší a nepoháněné, pohyb beden se zde řídí pouze gravitací. Spodní patro je navrženo obdobně jako dopravník v hlavní hale. Je poháněno a vybaveno separátorem, který má stejné provozní problémy. Tento dopravník slouží k vracení beden, které je možné zakládat shora díky zkrácenému hornímu dopravníku. Opět se zde nachází standardizovaný naváděcí trojúhelník a dojížděcí nárazníky. Celá stanice je oddělena od hlavní haly pomocí průhledných plastových vrat, která se pohybují vertikálně ve dvojici vedení a jsou manipulována pneumaticky. Toto je však jediná stanice s dostupným přívodem vzduchu, proto jsou separátory pasivní a mechanické a nikterak nevyužívají pneumatiku.

Napájecí port vozíku je umístěn na sloupu poblíž dopravníku v hlavní hale. Tento typ napájecího portu lze instalovat buď přímo do podlahy, nebo pomocí instalační lišty, která umožňuje přizpůsobitelné umístění na jakoukoliv stěnu.



Obr. 58 Fotografie současného konstrukčního provedení dopravníku na stanici kvality [autor]

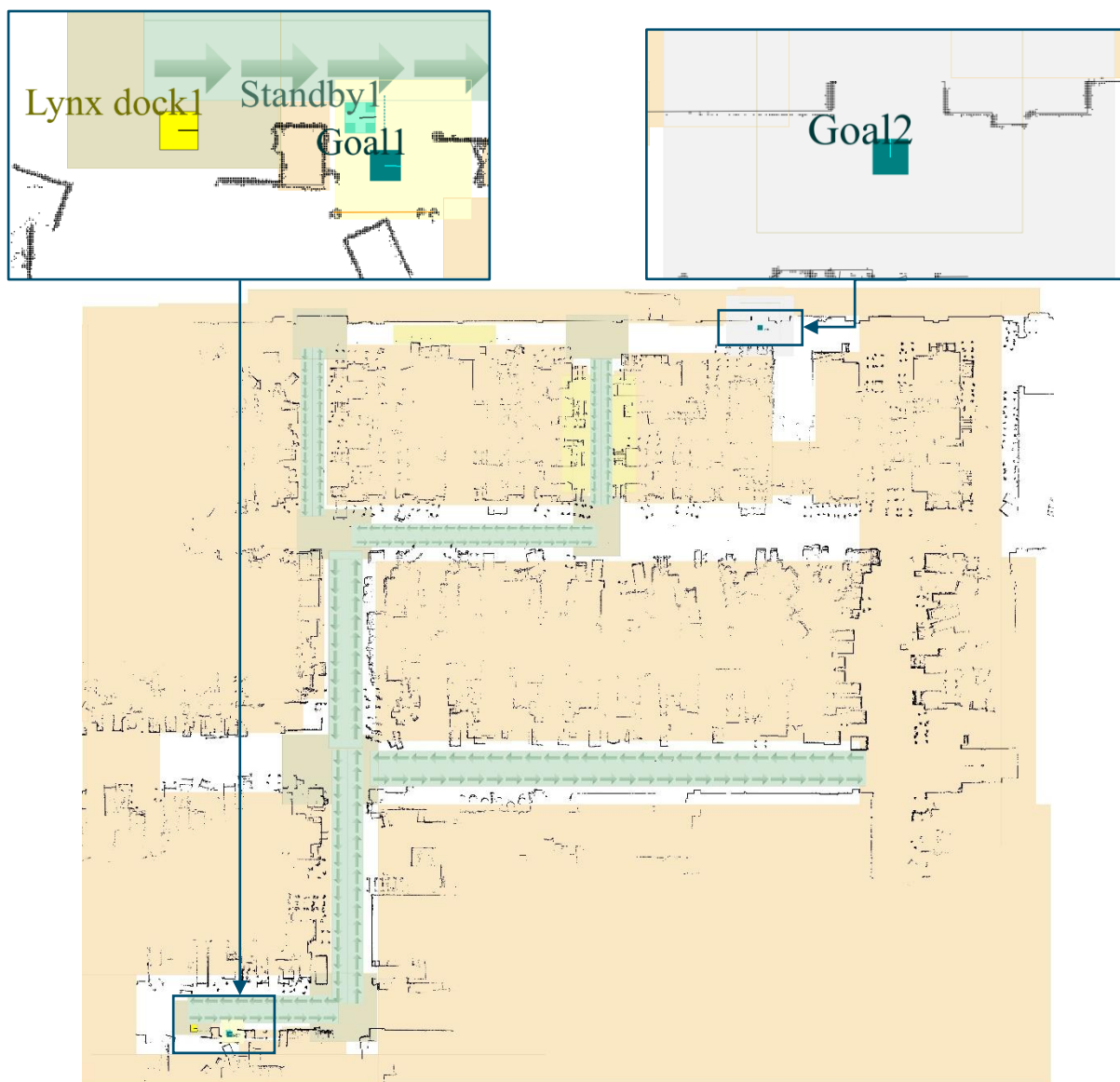


Obr. 59 Fotografie současného konstrukčního provedení vozíku LD-90 [autor]

4.2.2 Mapa a pohyb po hale

Mapa, kterou vozík aktuálně využívá, je na obrázku 60 a zobrazuje pouze prostor, ve kterém aktivně operuje. Robot odjíždí od dopravníku v hlavní hale (levý detail) po frekventované trase, kterou sdílí s vysokozdviznými vozíky. Po odbočení na spojovací cestu projíždí dvojicí křižovatek, kde se opět kříží vytížené cesty. Následně se přibližuje ke stanici Kvalita 3D (pravý detail) podél rovné stěny, kde občas dochází ke ztrátě Wi-Fi signálu, více v kapitole 7.5.5. Základní mapa se skládá pouze z černých bodů a čar, které vznikají při prvotním zmapování pracovního prostoru. Je doporučeno mapu upravit tak, aby co nejlépe odpovídala skutečnému stavu prostoru (např. robot může zaznamenat bednu, která se na daném místě normálně nevyskytuje). Pro správnou funkci systému je však nutné na mapu přidat několik dalších důležitých prvků, v následujících odstavcích jsou rozebrány pouze ty přítomné v aktuální mapě, podrobněji je poté celá problematika řešena v kapitole 7.

Prvním z důležitých prvků jsou oranžové zóny a čáry, které vymezují oblasti, do nichž vozík nemá vstupovat z hlediska bezpečnosti i funkčnosti. Prakticky je efektivní celou mapu ohraničit těmito zónami, aby se předešlo situacím, kdy by se vozík snažil navrhnout trasu mimo



Obr. 60 Současná mapa z programu MobilePlanner [autor]

zmapované prostředí (nevidí tam nic, a tak předpokládá, že tam nejsou žádné překážky). Tyto zóny také vymezují „vnitřky strojových bloků“, zde by se vozík neměl pohybovat, i když tudy projede. Poblíž dopravníku v hlavní hale je využita čára zákazu vstupu, která vymezuje obruč kolem prostoru vozíku. Vozík vidí pouze její nohy, což zvyšuje riziko, že by se ji pokusil podjet (což by se mu nepovedlo, protože je přibližně dvakrát vyšší než on).

Na mapu je dále nutné přidat cíle: Goal1 u dopravníku v hlavní hale a Goal2 u dopravníku Kvalita 3D. Spolu s nimi je definován bod Standby, což je prakticky parkoviště, kde vozík čeká na zadání úkolu, a bod Lynx dock1, který označuje místo s napájecím portem. Je důležité poznamenat, že tyto body označují pouze začátek příslušného makra, nikoli koncovou pozici u dopravníku nebo na napájecím portu (detaily ohledně maker jsou řešeny v následujících odstavcích a v kapitole 7.3).

Mapa je doplněna i o další prvky: zelené zóny se šipkami definují směr pohybu po jednotlivých stranách cest. Olivové zóny (použité na všech křižovatkách) slouží ke snížení jak translační, tak rotační rychlosti a zrychlení robotu, což zvyšuje přehlednost situace při projíždění a poskytuje řidičům vysokozdvížných vozíků dostatek prostoru na reakci. Další podobnou zónou je žlutá zóna v těsné blízkosti dopravníku v hlavní hale, kde jsou rychlosti a zrychlení vozíku zpomaleny velice výrazně. Jedná se o úzký prostor, kde se vozík musí otáčet. Pro tuto zónu byly dokonce zmenšeny bezpečnostní zóny vozíku, jinak by sem nemohl vjet.

Dvojice žlutých zón poblíž stanice Kvalita 3D slouží k určení priorit. Vozík má možnost využít alternativní trasu k tomuto cíli, která však neprochází zcela ideální cestou. Je proto nutné, aby vozík tuto trasu využíval pouze v případě, že původní trasa je zablokována. Kolem cíle Goal2 je nastavena logická zóna, která vozíku přikazuje aktivovat jeden z jeho DQ, na což následně reaguje PLC a otvírá dveře u dopravníku.

4.2.3 Logika převozu

Operátor nejdříve umístí kusy, které chce proměřit, do bedny a tu položí na horní dopravník v hale. Po stisknutí tlačítka Start se spustí motor dopravníku, který posune bednu až na konec, kde se zastaví o separátor. V této pozici bedna přeruší fotoelektrický senzor, což zaznamená PLC a vyvolá požadavek na provedení Goal1, na to reaguje Mobile Planner.

Vozík, který se nachází na parkovišti (kam automaticky přejíždí, když nemá žádný úkol) nebo na napájecím portu (kam přijíždí po 30 minutách neaktivity), se probudí a jeho stav se nastaví na zaneprázdněn. Vozík naplánuje trasu ke Goal1 a provede ji. S Goal1 je spojeno i najížděcí a odjížděcí makro.

Po příjezdu na Goal1 se podle něj robot zarovná a v závislosti na makru začne vykonávat PrecisionDrive (přesný nájezd, během kterého ho navádí trojúhelník), tím se mu také nastaví stav jako zadokovaný. Tím se přesně srovná s dopravníkem a zastaví přibližně 10 cm od něj. Zadokovaný stav během tohoto značně omezuje možnosti a pohyb z důvodu bezpečnosti. Následuje jednoduchý příkaz Move, během kterého vozík popojede zbývající vzdálenost vpřed, tím aktivuje separátor, který se přetočí tak, aby uvolnil již připravenou bednu a zablokoval případnou další za ní. Tato sekvence úkonů je důležitá, protože vozík se během PrecisionDrive natáčí na začátku i na konci. To by mohlo vést k tomu, že by k dopravníku najel zešikma, což by mohlo způsobit kolizi s krajem stacionárního dopravníku a vyvolat chybu nebo špatné zarovnání.

Po úspěšném najetí se spustí další makro, kdy vozík zapne své dopravníky (což se děje přes sepnutí jeho DQ). PLC si toho všimne a v závislosti na tom spustí oba dopravníky na stacionárním dopravníku. Dojde k naložení bedny, po čemž následuje makro kontroly. Každý dopravník na vozíku má dva senzory: jeden vzadu, který se přeruší, pokud se bedna naloží, a jeden vpředu, který se přeruší při nakládání. Pokud je bedna naložená správně, senzor vpředu se přeruší pouze krátkodobě, ale ve finále zůstane neaktivovaný. Tímto se zamezí tomu, že by bedna zůstala naložená „na půl cesty“ a vozík by při odjezdu rozsypal kusy. Pokud k této situaci dojde, vozík vyžaduje manuální vyložení bedny a potvrzení operátorem.

Následuje odjížděcí makro, opět s příkazem Move (tentokrát dozadu) a oznámením o ukončení stavu zadokovaný a zaneprázdněný. Jakmile je přetnutý zadní senzor na horním dopravníku a zmizí stav zaneprázdněný, dostane vozík automaticky zadaný Goal2 a začne vykonávat přejezd (tím se opět stane zaneprázdněný). AMR naplánuje trasu ke stanici Kvalita 3D a provede ji, přičemž se nadále řídí všemi zónami, kterými projíždí. Při příjezdu ke Goal2 vjede do logické zóny, která ho donutí aktivovat jeden z jeho DQ, na to zareaguje PLC tím, že otevře dveře u stanice.

Po příjezdu na Goal2 se vozík opět zarovná a procedura je stejná jako u Goal1: PrecisionDrive, Move, zapnutí dopravníků na robotu (tentokrát v opačném směru) a následné zapnutí dopravníků na stacionárním dopravníku (pouze spodního, protože horní není poháněný). Dojde k vyložení a případnému naložení bedny ze stanice Kvalita 3D. Pokud vozík „nezačíná“ tím, že naloží bednu na Goal1, funguje stanice Kvalita 3D obdobně: operátor umístí proměřené kusy do bedny, umístí ji na spodní dopravník a stiskne tlačítko Start. Bedna opět zastaví o separátor a přeruší paprsek čidla, na základě kterého PLC zadá úkol Goal2.

Po dokončení se vozík vrátí zpět (Move) a zruší stav zadokovaný. Nyní záleží na tom, zda vozík naložil bednu z Goal2 nebo ne. Pokud ano, v závislosti na přerušení zadního senzoru na dolním dopravníku automaticky dostane zadaný Goal1 a vrátí bednu. Pokud ne, začne se automaticky vracet na parkoviště a čeká na další úkol, čímž se mu zruší stav zaneprázdněn.

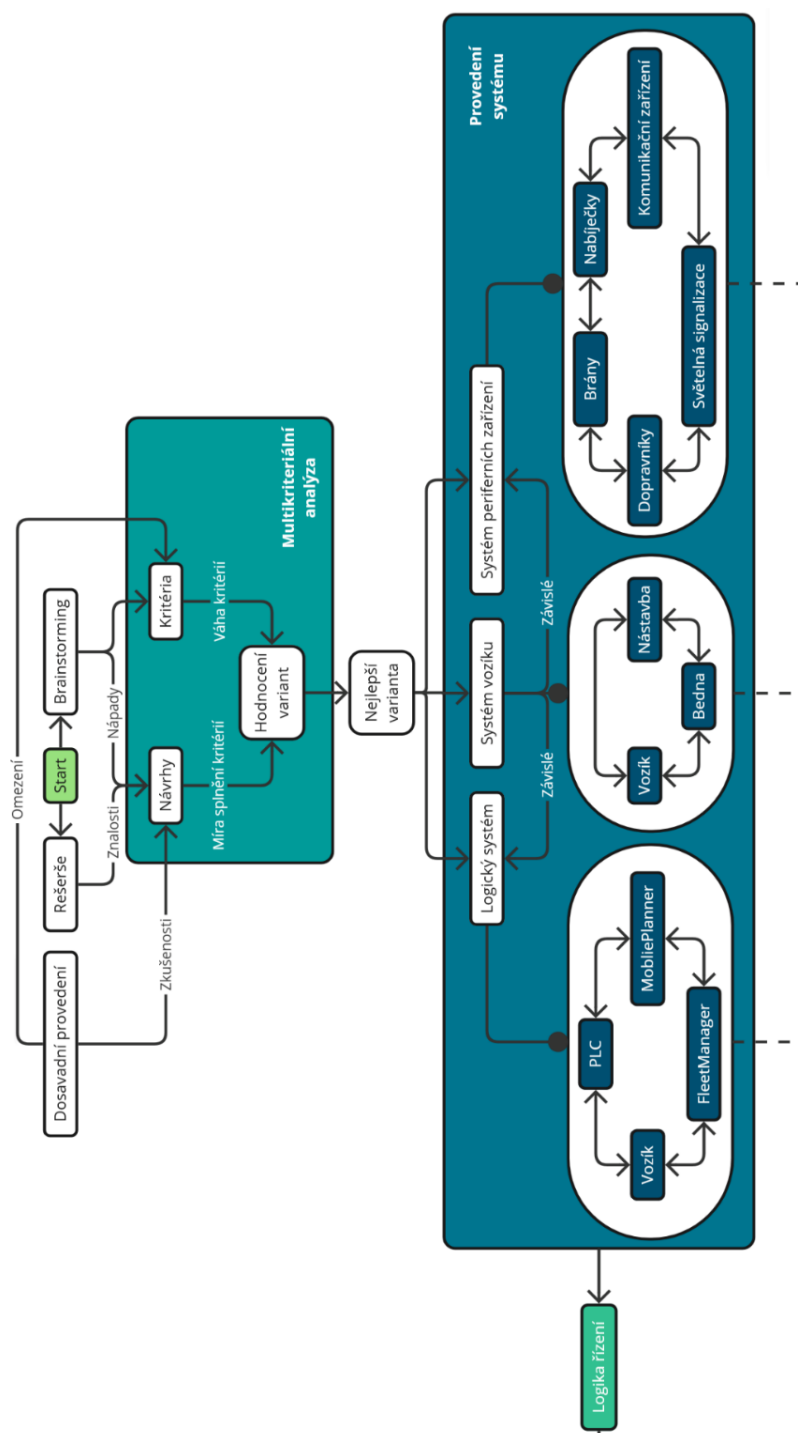
4.3 Systémový rozbor

Systémový rozbor je metodika návrhu, při které je celý systém rozložen na jednotlivé subsystemy a během které dochází k analýze vzájemných vztahů mezi nimi a vlivů na celkovou funkci/činnost systému. To znamená podrobné posouzení mechanických, elektronických a softwarových částí, jejich schopnosti efektivně spolupracovat a bezchybně fungovat v reálném provozu. Každý subsystem je detailně zkoumán nejen z hlediska jeho funkce při provozu systému jako celku, ale i s ohledem na možné interakce s ostatními subsystemy. [87]

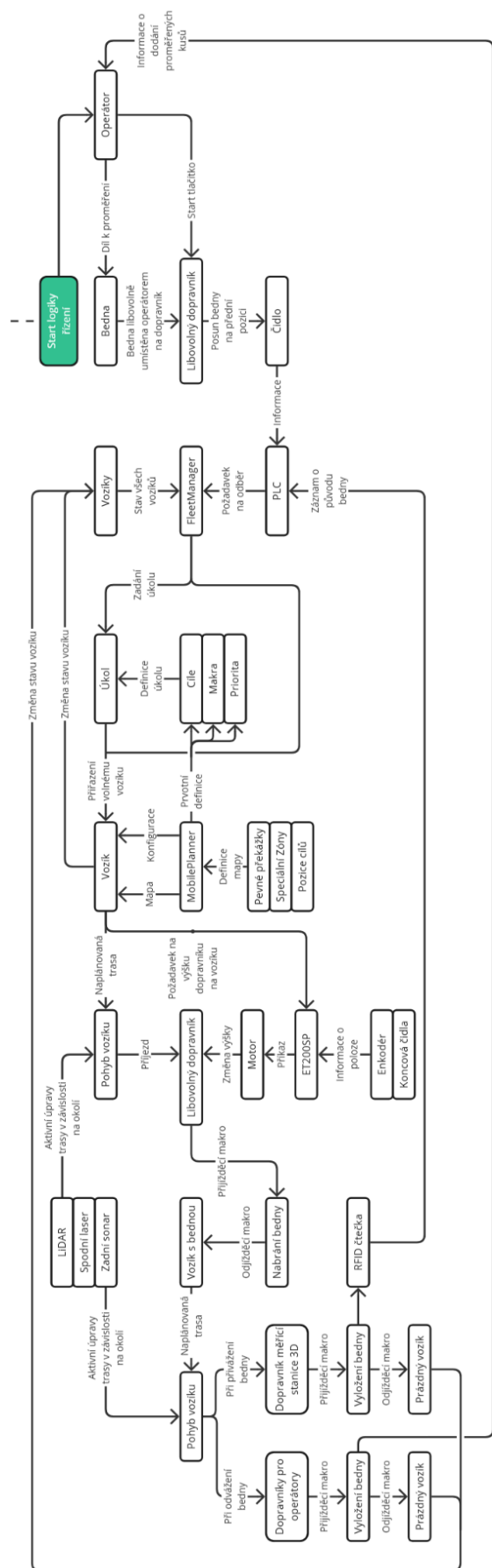
Klíčovou součástí systémového rozboru je také analýza prostředí, ve kterém systém pracuje. V případě mobilního robotu se tak jedná nejen o prostředí výrobní haly či skladu, ale také o logistický systém, ve kterém vozík musí pracovat. Při provozu je důležité zohlednit faktory jako opakovatelnost pohybů, bezchybovost chodu a schopnost vyrovnat se s překážkami a dynamickými změnami okolí.

Výstupem systémového rozboru je tak návrh, který zohledňuje optimální propojení všech prvků a podmínky nutné pro efektivní provoz mobilního robotu. Tento strukturovaný přístup je využíván zejména v průmyslovém prostředí, kde do návrhu jakéhokoli stroje či systému vstupuje bezpočet podmínek, od funkčnosti přes cenu až po bezpečnost.

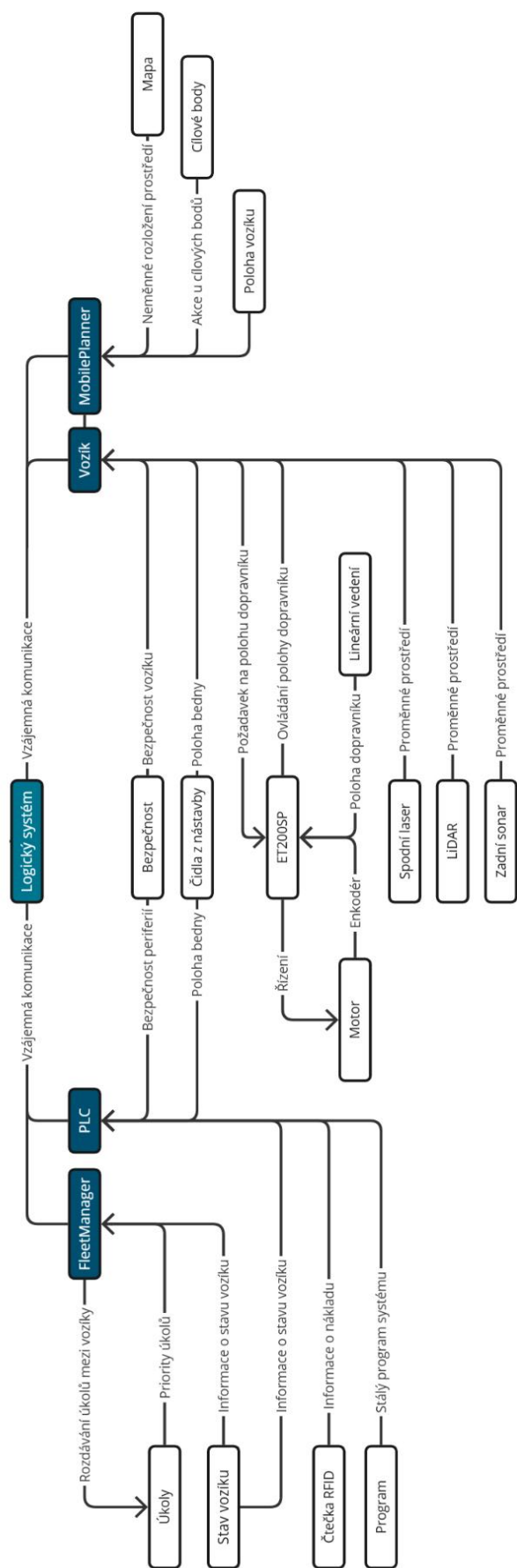
Na následujících stránkách (obr. 61 až 65) jsou uvedeny výstřižky ze schématu systémového rozboru pro návrh logistického systému využívajícího mobilní robot. Systém je však extrémně komplexní, a tak z uvedených výstřižků nelze zcela pochopit celý návrh. Autor proto doporučuje vyhledat kompletní schéma v příloze 3 a orientovat se podle něj.



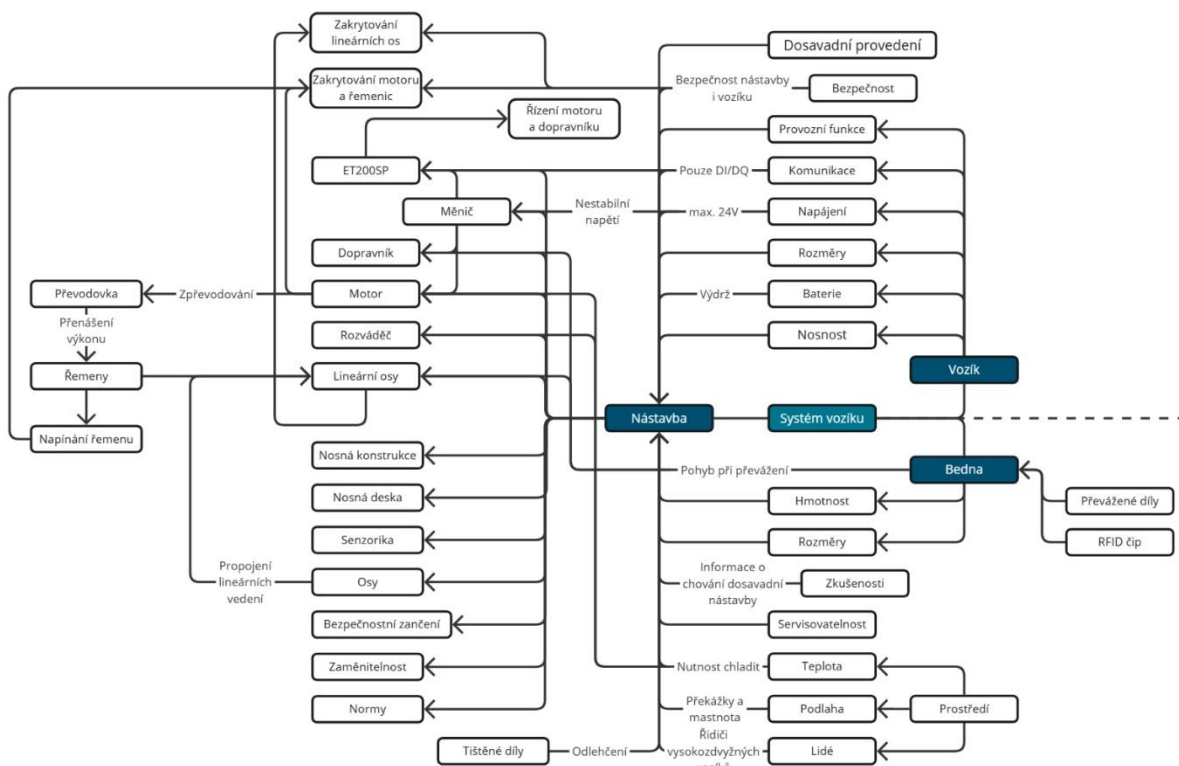
Obr. 61 Systémový rozbor – proces návrhu [autor]



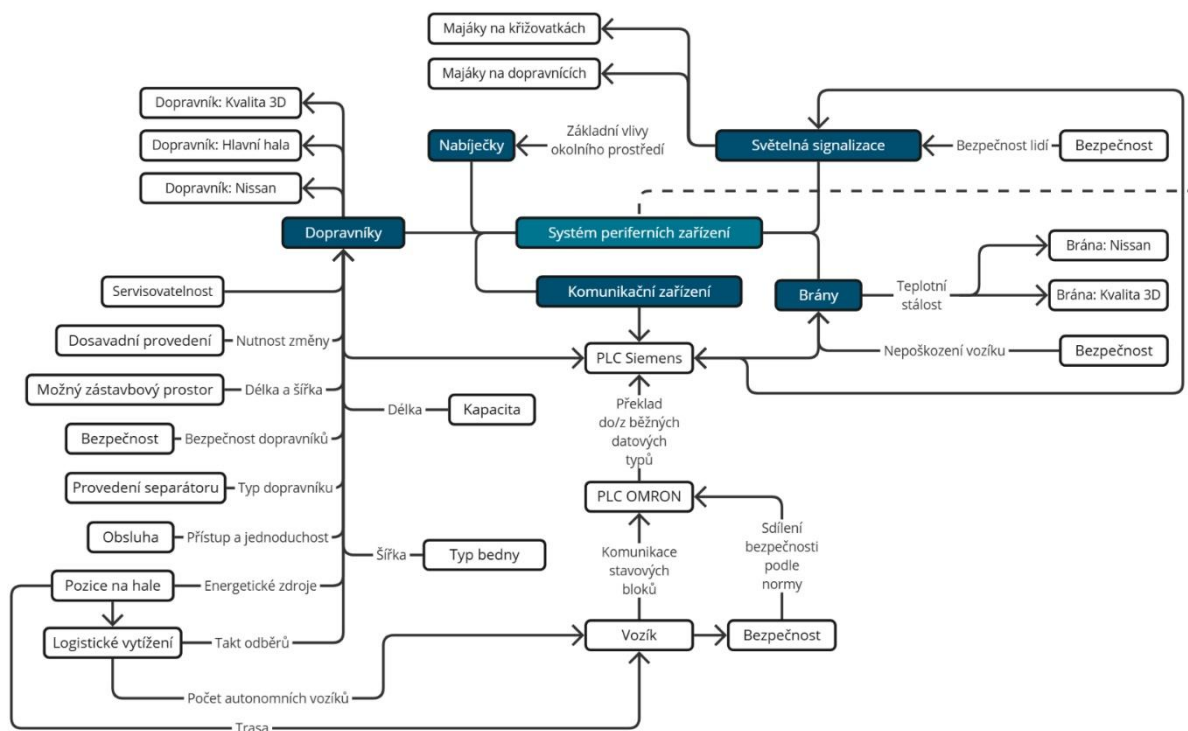
Obr. 62 Systémový rozbor - logika řízení [autor]



Obr. 63 Systémový rozbor – logický systém [autor]



Obr. 64 Systémový rozbor – systém vozíku [autor]



Obr. 65 Systémový rozbor – systém periferních zařízení [autor]

5 NÁVRH VARIANT A JEJICH VYHODNOCENÍ MULTIKRITERIÁLNÍ METODOU

Většina návrhů má několik společných prvků, které se vesměs beze změny musejí vždy nacházet na vozíku, a to za účelem jak funkčnosti, tak bezpečnosti provozu. Jedním z nich je hlavní ovládací panel. Ten slouží především jako uživatelské rozhraní mezi operátorem a mobilním robotem (human-machine interface, dále jen HMI), také se na něm nachází tlačítko s funkcí nouzového zastavení (dále jen E-stop). Dodatečná E-stop tlačítka by pak v závislosti na konstrukčním provedení byla přidána tak, aby byla dostupná ze všech stran vozíku. Dále pak LED signalizační maják pro zřetelně viditelnou signalizaci momentálního stavu zařízení, umístěn ideálně v nejvyšším bodě konstrukce.

Důležitá je také dvojice (či více) bezpečnostních Blue-Spot bodových projektorů, každý z nich promítá jasně viditelný modrý bod před a za vozík, a upozorňuje tak kolemjdoucí na jeho přítomnost a směr pohybu. Jejich umístění je však potřeba vyzkoušet prakticky v provozu (z důvodu zataček a křížovatek), a tak nejsou vyobrazeny v koncepčních návrzích. Součástí provedení je také jednoduchá přihrádka z ohýbaného plechu, do které by při reálné aplikaci byla umístěna většina řídicí elektroniky (blok digitálních vstupů a výstupů, ovladače motorů, komunikační zařízení atd.). Koncepty obsahují i doraz pro usnadnění finálního zarovnání vozíku. Ten není k provozu naprosto nutný, nicméně z praktických zkušeností s aktuálním provedením je předpokládáno, že velmi usnadní odladění procesu najíždění k dopravníkům.

Nájezd k dopravníku probíhá v Mobile Planneru pomocí funkce PrecisionDrive, která vozík z předem stanoveného bodu na mapě pomocí předního LiDAR senzoru navede na jasně definovaný tvarový prvek (v tomto případě se jedná o trojúhelník). Od něj je pak určena finální pozice a orientace. A právě orientace robotu způsobuje problémy, součástí PrecisionDrive procedury je reorientace na naváděný bod před a po vykonání pohybu. To v praxi znamená, že robot na bod nenajíždí zcela rovně a spoléhá, že se otočí až po nájezdu, to ale způsobuje kolizi mezi rohem dopravníku (nebo jiného nejvíce vyčnívajícího konstrukčního prvku) na robotu a dopravníkem stanice. V praxi se tak za tuto funkci přidává ještě funkce Move. Jedná se o pouze lineární pohyb, při kterém robot ignoruje přední laser a vzdálenost počítá pouze z enkodérů na motorech koleček. V tomto provedení PrecisionDrive končí dříve, než je nutné, robot má tak místo na finální srovnání. Zbytek pohybu je pouze lineární Move příkaz. Pomocí dorazu se vozík dokonale dorovná k dopravníku stanice s využitím drobného prokluzu hnaných kol. V Move funkci, na rozdíl od všech ostatních, mu totiž nevadí protočení koleček (LiDAR nekontroluje, tudíž se pohybové informace nemusejí shodovat). Nedojde ani ke ztracení jako v jakékoliv jiné situaci, kdy se vstupy z enkodéru a hlavního laseru rozcházejí, protože finální pozice je vždy přesně ta, kterou robot očekává.

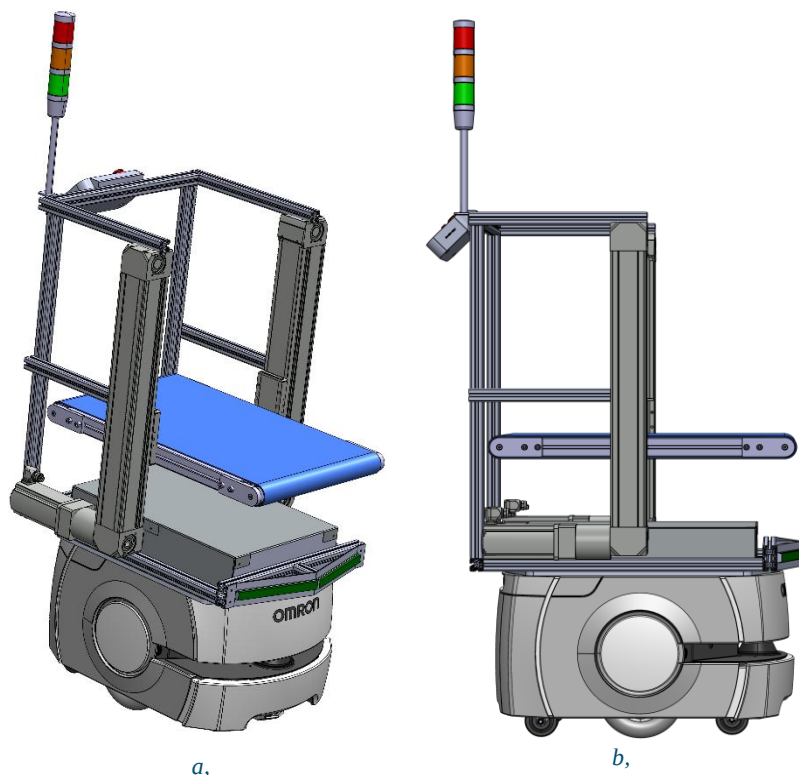
Všechna koncepční provedení jsou v určitých parametrech omezena. Využívá-li návrh jakýchkoliv externích pohonů s potřebou složitějšího řízení, využívajících u motoru i ovladač (poháněný dopravník zapnuto/vypnuto a reverzace chodu není problém), musí být možno komunikaci mezi ovladačem a robotem provádět pomocí digitálních vstupů a výstupů (dále také DI/DQ). Vozík nedisponuje jakoukoliv jinou formou odchozí komunikace, jako je například Modbus, či jakýmkoliv komunikačním protokolem jako například EtherCAT.

Rozměry nástavby robotu jsou limitovány jak kvůli rovnováze vozíku a dostatku místa pro chodce při pohybu na chodníku, tak velikostí a hlavně výškou vstupních dveří na stanici 3D. Ta musí být teplotně kontrolována a je tak oddělená od výrobního prostoru na hale, k doručení bedny dovnitř se využívá pneumaticky zvedané přepážky.

Varianty jsou hodnoceny v závislosti na několika kritériích: jednoduchost montáže, funkčnost a univerzálnost, spolehlivost, inovativnost, nutnost úpravy okolí, ekonomičnost a bezpečnost. Jednoduchostí montáže je míněna celková technologická složitost konstrukce. Funkčnost a univerzálnost zahrnuje principiální fungování návrhu, společně s jeho možností adaptovat se na změny v okolním prostředí a celkovou funkčnost logistické sítě okolí robotu. Spolehlivostí se rozumí jednoduchost oprav a nízká poruchovost jak konstrukčního, tak systémového a funkčního provedení vozíku a jeho periférií. Inovativnost návrhu je poměrně abstraktní kritérium, nicméně v tomto se názory autora shodují s doc. Prostředníkem, to sice že každý nový projekt by měl přinést určitou míru novoty. Nutnost úpravy okolí není třeba nijak definovat, stejně tak ekonomičnost a bezpečnost.

5.1 Varianta A – Pohyblivý dopravník na dvou lineárních osách

Kvůli logistické podstatě operace, kde je z výrobní linky nutno bednu s neproměřenými kusy vždy pouze odvézt a s proměřenými pouze dovézt (pro 3D měřicí stanici obráceně), je na AMR vyžadována jen jedna pozice pro převoz, avšak ve dvou polohách. Dopravníky na všech výrobních stanicích jsou koncepčně stavěné jako statické a dvoupatrové tak, že v horní pozici cca 1 m nad zemí je prostor pro bedny, které je potřeba odvézt, a v dolní pozici cca 0,5 m nad zemí se nachází vyrovnávací dopravník sloužící operátorům k odbavení již proměřených kusů, které robot přivezl zpátky. Celou logistickou operaci je tak možné zastoupit vozíkem využívajícím pouze jeden dopravník umístěný na dvojici lineárních os, kde každá z nich má vlastní motor a převodovku; celý koncept je viditelný na obrázku 66.



Obr. 66 Koncepční návrh varianty se dvěma lineárními osami [autor]

Celková nosnost os je počítána na 30 kg zátěže (převážené kusy 8 kg, bedna 3 kg, dopravník se senzory 13 kg a hmotnostní rezerva), zatěžovací cyklus po dobu 20s s dobou mezi cykly cca 180 s (motor je vybaven brzdou, tudíž nemusí držet pozici během přejezdu). Dle online konfigurátoru společnosti Festo [88] bylo navrženo několik kombinací vedení a motorů, ze kterých bylo po kontrole vybráno nejekonomičtější řešení s motory, které je ještě možné umístit pod dopravník. Jedná se o lineární osy ELGD-TB-KF-80-500-0H [89], motory EMMT-AS-80 [90] od firmy Festo v kombinaci s motorovými ovladači od společnosti Siemens (ovladače Festo nepodporují ovládání přes DI/DQ). Dvojice os je pak dále vyztužena konstrukcí z extrudovaných hliníkových profilů Item 30x30, na které je také umístěna HMI obrazovka a dvojice dodatečných E-stop tlačítek. Ta by byla umístěna po obou stranách, vždy na nejvrchnější profil, společně se signalizačním osvětlením. Pod nejnižší pozicí dopravníku se nachází ochranná přepážka pro elektroniku, v přední části posléze doraz s plastovými kontaktními plochami. Boční části mezi nosnou konstrukcí a lineárními osami by bylo možno zaplechovat a využít pro uskladnění ovladačů k motorům, které by zde tak měly dostatek místa a průtoku vzduchu k uchlazení. Kvůli pohyblivému dopravníku není možné Blue-Spot projektory umístit kdekoliv do středu vozíku (hrozí riziko, že je dopravník v určité poloze bude překrývat). K jejich připevnění by bylo využito montážní drážky na lineárních osách. Výhodou pohyblivého dopravníku je možnost využít tohoto pohybu k operování separátoru beden na dopravnících nakládacích stanic, není k nim tak třeba přivádět vzduch.

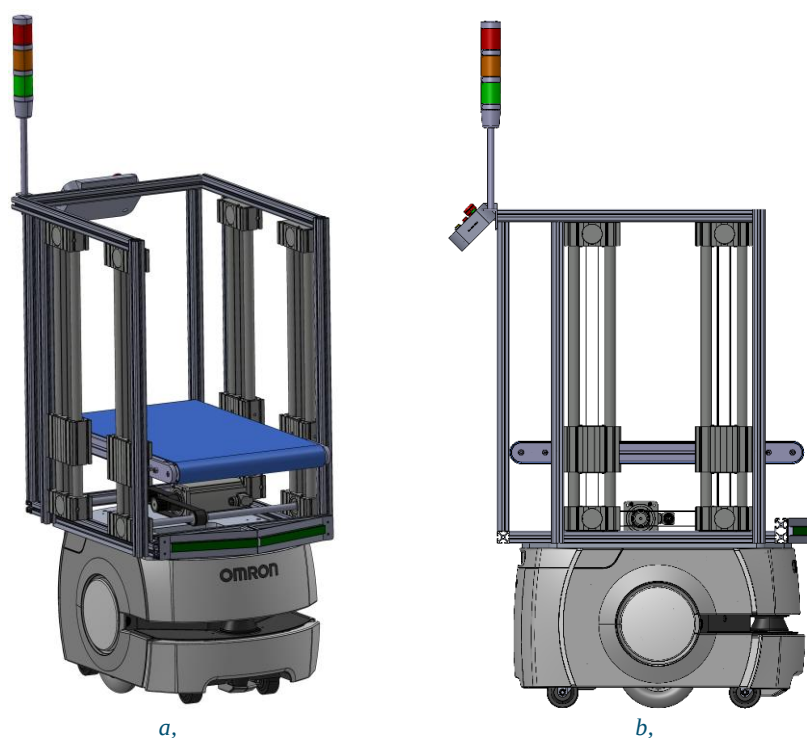
Využití motorů k pohybu lineárních os s sebou však přináší komplikace v řízení a napájení procesu. Motory mohou být napájené maximálně 24 VDC (lze využít měnič pro 24 VDC, který je již nutný pro pohon dopravníku). To pro tuto výkonovou kategorii zcela zamezuje využití krokových motorů, je tak nutno použít servomotory s komplikovanějším ovládáním. Komunikace mezi robotem a ovladačem motorů musí probíhat přes DI/DQ (vozík nemá výstup Modbus, ani žádného komunikačního protokolu). Je také nutno počítat s větším využitím baterie, a tudíž i nižším provozním časem vozíku mezi nabitími. To ale začíná být problém až při celodenním provozu obou vozíků. V porovnání s aktuálním provedením je řešení s pohyblivým dopravníkem ekonomicky méně lákavé. Díky úspoře na koupi druhého dopravníku však cenový rozdíl v pořizovacích hodnotách vstupních komponent není tak markantní. Takto konstruovaný robot je zcela univerzální a je schopen nabírat náklady z jakékoliv výšky v rozmezí délky lineárních os, neomezuje tak jakkoliv provedení nakládacích dopravníků (důležité kvůli zástavbovým rozměrům). Očekává se, že takovéto řešení bude poměrně robustní a přizpůsobivé novým podmínkám v provozu, taky inovativní, alespoň co se využití OMRON vozíků ve společnosti THK týče. Je také zcela schopno využívat dosavadní logistickou síť dopravníků bez jakýchkoliv úprav.

5.2 Varianta B – Pohyblivý dopravník na čtyřech lineárních osách

Tato varianta opět využívá principu omezení převozu na jednu aktivní pozici s možností vícepolohového nastavení. Konstrukce periferních dopravníků také zůstává stejná. Hlavní změnou oproti návrhu A je využití dvou dodatečných lineárních os (celkem tedy čtyř), které jsou tak lépe schopné roznést přenášenou váhu a mohou tak být méně naddimenzované kvůli rozjždění a brždění vozíku (jedná se především o zatížení a momenty ve směru pohybu vozíku, které byly v předcházejícím návrhu zbytečně naddimenzovány). Nosnost všech vedení je opět počítána na 30 kg, zatěžovací cyklus a čas mezi cykly také zůstává stejný (20 s a 180 s). Jako součást řešení je uvažován pouze jediný motor příhodně spojený pomocí rozvodových řemenů s dvěma osičkami, spojující vždy dvě protilehlá vedení (tzn. že každé liché vedení musí

mít obrácený kladný směr otáčení). Pro hrubé nastínění řešení bylo opět využito online konfiguratoru Festo [88], dle kterého se po drobných technických úpravách vybralo vedení ELGR-TB-55-500-0H [91].

Výpočet zatížení a hlavně napájení motoru byl však komplikovanější, než autor očekával, byl tak konzultován s pracovníky technické podpory a s jejich výpomocí byl zvolen motor EMMS-ST-57-M-SEB-G2 [92]. Jedná se o krokový motor, který by musel být vybaven převodovkou 5:1. I tak je výpočetně limitní, a proto bylo nutné prodloužit provozní cyklus na 30 s. Toto je však jen snaha předejít problémům, robot ne vždy poveze plnou bednu a nebude tak maximálně vytižen. To by při správné aplikaci nemělo způsobovat žádné problémy. Je totiž snadné pozici dopravníku měnit během přejezdu mezi jednotlivými cíli. Z hlediska bezpečnosti je toto řešení dokonce lepší. I přestože návrh používá krokový motor místo servomotoru, problém s komunikací mezi ovladačem a vozíkem OMRON zůstává, proto byl opět zvolen ovladač od firmy Siemens. HMI, signální zařízení i tlačítka nouzového zastavení zůstávají umístěn podobně jako u předcházejícího provedení. Změny se však dočkala nosná konstrukce z extrudovaných hliníkových profilů Item 30x30. Ta nyní zahrnuje celou postranní část vozíku a pevně spojuje všechna čtyři vedení dohromady. Opět se nabízí možnost prostor mezi lineárními osami zaplechovat a umístit zde ovladač motoru, popřípadě i komunikační zařízení u kterého by anténa byla externě vyvedená mimo plech. Mezi dopravníkem a robotem stále zůstává umístěn plastový doraz. Plechové krytování elektroniky zde však bude muset být pozměněno tak, aby reflektovalo poháněné osy, pozici motoru, a hlavně potřebu motor dostatečně chladit. Celková spojitost a pevnější konstrukční provedení umožňuje celou horní nástavbu pevně spojit se základní deskou robotu pouze na jedné straně, ze strany druhé bude použita dvojice pantů pro jednoduché odklopení při nutnosti servisovat vnitřek robotu. Osvětlení opět není možné přidělat kdekoliv ve středu nástavby, perfektně se pro něj však nabízí jakýkoliv ze svislých nosných profilů. Pohyblivý dopravník stále umožňuje využívat tohoto vertikálního pohybu k aktivaci separátorů na nakládacích dopravnících. Grafická reprezentace je na obrázku 67.



Obr. 67 Koncepční návrh varianty se čtyřmi lineárními osami [autor]

Stejně jako u varianty A je motor možno napájet maximálně 24 VDC, pro které však lze využít měnič pro dopravník. Krokový motor má jednodušší řízení (v porovnání se servopohonem), komunikace je ale stále možná pouze pomocí DI/DQ. I při vyšším využití baterie v porovnání s aktuálním provedením, je díky jednomu motoru tato verze energeticky úspornější. Ekonomicky je zcela srovnatelné s návrhem A, čtyři slabší vedení ELGR stojí zhruba stejně jako dvě ELGD. Jedná se opět o zcela univerzální provedení, kde je vozík schopen nabírat náklady z jakékoliv výšky v rozmezí délky lineárních os, tudíž jakkoliv neomezuje tak jakkoliv provedení nakládacích dopravníků. Řešení je považováno za robustnější než provedení se dvěma osami, především díky lepšímu rozložení přenášené hmotnosti. Je také velmi inovativní a zcela schopno využívat dosavadní logistickou síť dopravníků bez případných úprav.

5.3 Varianta C – Pohyblivý dopravník s kuličkovým šroubem

Další varianta výškově přestavitelného dopravníku, namísto lineárních os využívá kuličkový šroub s maticí v kombinaci s vodícími tyčemi (viz obrázek 68). Nosnost a pracovní cykly opět zůstávají stejné (30 kg, 20 s, 180 s). Kvůli většímu počtu nosných členů se jednalo o poměrně komplikovaný výpočet zatížení ve směru pohybu vozíku. Proto byly v rámci návrhu varianty trapézový šroub i vodící tyče zvoleny bezpečnější. Jedná se o šroub THK SDA-16-05 [93] a vodící tyče v kombinaci s příslušnými maticemi THK LMF-16-M [94]. Návrh také využívá dvojici krokových motorů EMMS-ST-42-S-S-G2 [92] s převodovkami EMGA-40-P [95]. To vše je znovu uzavřeno v hliníkové konstrukci z I-tem 30x30 extrudovaných profilů, rozložení periférií (HMI, E-stop, signalizace, Blue-Spot) se také nemění. Kvůli poměrně otevřené konstrukci však panuje obava, že by mohly nastat problémy s rovností běhu mezi protilehlými částmi posuvové soustavy. S konstrukcí využívající kuličkové šrouby a vodící tyče nemá autor bohužel žádné další zkušenosti, a tudíž neví, jak tento problém řešit.



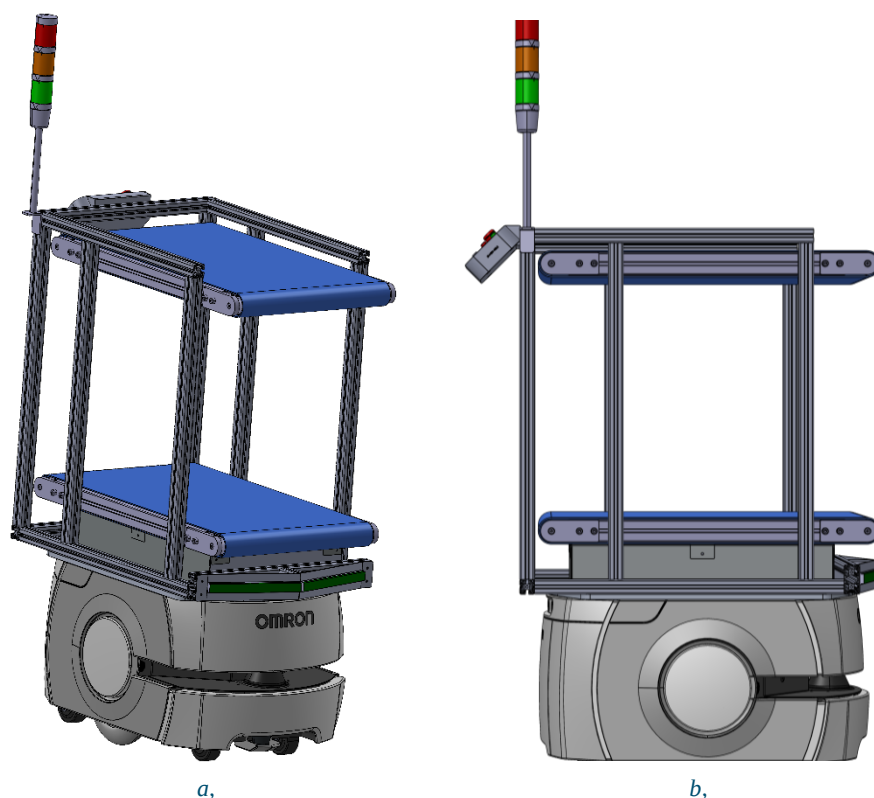
Obr. 68 Koncepční návrh varianty provedení s kuličkovým šroubem a maticí [autor]

Dalším konstrukčním problémem je výška zástavby motorového bloku (motor a převodovka). Ta omezuje spodní polohu dopravníku a i při využití úhlové převodovky neumožňuje dosáhnout požadované hodnoty 550 mm od země. To by mělo za následek nutnost upravit periferní dopravníky na novou minimální výšku, s tím by však následovala i změna výšky maximální.

5.4 Varianta D – Dvoupatrový stacionární dopravník

Návrh D vychází z aktuálního provedení nástavby vozíku OMRON, které se ve firmě využívá. Jednalo by se zde tak o spíše jen kosmetické úpravy, jako je lepší tažení kabelů od senzorů, přidání dodatečných E-stop tlačítek, doplnění o dodatečnou světelnou signalizaci a podobné úpravy. Oproti nynější verzi je zde navrženo HMI panel vyzvednout do ergonomicky lépe přístupné oblasti jako v předchozích návrzích, to je viditelné na obrázku 69. Umístění světlené signalizace je podobné, lze však uvažovat o využití přídavných LED pásek po bocích robotu pro lepší viditelnost indikování směru při zatáčení. Dále je zamýšleno použít dvě dodatečná tlačítka nouzového zastavení umístěná po stranách hlavní hliníkové konstrukce. Je možno celou nástavbu konstruovat jako vyklápěcí (podobně jako v návrhu B), a tím markantně zlepšit servisovatelnost. Stacionární dopravníky umožňují jednoduše namontovat Blue-Spot projektor přímo do středu robotu, což zajistí dokonalou viditelnost, také není nutné komplikovaně počítat nosnosti pohyblivých částí.

Bylo by ale nutné optimalizovat aktivaci separátoru na sesterských dopravnících. Aktuální provedení využívá pákového mechanismu, který se sklopí při najíždění. Díky krátké aktivní části se však často stává, že těžší bedny přes separátor přeskochí. Protože je ale návrh pouze adaptací již implementovaného řešení, není nutno jakkoliv upravovat logistické okolí. Jedná se o zdánlivě nejjednodušší konstrukční přístup bez jakýchkoliv pohybujících se částí.



Obr. 69 Koncepční návrh varianty se dvěma dopravníky [autor]

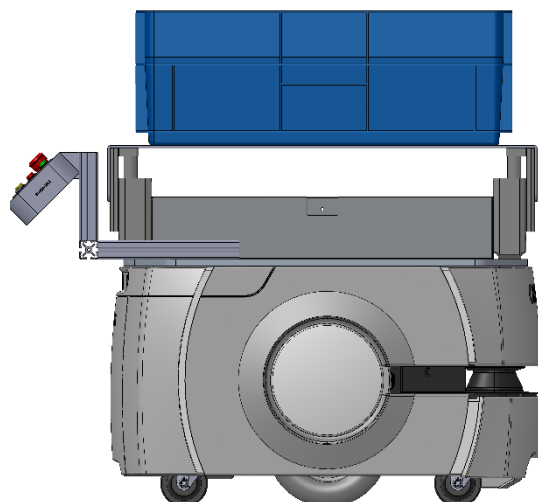
Je také praxí ozkoušený a lze tak konstatovat, že je spolehlivý. I z ekonomického hlediska se tato varianta jeví jako nejvýhodnější, alespoň v porovnání s variantami využívajícími pohyblivý dopravník. Nepřináší však žádnou inovaci a univerzálnost, pásy jsou pevně ustaveny ve dvou výškách a periferní dopravníky tomu tak musejí odpovídat.

5.5 Varianta E – Pick&Drop přístup

V tomto konceptu je odstoupeno od provedení s vysokou nosnou konstrukcí z extrudovaných hliníkových profilů na úkor spíše kompaktnějšího řešení problému přenosu beden. Vozík je zde vybaven dvojicí supportů LES25R-30 od společnosti SMC [96], které společně nesou transportní plát z ohýbaného plechu. Ten je vybavený protiskluzovou gumou z důvodu bezpečnosti během transportu (dochází k náhlým zpomalením vozíku). Celý model nakládky a vykládky beden je od základu přepracován. Nevyužívá jakéhokoliv dopravníkového systému, to znamená úsporu v přenášené hmotnosti a s tím i spojenou delší životnost baterie. Místo toho se bedna na robot naloží podebráním. Vozík při nakládání zajede do speciálně uzpůsobeného stojanu přímo pod bednu, a vysunutím supportů ji nadzvedne (viz obrázek 70). Stojan musí být konstruovaný dostatečně široký tak, aby robotu jakkoliv nepřekážel. Je také nutné, aby mezi vrškem nosné plošiny v zasunutém stavu a jakoukoliv částí stojanu nedocházelo při zajíždění a orientaci robota ke kontaktu. Kompaktnost konstrukce však způsobuje problémy při umisťování ostatního vybavení vozíku. HMI panel je nutno ponechat nízko u základní desky. Není také možno přidat jakákoliv dodatečná E-stop tlačítka, vizuální signalizaci je nutno zajistit dvojicí LED pásek po bocích základní desky robota. Blue-Spot projektor není možno na nástavbu umístit vůbec, bylo by tak nutno jej přidělat k hlavnímu tělu robota. To je však plastové (a připevněno pouze sérií magnetů) a vyžadovalo by tak dodatečné úpravy. Robot již ale nemusí absolutně přesně najíždět na dopravníky, tudíž odpadá nutnost používat plastový doraz. Největším problémem z hlediska konstrukce je kompaktnost celého provedení. Vozík již s nástavbou není dostatečně vysoký na to, aby vyčníval přes bedny a palety, kolem kterých bude v provozu opakovaně jezdit. Chodci a operátoři vysokozdvizných vozíků ho proto mohou jednodušeji přehlédnout a může tak dojít k nežádoucí situaci.



a,



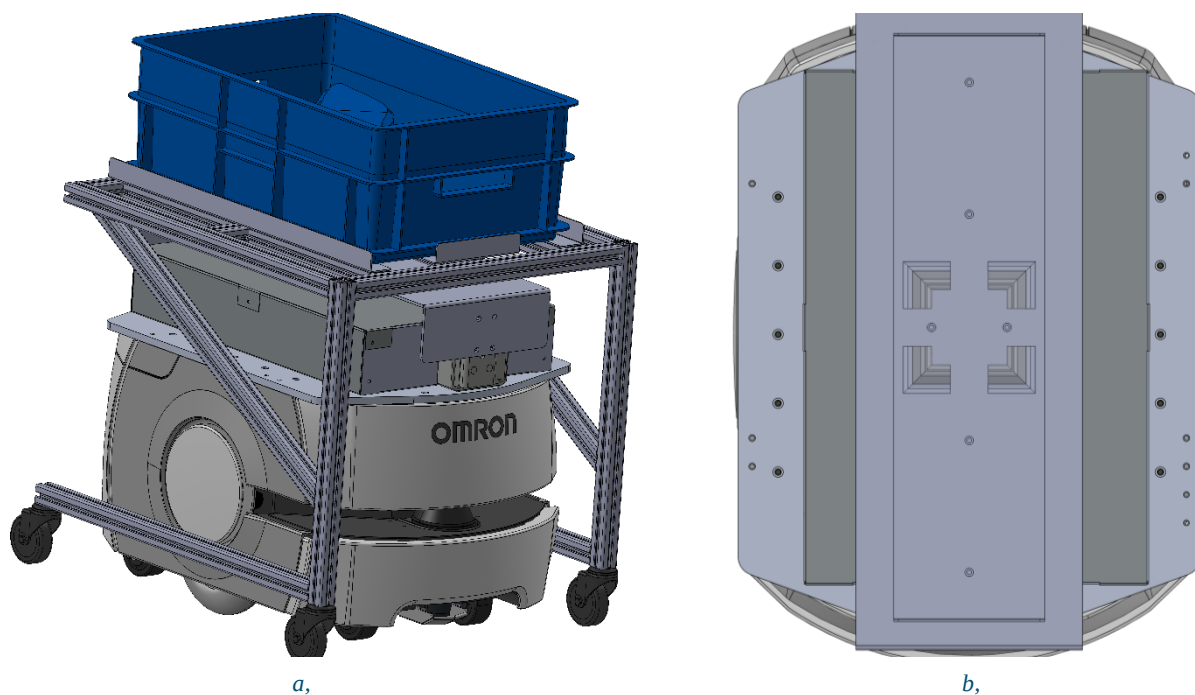
b,

Obr. 70 Koncepční návrh varianty Pick&Drop [autor]

I přesto se jedná o jednoduchou, funkční, a hlavně spolehlivou konstrukci. Její použití by s sebou přineslo i nějaké potřebné změny. Kvůli menší univerzálnosti takového provedení by bylo nutné upustit od základacích dopravníků a přejít k využívání odkládacích stojanů. Ty by sice musely být čtnejší, jsou nicméně jednodušší a menší než tradiční dopravníky. Jedná se zatím o nejvíce ekonomický návrh, který šetří nejen na nástavbě robotu, ale také na periferním logistickém vybavení.

5.6 Varianta F – Pick&Drop stojan

Poslední z návrhů vychází z varianty E, je však obohacen o takzvaný Pick&Drop stojan (z anglického Pick Up and Drop Off). Manipulační plošina byla pro toto provedení drobně upravena, zmizela protiskluzová guma a místo ní byla přidána čtveřice středících kolíků, která zapadne do invertované struktury na každém stojanu (rozeznatelné na obrázku 71.b). Kolíky jsou tvarově uzpůsobeny tak, aby plnily středící funkci, byly schopny přenášet zatížení ve všech potřebných směrech, a zároveň nezpůsobovaly nebezpečí při pohybu bez nabitého stojanu. Kompaktní supporty LES25R-30 [96] jsou využity beze změny. Stejně tak i celý zbytek konstrukce z varianty E, výhody i nevýhody zůstávají vesměs stejné. Jedinou modifikací je přístup k místům naložení a vyložení, na nichž již nebudou žádné stálé konstrukce. Jedná se pouze o předem vyhrazená místa, kde vozíky nabírají a odkládají celé stojany i s bednami, takováto místa je nejlepší (v závislosti na ČSN EN ISO 3691-4 ve většině případů i nutno) barevně vyznačit na podlahu výrobní haly. Mobilita stojanů však také znamená, že nemohou být nikde jakkoliv připojené do sítě (ať už elektrické nebo informační), a tudíž vystává i problém, jak robotu nebo nadřazené logické jednotce (PLC) předat informaci o přítomnosti bedny na vozíku. Tento problém je možné vyřešit sérií kamer sledujících odkládací místa, vybavených optickým rozeznáváním naložených a prázdných beden, to by však řešení značně zkomplikovalo a prodražilo.



Obr. 71 Koncepční návrh varianty se stojany Pick&Drop [autor]

5.7 Metoda multikriteriálního hodnocení pro výběr konstrukční varianty

Celá kapitola a výpočty v ní byly vypracovány na základě postupu doporučeného vedoucím diplomové práce R. Knoflíčkem, v kombinaci s podklady ze zdroje [97] a ze zdrojů poskytnutých vedoucím. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 4 až 6.

Tab. 4 Kritéria posuzovaná v multikriteriální analýze [autor]

Posuzovaná kritéria:

T_1	jednoduchost montáže
T_2	funkčnost a univerzálnost
T_3	spolehlivost
T_4	inovativnost
T_5	nutnost úpravy okolí
T_6	ekonomičnost
T_7	bezpečnost

Tabulky hodnocení jednotlivých variant:

Tab. 5 Tabulka s jednotlivými výpočty hodnocení multikriteriální analýzy [autor]

Varianta A		Pohyblivý dopravník na dvou lineárních osách			
n	kritérium	V_a			
		t_j	g_n	p_τ	τ_n
1	T_1	5	0.7	20	3.5
2	T_2	8	0.9	12.5	7.2
3	T_3	7	0.7	14.29	4.9
4	T_4	7	0.8	14.29	5.6
5	T_5	9	0.8	11.11	7.2
6	T_6	5	0.6	20	3
7	T_7	7	0.5	14.29	3.5
konečné technické hodnocení $\tau = 0.5230$					

Varianta B		Pohyblivý dopravník na čtyřech lineárních osách			
n	kritérium	V_a			
		t_j	g_n	p_τ	τ_n
1	T_1	6	0.7	16.67	4.2
2	T_2	8	0.9	12.5	7.2
3	T_3	7	0.7	14.29	4.9
4	T_4	8	0.8	12.5	6.4
5	T_5	9	0.8	11.11	7.2
6	T_6	5	0.6	20	3
7	T_7	7	0.5	14.29	3.5
konečné technické hodnocení $\tau = 0.5456$					

Varianta C		Pohyblivý dopravník s kuličkovým šroubem			
n	kritérium	V_a			
		t_j	g_n	p_τ	τ_n
1	T_1	2	0.7	50	1.4
2	T_2	7	0.9	14.29	6.3
3	T_3	4	0.7	25	2.8
4	T_4	7	0.8	14.29	5.6
5	T_5	9	0.8	11.11	7.2
6	T_6	6	0.6	16.67	3.6
7	T_7	6	0.5	16.67	3

konečné technické hodnocení $\tau = \mathbf{0.4502}$

Varianta D		Dvoupatrový stacionární dopravník			
n	kritérium	V_a			
		t_j	g_n	p_τ	τ_n
1	T_1	8	0.7	12.5	5.6
2	T_2	3	0.9	33.33	2.7
3	T_3	7	0.7	14.29	4.9
4	T_4	2	0.8	50	1.6
5	T_5	10	0.8	10	8
6	T_6	6	0.6	16.67	3.6
7	T_7	8	0.5	12.5	4

konečné technické hodnocení $\tau = \mathbf{0.4324}$

Varianta E		Pick&Drop metoda			
n	kritérium	V_a			
		t_j	g_n	p_τ	τ_n
1	T_1	7	0.7	14.29	4.9
2	T_2	4	0.9	25	3.6
3	T_3	6	0.7	16.67	4.2
4	T_4	9	0.8	11.11	7.2
5	T_5	3	0.8	33.33	2.4
6	T_6	7	0.6	14.29	4.2
7	T_7	5	0.5	20	2.5

konečné technické hodnocení $\tau = \mathbf{0.4212}$

Varianta F		Pick&Drop stojan			
n	kritérium	V_a			
		t_j	g_n	p_τ	τ_n
1	T_1	6	0.7	16.67	4.2
2	T_2	4	0.9	25	3.6
3	T_3	6	0.7	16.67	4.2
4	T_4	8	0.8	12.5	6.4
5	T_5	2	0.8	50	1.6
6	T_6	8	0.6	12.5	4.8
7	T_7	4	0.5	25	2

konečné technické hodnocení $\tau = \mathbf{0.3880}$

Tab. 6 Finální hodnocení vyplývající z multikriteriální analýzy [autor]

Varianta	Název	Konečné technické hodnocení τ [%]
A	Pohyblivý dopravník na dvou lineárních osách	52.30
B	Pohyblivý dopravník na čtyřech lineárních osách	54.56
C	Pohyblivý dopravník s kuličkovým šroubem	45.02
D	Dvoupatrový stacionární dopravník	43.24
E	Pick&Drop metoda	42.12
F	Pick&Drop stojan	38.80

Dle multikriteriální analýzy je nejlepším řešením nastavby robotu pro novou aplikaci pohyblivý dopravník na čtyřech lineárních osách. Především díky jeho novosti, zachování dokonalé funkčnosti a spolehlivosti a to vše s téměř žádnou úpravou stávajících periferních zařízení.

6 FINÁLNÍ KONSTRUKČNÍ VARIANTA

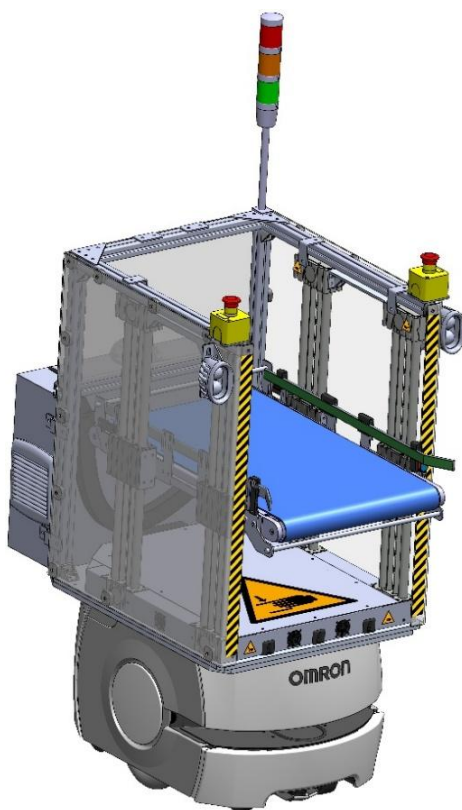
V této kapitole je po iteracích popsán návrh nástavby, která je umístěna na vozík OMRON LD-90, a dopravníku sloužícího pro zakládání beden učených k odvozu a odkládání beden s proměřenými kusy. Celý návrh probíhal iteračně (a trval přes 600 hodin, podrobnosti v kapitole 8), finální varianta se od té počáteční značně liší. Největším problémem byla hmotnost nástavby a její značné prostorové omezení. Koncepčně byla jak nástavba, tak dopravník navrženy tak, aby bylo možné vozík provozovat i v současné logistické síti ve společnosti THK RHYTHM AUTOMOTIVE CZECH bez větších změn. Firma zároveň bezúplatně poskytla veškeré prostředky a zázemí ke zhotovení a montáži všech komponent, za což jí tímto autor znovu děkuje.

Vzhledem ke komplikovanému procesu návrhu a celkové nepřehlednosti situace jsou iterační změny a postupy schematicky vyobrazeny v příloze 6.

6.1 Sestava vozíku s nástavbou

Celkový koncept vycházel z platformy mobilního robotu OMRON LD-90. Na základě možnosti montáže nástavby ke kostře vozíku byla nejprve navržena nosná deska, která slouží jako primární montážní základna pro všechny ostatní sestavy. Dalším klíčovým prvkem byl polohovací systém dopravníku, kolem kterého se následně rozvíjela celá konstrukce.

Návrh nástavby byl výrazně omezen zástavbovými rozměry a zejména nosností robotu, která je pouhých 90 kg. Zpočátku se tato nosnost jevila jako dostatečná, avšak retrospektivně by bylo výhodnější implementovat tento bednový manipulátor na platformu s vyšší nosností, například LD-250.



Obr. 72 Vozík OMRON LD-90 s navrženou nástavbou [autor]

Z důvodu několika návrhových optimalizací bylo výhodnější rozdělit konstrukci do iterací, protože jakákoli změna jedné komponenty vzhledem k prostorovým omezením výrazně ovlivňuje ostatní sestavy.

Finální verze nástavby společně s vozíkem je představena na obrázku 72. Dále následuje stručný popis funkcí jednotlivých sestav, s podrobnějším vysvětlením v dalších kapitolách:

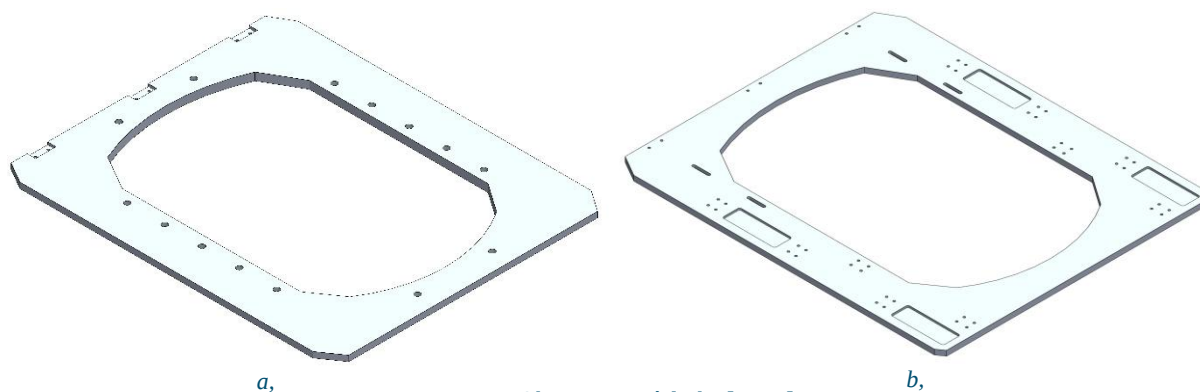
- Nosná deska: spolu s přípojovacími prvky zajišťuje pevné spojení s mobilním robotem a přesné ustavení všech navazujících sestav.
- Krytování motoru: slouží k ochraně motorového prostoru před nechtěným zásahem a k zabránění kontaktu s pohyblivými částmi, jako jsou osy, řemenice a rozvodové řemeny. Zároveň umožňuje oddělení prostoru motoru pro účely chlazení pomocí ventilátorů. Krytování není primárně navrženo pro vysoký stupeň krytí (IP), neboť citlivá elektronika je umístěna jinde a je tak již dostatečně chráněna jinými prvky.
- Nosná konstrukce s krytováním: původně sloužila jako extenze nosné desky, avšak s postupnými iteracemi se její funkce změnila. Nyní slouží k montáži komponent, které nelze připevnit přímo na nosnou desku. Klíčovou součástí této konstrukce je její vnější krytování, které omezuje přístup k lineárnímu vedení. Chrání tak obsluhu i vedení samotné před poškozením při možném nárazu mobilního robotu do překážek.
- Sestava motoru a polohovadla: zajišťuje pevnou montáž motoru (který pohání posuvovou sestavu) a převodovky. Konstrukce také umožňuje nastavitelné napínání rozvodového ozubeného řemenu.
- Sestava pro napínání řemenu: je určena výhradně k napínání rozvodového ozubeného řemenu, které je potřebné pro jeho správnou funkci.
- Sestava řídicí elektroniky: obsahuje veškeré elektronické komponenty nutné pro správnou funkci vozíku a jeho nástavby. Většina elektroniky je umístěna v rozváděči na zadní straně robotu, který je plně oddělen od vnějšího prostředí. Kabeláž vedoucí mimo tento rozváděč je vedena přes průchodky k motorovému prostoru a skrze energetický řetěz k dopravníku.
- Sestava dopravníku: použitý dopravník byl zvolen na základě dostupnosti v podniku, avšak jeho konstrukce se pro danou aplikaci ukázala jako ideální. Klíčovou vlastností je integrace motoru přímo do válce, čímž nedochází k nadměrnému přesahu pohonných částí a snížení hmotnosti. Dopravník zajišťuje přepravu, nakládání a vykládání beden, senzory na něm tyto procesy monitorují.
- Posuvová sestava: slouží k výškovému polohování dopravníku tak, aby byl přizpůsoben různým výškám stacionárních dopravníků, ze kterých vozík odebírá nebo na které vykládá přepravované bedny. Tím tak zajišťuje univerzalitu řešení a jeho značnou nezávislost na provedení okolní logistické sítě.

6.2 Nosná deska

Hliníková nosná deska (obr. 73.a) slouží ke spojení nástavby s tělem robotu. Upevněna je pomocí 24 šroubů M6, jejich rozteče vychází z uživatelského manuálu k LD-90 [98]. Kvůli rozměrům robotu a beden, které má převážet, bylo nutno aby vozík ze všech stran přesahovala. Od dosedací plochy je proto přidáno odsazení potřebné k nadzvednutí nad plastové krytování robotu. Kvůli jednoduší servisovatelnosti byla v následující iteraci rozdělena na dvě části, spodní je pevně spojena s kostrou, horní část se pomocí tří nerezových pantů 40x40 [99] směrem k zadní straně vozíku odklápí a umožňuje tak přístup k jádru a veškeré elektronice (je však nutné, aby kvůli tomuto pohybu byla v kabeláži vůle). Elektronika je připojena přímo k vozíku přes DIN lišty 35x7,5 a vyčnívá nad desky skrze středové výřezy do motorového prostoru (viz kapitola Sestava řídicí elektroniky). V horní desce (obrázek 73.b) jsou vyhotoveny veškeré závitové pro připevnění všech ostatních sestav, a současně i vybrání pro umístění lineárních vedení (viz kapitola Posuvová sestava).

Ty jsou s deskou spojeny pomocí obrobených hliníkových kostek, viditelných na obrázku 74.a. Oproti tradičním rohovým úhelníkům ze zinku [100] se jedná o pevné, relativně lehké, a hlavně přesné ustavení, které zajistí tuhost a souosost posuvové sestavy. U přední dvojice vedení bylo v dalších iteracích nutné kvůli zástavbovým rozměrům a krytování motoru kostky umístit kolmo k vedení a zúžit na polovinu. Za účelem dostatečné tuhosti byla také navržena horní propoj (z obrázku 74.b) spojující vždy dvojici vedení k sobě v podélném směru. Celkově je tak vedení pevně spojeno jako oblouk, na tuhosti dodává ještě dodatečné propojení s hliníkovou nosnou konstrukcí (viz kapitola Nosná konstrukce a krytování nástavby).

Během druhé váhové optimalizace (kterou vzniká druhá iterace) byl změněn design hliníkových spojovacích kostek a horní propoje. Změna ve všech rozměrech měla za cíl snížit hmotnost součástí a hlavně zajistit vyrobiteľnost. U horní propoje tak byla odstraněna jedna z bočních stěn (nahradilo ji prostřední žebro). Umístění děr pro šrouby bylo posunuto více do vnitřku součásti za účelem vymezení prostoru pro hlavu šroubu. V závislosti na nyní již navržených ostatních sestavách bylo také nutné posunout díry pro lineární vedení blíže k sobě a celou desku společně s montážními dírami o 20 mm rozšířit (viz kapitola Sestava dopravníku vozíku). Během tohoto rozšíření byly také ve všech možných místech přidány díry pro protažení stahovacích pásek sloužících pro upevnění kabeláže v motorovém prostoru (nutné vzhledem k nedostatku místa a zavedení rozváděče).



Obr. 73 Nosné desky [autor]

Finální, avšak největší, změna designu přišla se čtvrtým kolem váhové optimalizace. Byla zde kvůli nedostatečné nosnosti, v kombinaci se zavedením rozváděče (díky čemuž již není potřeba tak dobrý přístup k jádru vozíku) kompletně odstraněna horní výklopná deska, a spodní deska ztenčena, tím došlo k úspoře téměř 7 kg. Finální varianta je vyobrazena na obr. 76.a. Zahloubení pro lineární vedení bylo nahrazeno otvorem a zároveň přibýly i kombinované výřezy po stranách desky (funkčně se jedná o váhovou úsporu, ale i o místo pro nasávání vzduchu do motorového prostoru). Pro kontrolu nosnosti desky byla v programu SolidWorks vyhotovena statická simulace deformací při maximální zátěži (90 kg, počítáno pro maximální nosnost vozíku LD-90), ta je přiložena v příloze 5.

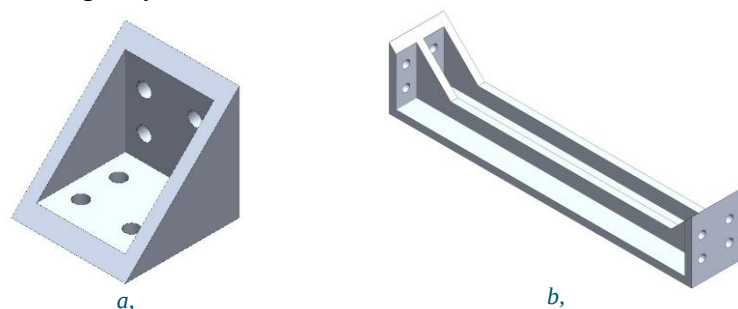
6.3 Krytování motoru

Krytování motorového prostoru prvotně vycházelo z aktuálního provedení vozíku ve firmě THK. To sice nevyužívá žádný motor, v tomto místě je nicméně umístěna veškerá řídicí a komunikační elektronika potřebná pro funkci nástavby. Při přechodu návrhu z koncepční varianty do vlastního řešení bylo však jasné, že je toto místo třeba uvolnit motoru. Elektronika tak byla v nulté iteraci přesunuta do krytování nástavby, mezi vnější kryt a lineární vedení (viz kapitola Nosná konstrukce a krytování nástavby).

Ze začátku bylo krytování tvořeno čtyřmi plnými stěnami a stropním plechem. Tento návrh je vyobrazen na obrázku 75.a. Přední a zadní stěny byly z plechu tloušťky 2 mm, bočnice a stropní plech o tloušťce 1,5 mm. K nim byly upevněny šrouby M6. V zadní stěně byl rovněž otvor pro HMI panel. Celý prostor tak byl kompletně uzavřený a jednoduše utěsnitelný, bohužel by takto bylo komplikované v něm regulovat teplotu a k panelu operátora by byl obtížný přístup.

V první iteraci se tak design krytování kompletně změnil (obr. 75.b), došlo také ke ztenčení plechu na 1,25 mm. Bočnice již nejsou přidělaný přímo na krytování, ale na spodní část lineárního vedení (společně s nosnou deskou), stejně tak zadní a přední stěna. Jediný plech, který spojuje všechny součásti je stropní krytování. To je ke stěnám připojeno opět pomocí šroubů M6 do vynášecích uší (potřebné pro překlenutí tloušťky lin. vedení), ve kterých se nachází zalisované matice. Přestože je toto řešení komplikovanější, znamená, že horní plech je možné odmontovat a vysunout bez přístupu ke stranám (který po sestavení nebude možný kvůli nosné konstrukci), tím je dosaženo servisovatelnosti za provozu.

Ve všech stranách se také objevují díry pro ventilátory (viz další odstavec), v přední stěně pak trojice otvorů pro upevnění nárazníku do nosné desky (viz kapitola Nosná konstrukce a krytování nástavby). Zadní stěna již není osazena HMI (které bylo přesunuto na nosnou konstrukci kvůli lepšímu přístupu) a je zde tak při druhé iteraci umístěna tištěná průchodka pro kabeláž taženou mezi nově zavedeným rozváděčem a jádrem vozíku. Celé krytování je následně utěsněno pomocí pásy.



Obr. 74 Spojovací kostky [autor]

Vzhledem k prostorovým omezením a nevyhnutelné nutnosti chlazení motorového prostoru bylo nutné zvolit větráčky, které se pro industriální použití zcela nehodí. Jedná se o Noctua NF A4x10 24V PWM [101]. Pro dosažení odolnosti vůči prachu a vodě bylo pro ventilátory navrženo krytování skládající se ze dvou totožných plastových krytů a filtrační vložky [102]. Všech šest ventilátorů nasává vzduch z okolí a tvoří tak v motorovém prostoru přetlak, vzduch následně odchází skrze jádro vozíku (to je za normálních podmínek chlazeno konvekčně [98]) směrem ke spodu robotu. Přetlak je v tomto případě nutný, nebude tak docházet k nechtěnému nasávání prachu a jiných nečistot z podlahy pod vozíkem.

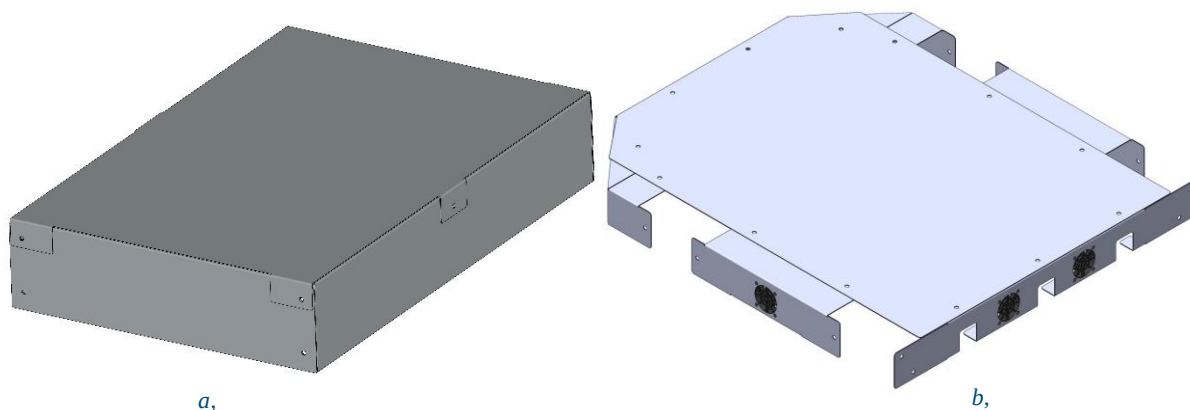
Ve finální iteraci byl plech 1,25 mm kvůli váhové úspoře nahrazen plechem 0,75 mm. Díky pospojování s koncovkami lineárního vedení již totiž není zapotřebí, aby byl plech samonosný.

6.4 Nosná konstrukce a krytování nástavby

Myšlenka nosné konstrukce opět vycházela již z koncepčního provedení. Před vstupem do nulté iterace se však změnila její hlavní činnost. Hliníková kostra již neslouží jako nosná část celé horní části nástavby (cokoliv co není připevněno k nosné desce), ale pouze jako konstrukce pro připevnění komponent, které není možné umístit na koncové bloky lineárního vedení či nosnou desku. S touto změnou je spojené odstranění předních hliníkových profilů, bylo tak možné celou nástavbu zkrátit o jejich šířku (to ale způsobilo problémy s vedením kabelů senzorů). Kostru tvoří hliníkové profily Item 6 30x30 [103] spojované úhelníky [100], standardními upevňovacími sadami [104] a kombinací plechových výpalků v případech, kdy spoj slouží ještě jiné funkci.

V první iteraci byla hliníková kostra osazena ze tří stran plechovým krytáním, které mělo za úkol zamezit přístupu do nebezpečného prostoru mezi pojezdy a sloužit také jako prostor pro uskladnění veškeré řídicí elektroniky. Plech mezi ním a lineárními osami vytvářel uzavřený prostor o tloušťce 150 mm, do kterého bylo na DIN lišty 35x7,5 umístěno řídicí PLC a měnič potřebný pro napájení motoru. Tento prostor je poměrně objemný a vysoký. To by v praxi znamenalo jednoduché chlazení a dobrý servisní přístup. Bohužel se tím ale rozšiřuje půdorys vozíku o cca 320 mm, komplikuje protahování potřebných kabelů a negativně ovlivňuje těžiště nenaložené nástavby.

Součástí první iterace bylo i přesunutí HMI panelu z krytování motoru na zadní část nosné konstrukce, tím je k němu zaručen neomezený přístup. Panel je zde upevněn v tištěném plastovém pouzdře, které zajišťuje ochranu panelu před poškozením a k profilům je připevněn trojicí šroubů M6. Společně s ním je na hliníkovou konstrukci připojena i dvojice tlačítek

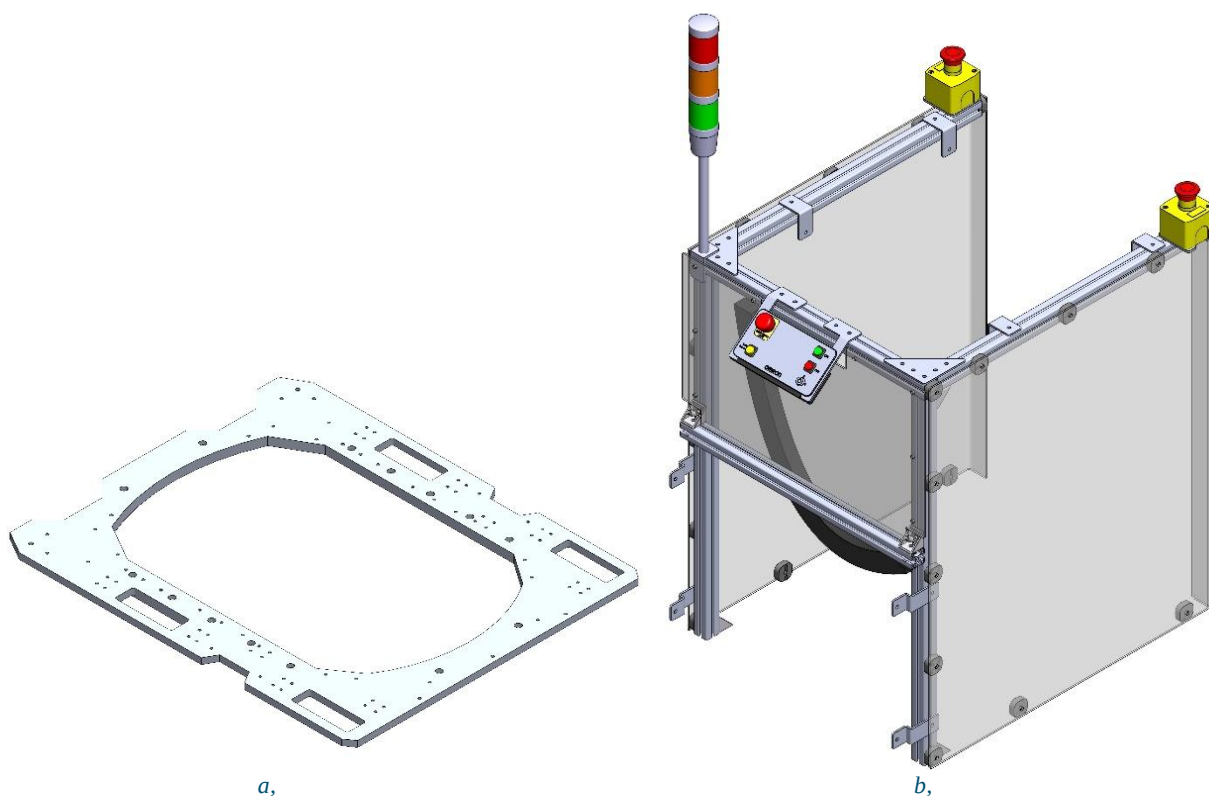


Obr. 75 Krytování motorového prostoru [autor]

nouzového zastavení. Ta jsou umístěna z obou stran čela vozíku (nejblíže zdrojům nebezpečí stlačení vozíkem nebo pohybujícím se dopravníkem). V zadní části je viditelně umístěn signalizační maják.

Pro dosažení dostatečné tuhosti přibýly v druhé verzi trojúhelníkové plechové pláty přes horní rohy nohy konstrukce společně s výpalky spojující hliníkové profily s horními koncovkami lineárního vedení. Nad rozváděč byl také přidán podélný profil, ten byl však ve finální variantě odstraněn na úkor energetického řetězu (viz kapitola Sestava řídicí elektroniky), jehož jeden konec je připevněn v polovině jedné z noh (druhý je spojený s pohyblivým dopravníkem). Největší změnou je kompletní nahrazení plechového krytování za akrylátové desky (tloušťky 3 mm), viditelné na obr. 76.b. Ty jsou umístěné na separátory pro zajištění mezery mezi krytovaním a vozíkem lineárního vedení. Separátory jsou navrženy tak, aby při instalaci zachytily matici do T-drážky [105] pomocí dvou výstupků a usnadnily tak usazení a přišroubování desek. Zároveň bylo také potřeba upevnit HMI panel pomocí výpalků, plastová zůstává pouze ochrana rohů a konektoru kabelu.

Součástí čtvrté iterace bylo upevnění Blue-Spot projektorů na hliníkové profily, přibyl výřez z přední strany vozíku do akrylátových desek (docházelo zde ke kolizi s dopravníkem), doplnění výstražných značek (odpovídající ČSN EN ISO 7010:2021) na všechny konce vedení a výstražné pásy po celé délce nově vytvořeného výřezu. Vznikalo zde totiž zbytkové riziko (viz příloha 2). Během této iterace byl také odstraněn přední nárazník, který měl sloužit pro dorovnání vozíku s dopravníky při nájezdu, z důvodu hmotnostní limitace byl problém řešen komplikovanější softwarovou cestou (více v kapitole Doplnění mapy o logické bloky a zóny).



Obr. 76 Univerzální nosná deska a nosná konstrukce [autor]

6.5 Sestava pro napínání řemenu

Během první iterace bylo jasné, že delší z rozvodných řemenů bude nutné napínat dodatečnou kladkou (osová vzdálenost lineárních vedení se nesmí měnit), byla proto navržena sestava pro napínání řemenu. Skládá se ze spojovacích kostek (popsány v kapitole Nosná deska), dvojice plechových polohovadel, domečků pro uložení ložisek SKF 16101 [106] a osy (průměru 12 mm) s ozubenou řemenicí 16 AT5 [107].

Jako profil řemenu byl zvolen polyuretanový 16 AT5 [108], který má pro aplikaci ideální poměr mezi pevností, kroutícím momentem a výkonem. Jedná se o ozubený řemen, všechny čtyři lineární pojezdy musejí být totiž poháněné synchronně, aby se předešlo možnému křížení při pohybu.

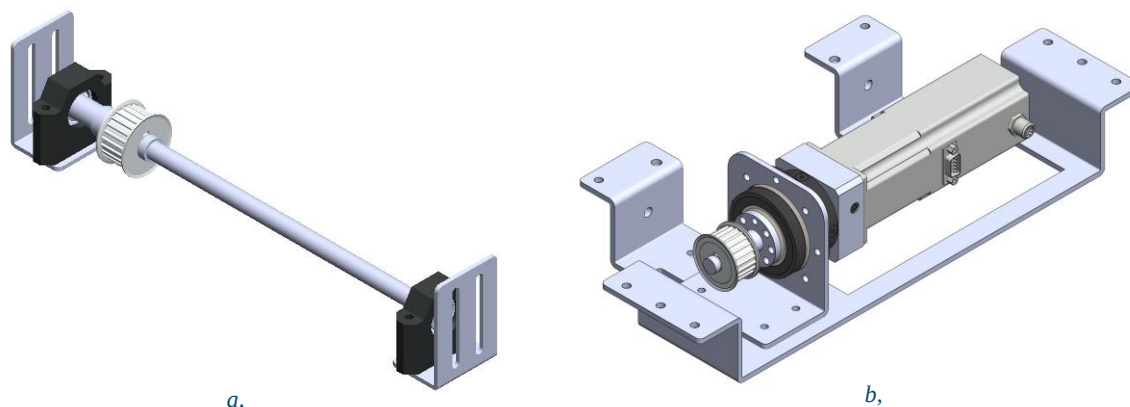
Další změny návrhu přišly až v následujících dvou iteracích. Změněn byl design plechových polohovadel, jak z hlediska vyrobitelnosti, tak jednoduchosti montáže. Kvůli lepší smontovatelnosti byla také upravena osa, přibyla zde drážka pro pojistný kroužek a dorazový průměr. Vnější tvar domečku pro ložiska byl také upraven pro snadnější obrábění a je vyobrazen na obrázku 77.a.

6.6 Sestava motoru a polohovadla

Celá sestava je umístěna na nosný plech (tloušťky 4 mm), ten je kvůli výšce celé sestavy zanořen pod nosnou desku (se kterou je spojen osmi šrouby M6) do prostoru jádra vozíku. V desce byla vypálena dvojice drážek ve kterých jezdí držák motorového bloku, připojen je přes matice pro T-drážku [109]. Tento pohyb slouží pro napínání druhé řemenice mezi motorem a zadní osou lineárního vedení. Do tohoto výpalku je upevněna převodovka s motorem.

V původním konceptu byl použit motor EMMT-AS-80-S-LS-RMB [110] společnosti Festo ve spojení s převodovkou EMGA-80-P-G5-EAS-80 (převodový poměr 5:1) [111]. Tato konfigurace byla zvolena s ohledem na použité lineární vedení (viz kapitola Posuvová sestava), hmotnost maximálního nákladu a čas přejezdu 10 s z krajních pozic. Celý návrh vycházel z výsledků digitálního nástroje pro konstruktéry Electric Motor Sizing [88] dostupného online na stránkách firmy Festo.

Kvůli zástavbovým rozměrům, změně velikosti lineárního vedení (opět viz kapitola Posuvová sestava), hmotnostního omezení celé nástavby a komplikovaného řízení servopohonu bylo však nutné ještě před ukončením koncepční fáze motor změnit za krokový,



Obr. 77 Sestava pro napínání řemenu a sestava motoru a polohovadla [autor]

jmenovitě EMMS-ST-57-M-SEB-G2 [92]. Ten je však méně výkonný, čas přejezdu byl proto prodloužen na 15 s (cyklový čas tedy cca 30 s).

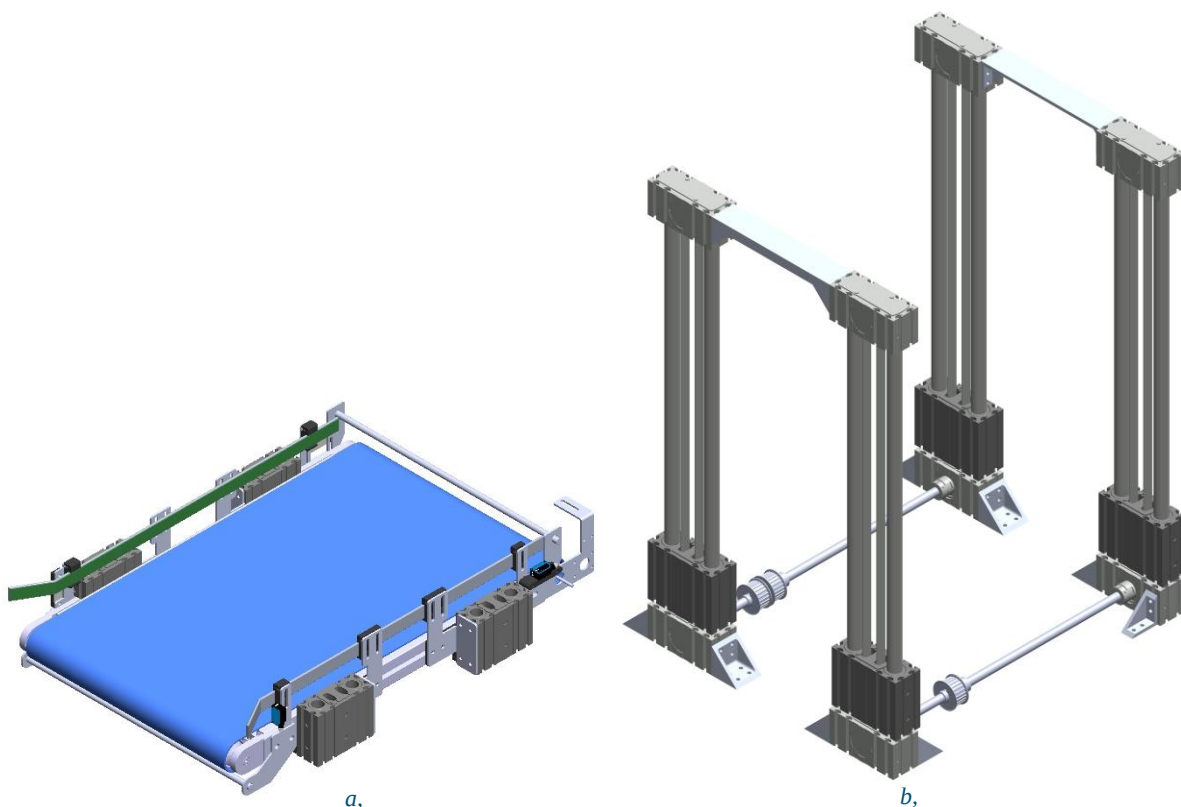
Ze stejných důvodů byl změněn i převodový poměr převodovky, ten je nyní 8:1. Kvůli smontovatelnosti řemenového převodu bylo také nutné upravovat výstupní hřídel. To u převodovek EMGA bohužel není možné. Alternativou tak byla zvolena v první iteraci převodovka PLFE064-008-SSSE3AC-E6.35/23/38.1/66.7/B5/M4 [112] od firmy Neugart. Společně s ní byla navržena výstupní osa převodovky (tu lze na převodovku umístit díky jejímu univerzálnímu výstupu), na které je nasazena ozubená řemenice 16 AT5 [107].

Během finální iterace byl změněn design nosné desky, na které přibýly odlehčovací výřezy určené pro přichycení kabeláže pomocí stahovacích pásek. Ty jsou, spolu s celou sestavou, viditelné na obr. 77.b.

6.7 Sestava řídicí elektroniky

Použití servopohonu vyžaduje odpovídající řídicí systém, samotný AMR totiž tuto funkci nezajišťuje a disponuje pouze digitálními vstupy a výstupy. Ve fázi přechodu z koncepce do návrhu (nultá iterace) bylo proto zvoleno řídicí PLC ET 200 SP [113] společnosti Siemens s procesorem CPU 1510SP-1 PN [114], doplněné modulem F-TM ServoDrive ST [115], který umožňuje řízení pohonu. Součástí systému je i měnič RSD-150B-24 od firmy Mean Well [116], výstupní napájení z vozíku je totiž značně kolísavé. Veškerá řídicí elektronika je umístěna v bočním krytování nástavby.

Během druhé iterace došlo k rozšíření nástavby o rozváděč PanelSeT SBM 400x500x120 [117], do kterého byla přesunuta většina řídicí elektroniky. Přesun se týkal všech komponent, které nemusely být umístěny přímo u jádra vozíku, čímž došlo ke zlepšení



Obr. 78 Sestava dopravníku a posuvová sestava [autor]

organizace prostoru a usnadnění servisu. V prostoru jádra zůstává pouze nutná kabeláž a termostat KTO 111 [118], používaný pro regulaci teploty pomocí větráčků (viz kapitola Krytování motoru). Nově přidaný rozváděč je chlazen ventilátory ClimaSys CV 24 VDC [119], ovládaným druhým termostatem umístěným přímo v rozváděči. Rovněž byl také přidán energetický řetěz B17i.2.048.0 [120], ten je upevněn jedním koncem k noze hliníkové nosné konstrukce a druhým k výpalku na dopravníku, ke kterému vedou kabely senzorů a napájecí kabel. Vzhledem k změně motoru za krokový bylo také nutné vyměnit řídicí kartu za separátní kontrolér CMMT-ST-C8-1C-MP-S0 [121].

Při čtvrté iteraci bylo kvůli váhové úspoře nezbytné vyměnit původní plechový rozváděč za značně lehčí plastovou variantu, jedná se o P-BOX 4050-1 400x500x170 [122]. Zároveň bylo nutné vytvořit žlab pro tažení kabeláže mezi jádrem vozíku a rozváděčem, ta nově prochází tištěnou průchodkou utěsněnou samolepicím pěnovým PU těsněním a děleným průchodkovým rámečkem KEL-ER-E5 [123]. Za účelem zprostředkování komunikace se zbytkem sítě byl také přidán konfigurovatelný ethernetový přepínač WLg-SWITCH [124].

Součástí nástavby jsou také senzory sloužící pro zjištění přítomnosti bedny na dopravníku, jedná se o fotoelektrické senzory WL100-2P3439 od výrobce Sick [125]. Oba senzory jsou umístěny na dopravníku, se kterým se i pohybují. Jejich kabely jsou do rozváděče svedeny již zmíněným energetickým kabelem. U senzoru ve přední pozici (na vstupu dopravníku) se však vyskytl problém – vedení kabelu od něj k začátku řetězu. Ve třetí iteraci byl proto umístěn v pozici těsně pod dopravníkem do držáku pásků na suchý zip KBH-S12 M5 [126].

6.8 Sestava dopravníku vozíku

Již v koncepční fázi byl jako dopravník zvolen KK 2587-4 s integrovaným pohonem v hnacím válci. V době tvorby návrhu byl tento dopravník společnosti ALUTEC standardizovaným výrobkem, nyní ho však pro ocitování není možné dohledat. Alternativou ze současného katalogu se jeví pásový dopravník DPS51,5-650x410mm [127].

Celý dopravník je pevně spojen pouze s vozíky lineárního vedení (viditelné na obr. 78), se kterými se tak pohybuje ve vertikálním směru. Pro ochranu vedení proti nárazu bedny byla přidána dvojice plastových kluzných profilů CF-C1 společnosti Murtfeldt [128]. Ty bylo kvůli vymezení prostoru od koncových bloků nutné umístit na tištěné distanční proklady. Podobným principem je vypodložena i mezera mezi dopravníkem a vozíky, ty jsou totiž vyoseny o 2 mm do jedné strany. Kvůli směru otáčení os je však nutné, aby nebyly umístěny symetricky, tím tak z jedné strany vzniká 4mm mezera.

Na konci dopravníku byla navržena zarážka ze závitové tyče M10, obalená v gumové bužírce. Veškeré tyto komponenty jsou s dopravníkem spojeny pomocí plechových výpalků (T2), ty zároveň slouží jako připojovací místo pro senzory a odrazky. V zadní části je s nimi spojen i jeden z konců energetického řetězce. Pod dopravníkem je umístěn i aktivátor separátoru (viz kapitola Separátor dopravníku) sestávající se z hlazené tyče $\varnothing$ 10 mm.

Během třetí iterace vyšel na povrch problém s napínáním dopravníkového pásu, k tomu slouží koncové hliníkové obrobky. V aktuální verzi jim však v pohybu bránilo umístění a rozteče připojovacích plechů na dopravníku (které se odvíjely od vzdálenosti mezi lin. vedením). Z tohoto důvodu bylo nutné všechny prvky v řetězci posunout a vytvořit tak prostor pro drobný pohyb, kterým je možné pás dopínat (viz kapitola Nosná deska).

6.9 Posuvová sestava

Z fáze koncepčního návrhu byl nejdůležitějším výstupem typ pohybového mechanismu pro polohování dopravníku. Právě k tomu v nejlepší variantě slouží čtveřice lineárních vedení ELGR-TB-55-500-0H [91] společnosti Festo zvolená pomocí digitálního nástroje pro konstruktéry Electric Motor Sizing [88] dostupného online. Jedná se o elektrický lineární pohon s ozubeným řemenem, pracovním zdvihem 500 mm a velikostí koncového bloku 55 mm. Je navržen pro použití s krokovými nebo servomotory a dosahuje maximální rychlosti až 3 m/s při zátěži až 350 N.

Lineární vedení jsou poháněné vždy ve dvojicích pomocí dvou podélných os o průměru 16 mm [91]. Kroutící moment je přiváděn na zadní osu, z té je následně pomocí řemenice (podrobněji popsána v kapitole Sestava pro napínání řemenu) vyveden ozubený řemen pohánějící přední pár vedení.

Během první iterace bylo kvůli váhové úspoře nutné vyměnit typ vedení za ELGR-TB-45-500-0H [129] (právě ty jsou vyobrazeny na obrázku 78.a), tím došlo k váhové úspoře téměř 14,5 kg při zachování většiny důležitých funkčních vlastností. Tato záměna byla možná díky slabému předimenzování vedení 55. Verze 45 má maximální posuvovou sílu pouze 100 N, to je však díky kombinaci zpomalení cyklového času (z 20 s na 30 s) a kvalitnímu pospojování (kterým je zajištěno ideální váhové rozložení) vozíků vedení skrze dopravník dostačující [88; 130].

Kvůli tomu bylo potřeba změnit i průměr osiček na 12 mm [129]. Ty jsou s vedením spojeny pomocí spojek EAMD-25-22-12-10X12 [131], zajišťující jednoduchou smontovatelnost a servisovatelnost.

6.10 Sestava stacionárního dopravníku

Dopravník vychází z aktuálního provedení ve firmě, přičemž klíčovým požadavkem byla možnost retrofitu do stávající logistické soustavy bez nutnosti markantních úprav. Díky tomu tak můžou být všechny dopravníky jednoduše kompatibilní s návrhem nástavby vozíku. Proces konstrukce dopravníku byl oproti nástavbě mobilního robotu výrazně jednodušší. Nebyla zde totiž omezena hmotnost a prostorová omezení byla pouze minimální. Provedení celého systému se od dosavadního samozřejmě liší, jediné funkčně kritické změny jsou však úprava činnosti separátoru, výměna plastových vodících ploch za plechové a aktualizace řídicí elektroniky

Finální verze dopravníku je vyobrazena na obrázku 79.a. Dále následuje stručný popis funkcí jednotlivých sestav, s podrobnějším vysvětlením v dalších kapitolách:

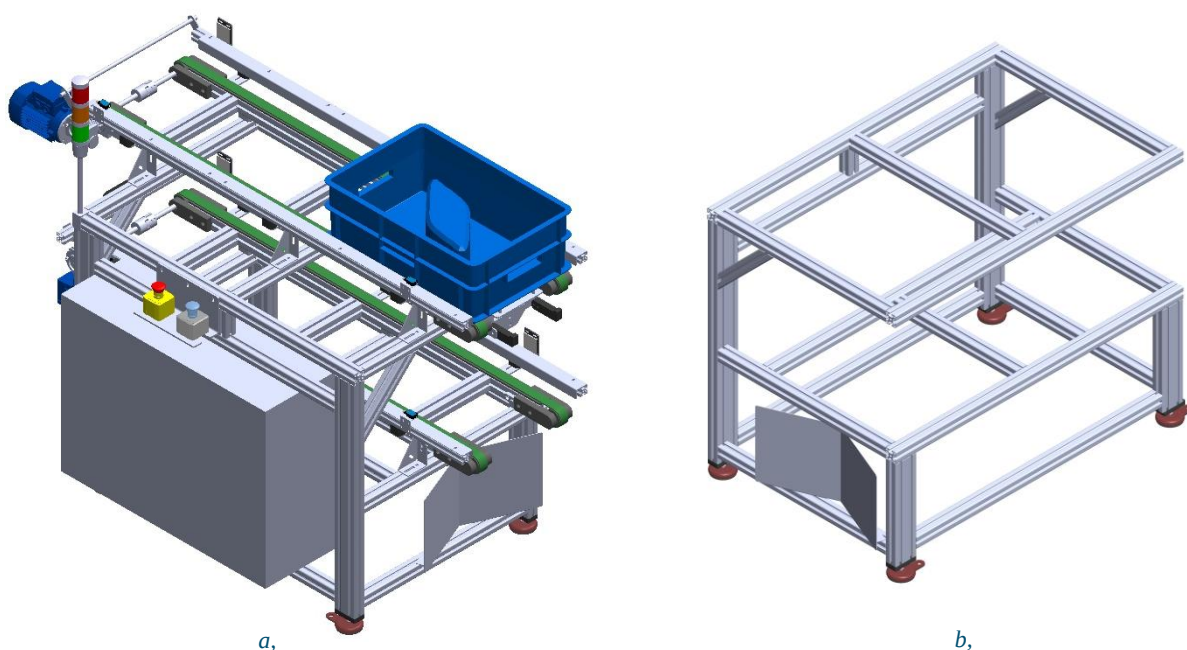
- Nosná sestava: Základem nosné sestavy je rámová konstrukce z hliníkových profilů, které byly recyklovány ze starších struktur poskytnutých firmou THK. Na tuto konstrukci jsou upevněny všechny ostatní komponenty dopravníku, je také pevně spojena se zemí.

- Sestava elektrických zařízení dopravníku: Obsahuje veškeré elektrické komponenty potřebné pro správnou funkci stacionárního dopravníku. Zahrnuje rozváděč s logickými komponenty, senzory, ovládací tlačítka a výstražná a varovná zařízení, včetně signalizačního majáku.
- Dopravníky: Stacionární dopravník je proveden jako dvoupatrový, horní patro slouží k odesílání beden s kusy k proměření, spodní je určeno pro jejich příjem. Dopravníky pocházejí od společnosti Alutec kk a byly opět recyklovány ze starších strojů.
- Separátor dopravníku: Horní dopravník je vybaven separátorem beden, který zabráňuje situaci, kdy by mobilní robot mohl omylem naložit dvě bedny současně. Konstrukce vychází z existujícího firemního řešení, byla ale přizpůsobena specifickým požadavkům navrhované nástavby a optimalizována pro vyšší efektivitu a tím i bezpečnost separace beden.

6.11 Nosná soustava dopravníku

Nosná soustava dopravníku je tvořena směsí různých rozměrů hliníkových profilů, které jsou vzájemně pospojovány kombinací rohových úhelníků [100], standardních upevňovacích sad [104] a plechových výpalků. Konstrukce je navržena ve dvou patrech s dodatečným pospojením stojin nad podlahou pro zvýšení tuhosti. Stojiny jsou tvořeny profily Item 80x40, zatímco patrové spoje a výztuhy jsou zkonstruovány z profilů Item 40x40. Vnitřní část konstrukce je odsazena na jednu stranu kvůli hlubokému rozváděči, který je potřeba z velké části zanořit. Z druhé strany je konstrukce navržena poměrně otevřená pro usnadnění manipulace s bednami ve spodním patře. Toho by v navrhovaném umístění bohužel nebylo možné využít, dopravník je zde z této strany umístěn přímo k další struktuře a bedny je tak nutné vyndávat ze zadní strany.

Hliníková konstrukce (viz obr. 79.b) je postavena na čtveřici stavitelných noh EG-GN-30-60-M10-60-A1-SK od společnosti ElsaGanter [132], které jsou prostřednictvím ok kotveny k podlaze pomocí čtyř průvlakových kotev do betonu M12.



Obr. 79 Sestava stacionárního dopravníku a nosná konstrukce [autor]

Součástí sestavy je také naváděcí trojúhelník. Ten slouží k přesnému najíždění mobilního robota k dopravníku. Trojúhelník je možné nastavovat po celé šířce dopravníku, to je důležité pro optimalizaci nájezdů. Tvar trojúhelníku není jedním ze standardně nabízených společností OMRON, a je proto nutné ho dále definovat v softwaru Mobile Planner nahráním .txt souboru s rozměry.

6.12 Sestava elektrických zařízení dopravníku

Sestava elektrických zařízení dopravníku zahrnuje veškeré komponenty potřebné pro řízení a bezpečný provoz stacionárních dopravníků. Hlavním prvkem napájení a jištění je hlavní vypínač SENTRON 3LD2704-0TK53 [133], který slouží k celkovému odpojení systému, v kombinaci s ním jsou použity výkonové stykače 3RT2015-2BB42 [134].

Jako řídicí jednotka periferních dopravníků bylo zvoleno PLC ET 200 SP [113] společnosti Siemens s procesorovou jednotkou CPU 1510SP-1 PN [114], doplněné o servomotorové kontroléry CMMT-ST-C8-1C-MP-S0 [121] pro řízení motorů samotných dopravníků. Pro propojení se zbytkem infrastruktury je použit SCALANCE XB008 (nekonfigurovatelný průmyslový ethernetový switch) [135]. K detekci beden jsou využity čtyři fotoelektrické senzory WL100-2P3439 společnosti Sick [125], připojené přímo na DI/DQ kartu PLC.

Pro vizuální a uživatelskou interakci obsahuje sestava výstražný světelný sloup Harmony XVM od Schneider Electric [136] a ovládací prvky v podobě tlačítek Start/Stop od stejného výrobce [137; 138].

Pro jednoduché ovládání a přehlednost celého systému byla také stanice Kvalita 3D upravena na hlavní řídicí centrum (hlavní dopravník). Pro ovládání bylo původní PLC nahrazeno počítačovým ET 200 SP CPU CPU 1515SP PC2 F [139]. Tím je umožněno kompletní ovládání vozíků pomocí aplikace Mobile Planner (dosavadní tabletová verze aplikace slouží spíše ke kontrole). Přesunutí řídicího centra znamená i jednoduché propojení s HMI obrazovkou pro výpis stavu systému a varovných hlášek přímo v aktivním prostoru operátora (doposud opět řešeno pouze tabletovou aplikací Mobile Planner).

Pro komunikaci s vozíky a serverem Fleet Manager (viz kapitola Fleet Manager) je zde využito PLC NX102-9100 [140], na kterém je spuštěn OPC UA server. Ačkoliv komunikaci je možné zprostředkovávat i přes PLC Siemens, OMRON má v prostředí Sysmac Studio již předpřipravené komunikační bloky a celý proces se tím značně zjednoduší.

Kvůli zvýšení počtu periferních dopravníků je také nutné sledovat pohyby beden (pro odeslání proměřených kusů zpátky na dopravník, ze kterého byly přijaty). Za tímto účelem byla zvolena technologie RFID, jmenovitě čtečka BIS017A [141] v kombinaci s příslušnými štítky společnosti Balluff (vysvětleno v kapitole Princip funkce logistické sítě).

6.13 Dopravníky

Pro nakládání a vykládání beden z obou pater je využita dvojice pásových dopravníků, které byly zrecyklovány ze starších strojů poskytnutých firmou THK. Původně se jednalo o dopravníky DP55-2000x345mm společnosti Alutec kk [142]. Ty byly však kvůli zástavbovým rozměrům zkráceny z 2000 na 1450 mm. To v praxi znamená snížení počtu možných RL-KLT 6213 beden na dopravníku na dvě. Bylo také nutno nahradit původní pásy za nové TT S04.12 C [143]. Dopravníky jsou vybaveny asynchronními motory

BN-63B-4 [144], které jsou připojeny přes převodovky VF-30-F1-40-P63 [145]. Tělo motoru je u spodního dopravníku namontováno v původní pozici směrem dolů, u horního (obrázek 80.a) byl však motor orientován směrem dozadu kvůli lepšímu přístupu k dolnímu dopravníku.

Na dopravník jsou montovány vodící profily Item 30x30, ty jsou umístěny skrze vypálené plechové držáky odsazené na tištěných prostavcích. Na nich jsou následně připevněny plechové vodící plochy (kterými byly nahrazeny plastové vodící lišty kvůli jejich tendenci zasekávat bednu). Podobně jako na vozíku je i zde bedna zastavována o závitovou tyč M10 obalenou gumovou bužírkou, to však pouze u horního dopravníku. Spodní je dovybaven odklopnou zábranou pro usnadnění odebírání bedny.

Dopravníky jsou k hliníkové konstrukci připevněny vysokými vypálenými držáky, tím je docílena dostatečná mezera nutná pro funkci separátoru (viz kapitola Separátor dopravníku) a zároveň i dobrá servisovatelnost. Doplněné jsou i senzory a reflektory, sloužící pro detekci beden na krajních pozicích a pro kontrolu zavření odklopné zábrany spodního dopravníku.

6.14 Separátor dopravníku

Separátor beden, vyobrazen na obr. 80.c, slouží k bezpečnému mechanickému oddělení beden při nakládání a zároveň jako koncová zarážka dopravníku. Pracuje na principu pákového mechanismu. V neaktivovaném stavu je přední část separátoru zvednutá, bedna v nakládací pozici se tak zastaví o čepy na předním oddělovací blisteru. Po příjezdu AMR se jeho separátorová tyč zachytí za čelisti na stacionárním dopravníku a pohybem dopravníku vozíku směrem dolů dojde k aktivaci separátoru. Tím se zvedne zadní část mechanismu, která zabráni posunu případné další bedny ve druhé pozici.

Základním prvkem separátoru je obrobená hliníková páteř, na kterou jsou upevněny všechny ostatní komponenty. Tato páteř je otočně uložena v bronzovém kluzném pouzdře, které je pevně spojeno s kostrou dopravníku prostřednictvím ložiskového tělesa LBG-63 [146]. Je také opatřena výřezy v místech potenciálního kontaktu s hliníkovou konstrukcí dopravníku.

K nosné konstrukci dopravníku je rovněž připevněn jednoduchý seřizovací mechanismus umožňující nastavení svírací výšky obou krajních pozic pomocí šroubovacího silentbloku. Zpětný pohyb separátoru do výchozí polohy zajišťuje dvojice výměnných pružin, které v kombinaci s tvarem čelistí umožňují optimalizaci tuhosti v závislosti na konkrétních požadavcích na proces najíždění vozíku (je zde nutné vytvořit rovnováhu mezi aktivační dráhou separátoru, vzdáleností vozíku od dopravníku při najetí a světlou výškou dopravníku na AMR od podlahy).

Tvar čelistí separátoru je prozatím pouze koncepční. Z důvodu komplikované mechaniky najiždění vozíku je nutné ho upravit pro každý dopravník jednotlivě až v reálu. Pro toto prototypování bude využito 3D tisku, výsledný tvar čelistí bude následně vyroben z plechových výpalků.

6.15 Přepravní bedny

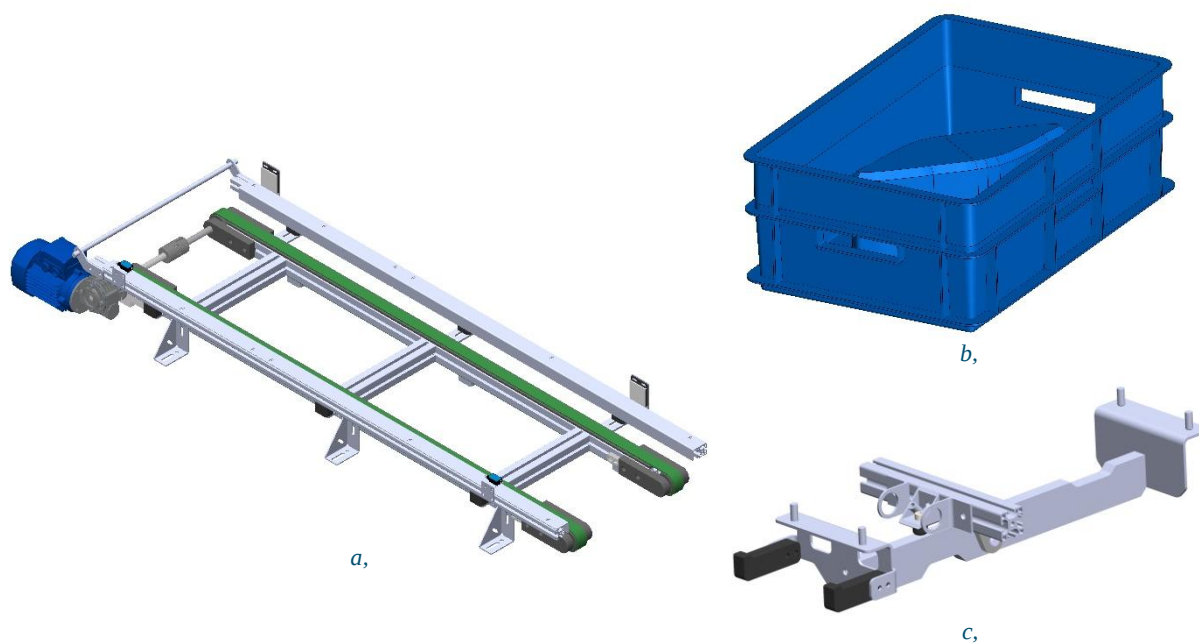
Stejně jako v aktuálně užívaném provedení je jako médium pro převoz kusů určena standardizovaná přepravní bedna RL KLT 6213, pro ideální použití je však nutné ji částečně upravit. Na bedny byl kvůli sledování toku a zadávání destinací umístěn RFID čip, ten je pak čten při příjezdu bedny na hlavní stanici.

Vnější i vnitřní rozměry perfektně vyhovují, kvůli komplikovanému tvaru převážených dílů však může docházet ke špatnému založení do bedny, a s tím spojené nevývaze, která negativně ovlivňuje funkci separátorů beden a nástavby vozíku. Z tohoto důvodu je do středu beden umístěn tištěný ostrůvek (viz obrázek 80.b), který zabraňuje kusy založit jakkoliv jinak. Zároveň však bedny odlišuje vizuálně a zabraňuje jejich promíchání s ostatními přepravními bednami.

6.16 Konstrukční nedostatky odhalené při montáži – praktické poznatky

Během montáže byly identifikovány četné konstrukční a projektové nedostatky, které by bylo obtížné nebo zcela nemožné odhalit pouze na základě digitálního modelu. Možnost vlastnoruční montáže mobilního robotu s nástavbou i stacionárního dopravníku tak vedla k ověření návrhu a odhalení potenciálních problémů. Autor je proto vděčný vývojovému oddělení AMD společnosti THK za přístup k jejich dílně kde k montáži došlo.

Tato podkapitola slouží pouze jako odkaz na podrobný přehled identifikovaných nedostatků a jejich řešení uvedené v příloze 7, aby se předešlo nadměrnému rozšiřování hlavního textu nad rámec práce. Veškeré zjištěné chyby byly úspěšně odstraněny.



Obr. 80 Sestava horního dopravníku, přepravní bedna a sestava separátoru [autor]

7 MOBILE PLANNER A MAPOVÉ PODKLADY

Mobile Planner je počítačový nástroj pro ovládání mobilních robotů společnosti OMRON. Slouží ke tvorbě mapových podkladů, jejich úpravě a kombinaci, doplnění o různé cíle a úkoly, zadávání maker, konfigurování vozíků, propojení se serverem Fleet Manager a sledování provozu flotily [147].

V následujících kapitolách je podrobně popsán celý proces tvorby programu vhodného pro aktivní činnost vozíku LD-90. Ten zahrnuje první spuštění a připojení k robotu, tvorbu jednotlivých skenů, jejich prvotní úpravu vozíkem, optimalizaci a kombinaci takto vzniklých map, následné doplnění o všechny potřebné prvky (cíle, parkoviště, zóny atd.), tvorbu příkazů zahrnutých v mapovém souboru, propojení vozíku se systémem Fleet Manager, konfiguraci chování a vlastností robotu a posledně ověření funkčnosti vytvořeného programu v praxi a finální optimalizaci.

Celá kapitola je zároveň prokládána doporučeními z praxe. Při zhotovování jednotlivých kroků se autor mnohdy zasekl na triviálním problému, který však zpočátku neměl zcela jasnou příčinu či řešení. Svými zkušenostmi se tak snaží obohatit tento jinak poměrně zdoluhavý, a ne příliš poutavý proces. Většina postupů není popsána v žádných oficiálních (běžně dostupných) zdrojích a jsou tak spíše přehledem progresu závěrečné práce než návodem na správné zacházení s programem Mobile Planner. Ze stejného důvodu se autor také povětšinou vyhýbá učení čtenáře, jak s programem pracovat. Celá tato problematika je již plně zpracována v oficiálních návodech společnosti OMRON [98].

V rámci zachování přehlednosti práce je na konci této kapitoly zařazena schematická mapa s vyznačenými trasami a cíli jako obrázek 85.

7.1 Tvorba skenu a prvotní úprava map

Po instalaci baterie se k vozíku lze připojit pomocí ethernetového portu po jeho levé straně, v softwaru Mobile Planner poté zvolit nové připojení na IP adresu 1.2.3.4 a otevřít interface SetNetGo (obr. 81, čtvrtá ikonka). V této kolonce jsou zobrazeny veškeré systémové a bezpečnostní informace o vozíku. Při prvotním nastavení je důležitá pouze kategorie Network, ve které je nutné následně nastavit vzdálené připojení vozíku k Wi-Fi síti. IP adresa vozíku je zvolena jako statická a její vlastní hodnotu je nutné zvolit tak, aby v síti nikdy nebyla duplicitní. Nastavena je také maska, DNS1 a přístupová IP adresa sítě, na které bude robot fungovat. [98]

7.1.1 Sken prostředí

Po tomto prvotním nastavení je možné od vozíku odpojit ethernetový kabel a připojit se pomocí Wi-Fi. Následuje tvorba prvního skenu okolního prostředí, která je zahájena v prostředí aplikace. Při skenování je možné vozík řídit přímo z aplikace, nebo pomocí ručního ovladače připojeného opět po levé straně robotu. Zde autor doporučuje využívat spíše pendant. V praxi je ovládání vozíku takto přesnější. Je také poměrně důležité mít neustále přehled o jeho blízkém prostředí.



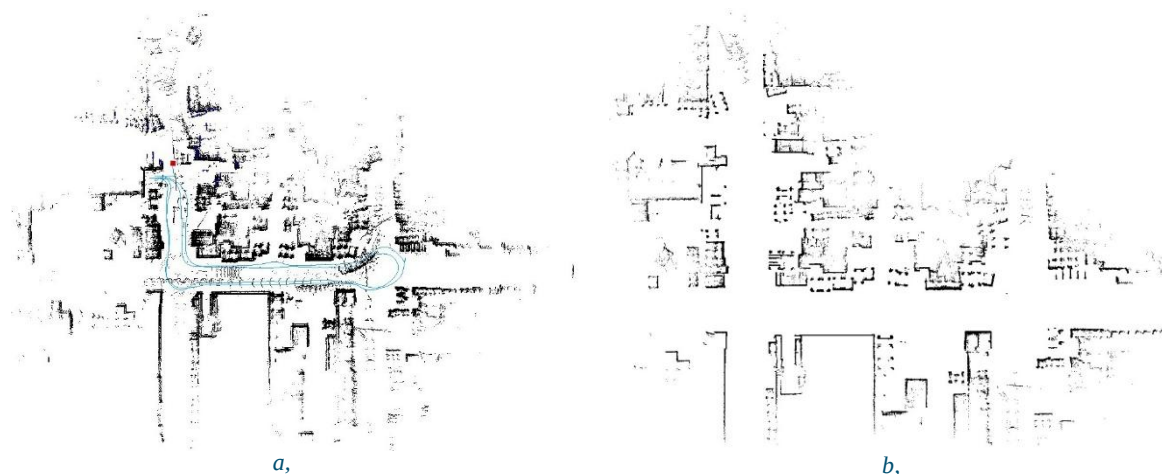
Obr. 81 Možnosti připojení, vytvořeno v programu Mobile Planner [autor]

Sken se obvykle provádí již v provozu, to v tomto případě znamená i pohyb vysokozdvížných vozíků po hale. Kromě očividného nebezpečí kolize zde tím také vzniká možnost chybného zanesení dat do mapy. Průjezd vysokozdvížného vozíku robot do skenu zanechá jako pevné body, ty jsou většinou při závěrečné kompilaci skenu odstraněny, není to však jisté. Proto autor doporučuje v takovýchto situacích LD-90 otočit směrem k blízké pevné zábraně tak, aby na projíždějící provoz neviděl.

Záznam je vhodné vytvářet vždy po a proti směru hodinových ručiček, s detailním zaměřením na důležitá místa jako jsou napájecí porty nebo najížděcí trojúhelníky. Prostory, ve kterých tyto body bývají umístěny, však nebývají průchozí. Je zde důležité vyhnout se skenování pouze otáčením vozíku na místě. Při kompilaci skenu software přiřazuje jednotlivé body z LiDARu k záznamu pozice enkodérů kol vozíku, pouhým otočením na místě se tak značně snižuje přesnost záznamu dané oblasti. Doporučuje se proto veškeré detailní záznamy provádět s alespoň částečným dopředným pohybem, jak je i vidět na videu v příloze 10.

Zároveň také není žádoucí skenovat větší plochy dohromady. Závěrečná kompilace poté trvá opravdu dlouho a velký počet naměřených bodů může způsobovat nepřesnosti v mapě. Vhodné je jednotlivé záznamy rozdělit po zhruba půlhodině a omezit je vždy na jednu oblast (v rámci práce například na jednotlivé ulice mezi stroji). Po kompilaci je následně možné tyto menší mapové soubory spojit do jednoho kompletního podkladu. Přestože má LiDAR senzor dohled až 20 m [77], v praxi je autorem ověřeno, že nejvhodnější vzdálenost od překážek během záznamu je v rozmezí 1 až 5 m.

Po dostatečném zaznamenání okolního prostředí je pak, opět v aplikaci, potvrzeno ukončení záznamu, tím vzniká nový .z2d soubor obsahující získaná data. Soubor je otevřen na vozíku, tím automaticky dojde k přepracování skenu do podoby mapy. Během tohoto procesu lze pozorovat postupné skládání jednotlivých záznamů za sebou v závislosti na pozici vozíku (znázorněné modrou čarou na obrázku 82.a). Po načtení všech zaznamenaných bodů následuje jejich finální kompilace, během této fáze dojde k odstranění většiny nežádoucích záznamů (například průjezd vysokozdvížného vozíku). K tomu dochází porovnáním dat ze stejného místa (při prvním průjezdu zde překážka byla, při druhém již ne). Výsledkem celého procesu je vznik souboru .map s aktuálním obrazem okolí (viz obr. 82.b), který je již možno využívat pro navigaci.



Obr. 82 Skenování mapy, vytvořeno v programu Mobile Planner [autor]

Dalším krokem je vyhlazení a datová optimalizace vytvořené mapy. I přestože během kompilace dojde k odstranění většího množství nechtěných bodů, na mapě se stále můžou vyskytovat nežádoucí artefakty. V procesu tvorby podkladů k diplomové práci se jednalo o: chybné záznamy uprostřed cest v závislosti na průjezdu okolního provozu (obrázek 83.b); zaznamenání bodů na konci dohledu senzoru a tím způsobené zablokování konce v realitě průchozích ulic; nepotřebné body uvnitř bloků strojů. Veškeré tyto překážky je vhodné odstranit pomocí nástroje pro mazání v sekci Draw. V tento moment je doporučeno odstranit i body naměřené mimo aktivní působíště AMR (příkladem je vnější prostor na obr. 83.a), je ale v pořádku je v rámci přehlednosti prostor ponechat.

7.1.2 Úprava mapy

Takto upravené mapy již není obtížné spojit v jednu celistvou, pokrývající celou pracovní oblast vozíků (v tomto případě 226 x 97 metrů). Při vkládání map, které ještě neobsahují žádné zóny (viz kapitola Doplnění mapy o logické bloky a zóny), je vždy doporučeno zvolit možnost zachovat původní datové body. Na krajích jednotlivých map tak vzniknou překrývající se záznamy z jednotlivých měření. To je vzhledem ke statické povaze záznamu žádoucí. V praxi autor často narážel na problémy s lokalizací, kdy v původním záznamu byla překážka (například bedna) na jiné pozici než při průjezdu vozíku. Tím může dojít ke značnému snížení lokalizace, robot se totiž snaží aktuálně pozorovanou překážku přiřadit na mapu, kterou si pamatuje.

Vzhledem k velkému počtu těchto nestálých objektů v oblasti provozu vozíku byly proto jednotlivé skeny prováděny pro každou oblast vícekrát v průběhu celého pracovního týdne (tento postup byl autorovi doporučen při rozhovoru s technikem [77] a experimentálně ověřen při optimalizaci). Tím je po spojení všech map získán obsáhlý záznam veškerých možných pozic a natočení pohyblivých překážek. Průměrná lokalizace se tak v kritických místech zvýšila o cca 30 % (viz kapitola Úpravy okolního prostředí vozíku na hale). Toto vrstvení je výborně pozorovatelné na obrázku 83.b v porovnání s oblastí skenovanou pouze jednou viz obr. 83.c. Celkově tak proces záznamu celé výrobní haly trval přibližně 12 hodin. Z důvodu možného rozšíření logistického systému bylo rozhodnuto zmapovat i oblasti, ve kterých navrhované řešení vozíku působit nebude; byl tak vytvořen zcela kompletní obraz prostředí.

7.2 Doplnění mapy o logické bloky a zóny

Výsledkem práce popsané v předchozí kapitole je pouze holá mapa, jsou zde sice zaznamenány veškeré body z okolí, vozík však stále neví, jak se na mapě chovat a kde jsou jeho cíle.

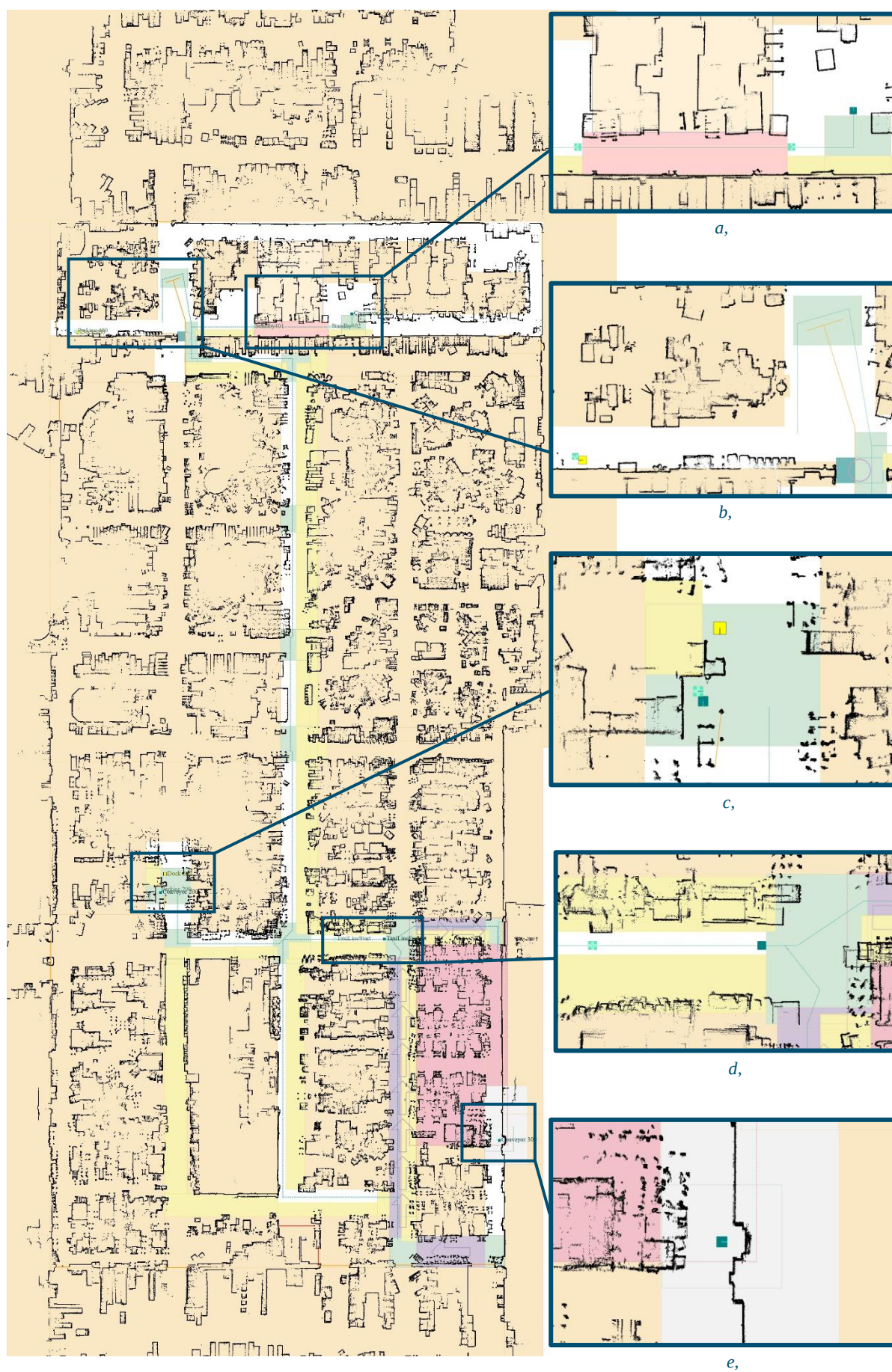
7.2.1 Body

Pro doplnění všech těchto důležitých informací slouží v softwaru Mobile Planner již zmíněná Draw sekce, jako první byly přidány body, ty zde slouží jako fyzikální reprezentace významných pozic na mapě.



Obr. 83 Holá mapa s detaily, vytvářeno v programu Mobile Planner [autor]

- Nejdůležitějšími z nich jsou cílové body, které lze spatřit na obrázku 84 v detailech a, c nebo e jako tmavě zelené čtverce. Ty v tomto řešení označují místo, kde začne docházet k najíždění vozíku k dopravníku. Právě na tyto body jsou následně navázány jednotlivé úkoly. Každý z bodů je definován nejen kartézskými souřadnicemi, ale i možným natočením vozíku, jsou tak s předem definovanou orientací umístěny před každý dopravník do vzdálenosti cca jednoho metru od středu naváděcího trojúhelníku. Tato ideální vzdálenost byla zjištěna experimentálně a je silně navázána na proces najíždění pomocí Engage příkazu (viz kapitola Doplnění mapy o makra a úprava konfigurace vozíku). Je také důležité jednotlivé cíle přejmenovat jednoznačným označením. Na tento název se totiž následně odkazuje v PLC programu při zadávání úkolů. Kromě cílů u dopravníků se na mapě vyskytuje i jeden obecný, sloužící pro ukončení taxi linky (uvedeno níže).
- Další z významných bodů jsou parkovité (obrázek 84, detaily b nebo c, světle zelené čtverce), na kterých vozíky setrvávají po dobu své neaktivity. Každému z vozíků lze přiřadit své parkoviště; nechat vozíky samotné se rozhodnout, jaké využijí (toho využívá navrhované řešení); nebo vytvořit větší parkoviště pro všechny vozíky. Stejně jako cíle, mají i parkoviště možnost nastavit orientaci zaparkovaného vozíku. Jsou proto umístěna ve vhodných místech poblíž periferních dopravníků tak, aby vozík vždy viděl do cesty. Nastavení toho, jak budou roboty parkoviště využívat (po kolika minutách nečinnosti, jak dlouho setrvat na parkovišti, než přejedou na napájecí port atd.) je následně provedeno jako součást konfigurace viz kapitola 7.3.
- Podobně jsou vytvořeny i body označující napájecí porty. Vozík je zde opět úmyslně orientován, tentokrát směrem k přípojce nabíječky. Body jsou umístěny do experimentálně zjištěné ideální vzdálenosti 1,25 m od portu. Vyobrazeny jsou jako žluté čtverce v detailech b či c obr. 84.
- Posledním z potřebných typů bodů jsou StandBy (pohotovostní), ty jsou v mapě využity ve dvou provedeních. První z nich (dvojice světle zelených čtverců v detailu a obrázku 84) slouží jako obecný StandBy cíl. AMR jej využije, čeká-li na uvolnění sektoru před ním, který omezuje ulici na pouze jeden vozík. Druhý typ je speciálně upraven jako Taxi StandBy, který je využíván pro zúžené koridory, v nichž by se vozíky mohly zaseknout samy o sebe [98]. Jeho pomocí lze vytvořit trasu mezi ním a jemu přiřazeným cílovým bodem (oba jsou viditelné na obr. 84.d), po které se vozíky pohybují jednotlivě za sebou. Vyžaduje však aby finální cíl byl umístěn v ManagedDestination zóně (detailní popis níže, vyobrazena jako červená oblast ve spodní části obrázku 84). V řešeném případě je takto kritická celá oblast okolo stanice 300. Před vjezdem do jednosměrných ulic je proto umístěn počáteční bod taxi linky, který v kombinaci s omezením konce na pouze jeden vozík (podrobně popsána v následujících odstavcích) zaručuje spolehlivost pohybu všech vozíků směrem k a od dopravníku.



Obr. 84 Výřez z kompletní mapy s detaily, vytvořeno v programu Mobile Planner [autor]

7.2.2 Zóny

Pro správnou funkci vozíku je mnohdy žádoucí nějak rozdělit nebo omezit samotný prostor haly, či mu v určitých místech změnit některé z vlastností. K tomu v Mobile Planneru slouží zóny. Většina z pokročilých zón je v základu zamknuta, je proto nutné je před zahájením tvorby povolit v konfiguraci vozíku (viz další kapitola).

- Zakázaná zóna je nejčastější přidávaný prvek v celé mapě (celkem 76, jedná se o oranžové oblasti na obr. 84). Slouží k jednoduchému označení oblasti, kde vozík nesmí operovat (pokud do ní omylem vjede, odmítá se pohybovat a je nutné ho z ní vyprostit manuálně, viz příloha 4). Tato oblast je umístěna přes všechny bloky strojů, uličky (ve kterých vozík neoperuje) a logistické sklady a shop-stocky. Zakrývá tak většinu plochy mapy. Na doporučení technika [77] jsou pomoci ní také ohrazeny všechny vnější okraje, tím je zamezeno tomu, aby vozík vygeneroval cestu, která vede mimo zmapované prostředí.
- Podél většiny uliček jsou také přidány tzv. zóny s omezeným přístupem. Ty slouží, v kombinaci s upřednostňovanými čarami (vysvětleno v následujících odstavcích), k usměrnění pohybu vozíku po šířce uličky, bez toho aniž by mu přímo zakazovaly vyhýbat se dynamickým překážkám, které se po cestě mohou objevit. Vizualně jsou reprezentovány žlutými oblastmi v obrázku 84.
- Ve všech křižovatkách a na místech, kde se vozík otáčí, jsou umístěny oblasti ovlivňující pohybové parametry AMR (obr. 84, zelené zóny). V rámci standardizování pohybu po celé hale mají všechny zóny nastavené totožné vlastnosti, jmenovitě se jedná o omezení translační rychlosti vozíku na 350 mm/s a rotační rychlosti na 50 °/s. Mimo ně se robot pohybuje maximální rychlostí stanovenou jako součást konfigurace (viz níže). Tyto omezení mají za cíl zpomalit vozík v nepřehledných či nebezpečných oblastech a předejít tak kolizi s chodci nebo okolním provozem na hale.
- Podél úzkých uliček poblíž stanice 300 (Kvalita 3D) je provoz omezen pomocí jednosměrek. Při využití jednoho vozíku není šířka uličky velký problém (splňuje-li normativní požadavky). U dvou a více vozíků se však mohou vyskytnout situace, kde se AMR jedoucí opačným směrem potkají a kompletně tak zablokují provoz. Jednosměrky tak zabrání otáčení a zajistí stabilní a spolehlivý pohyb, vyobrazeny jsou jako fialové zóny ve spodní části obrázku 84.
- Ve dvou oblastech se na hale vyskytují možné problémy s odrazem od podlahy. Jedná se o vrata vedoucí ven z haly a nízkou rampu (zóna s fialovým kruhem v pravém dolním rohu obr. 84.b), do těchto míst je proto přidána zóna potlačující inputy ze spodního laseru vozíku. Tu je však nutno používat s rozvahou. Jedná se totiž o poměrně důležitý senzor, který často zabrání kolizi mezi AMR a nenaloženým vysokozdvizným vozíkem. LiDAR snímá okolí ve vzdálenosti 20 cm od země, vidle proto ne vždy vidí a operátoři vysokozdvizných vozíků jsou tak školeni v nebezpečných situacích zastavit a položit vidle na podlahu, kde je zaznamenaná právě spodní laser.
- Před stanicí 300 se také vyskytuje jeden TaskSector, na který je možné navázat příkazy, které se provedou při vstupu nebo výstupu vozíku z něj. Zde je využitý

pro sepnutí jednoho z DQ robotu. Na něj následně reaguje PLC otevřením padacích dveří, které by jinak bránily vyložení bedny do tepelně kontrolovaného prostoru s měřicími stroji. Reprezentován je jako zašedlá na oblast obr. 84.e.

- ManagedDestination umožňuje definovat průjezdné StandBy body pro všechny cíle umístěné do této zóny, slouží tak pro stanovení obsazenosti sektoru vozíky (viz Taxi StandBy výše).
- SingleAMR oblasti dovolují vymezit zóny na mapě, do kterých může vstoupit vždy pouze jeden vozík. To je užitečné zejména v úzkých chodbách nebo jinak omezených prostorech s jediným vstupem či výstupem, jako například průjezd poblíž dopravníku 400 (viz červená zóna na obr. 84.a).

7.2.3 Čáry

Některé z vlastností mapy je jednoduší zapsat pouze jako hranici, je v ní proto využito i několika typů čar:

- Na všech komunikacích ve výrobní hale byly umístěny preferenční čáry (zeleně čerchované, obrázek 84 a jeho detaily), které mají za účel ovlivnit trajektorii autonomního vozíku po šířce ulice. Tyto čáry pomáhají minimalizovat negativní dopady dynamického plánování trasy, jelikož AMR při každém průjezdu generuje novou cestu a bez optimalizačních vstupů by se pohyboval středem komunikace (nejdále od možných překážek). To by vedlo k blokování ostatního provozu. Správné umístění těchto čar bylo poměrně složité. Je nutné zajistit dostatečný odstup od okolních překážek, aby robot nesjížděl z linie, ale zároveň bylo žádoucí, aby se pohyboval co nejbližší k okrajům komunikace a umožnil bezpečný průjezd vysokozdvížným vozíkům a dalším manipulačním prostředkům. Z tohoto důvodu bylo umístění čar optimalizováno experimentálně pro každou ulici zvlášť. K motivaci vozíku slouží také omezovací zóny zmíněné v předchozích odstavcích. Také jejich umístění bylo řešeno experimentálně. Celý systém preferencí je založen na motivačním mechanismu, kdy jízda po preferované čáře snižuje vnitřní logické náklady na průjezd jednotlivými buňkami mřížky na $1/2$, zatímco vjezd do omezené zóny tuto hodnotu zdvojnásobuje. Přesný algoritmus plánování trasy není v dokumentaci systému detailně popsán, avšak na základě dostupných informací a praktických pozorování se pravděpodobně jedná o variantu A* algoritmu. Důležitým aspektem návrhu systému preferencí je jeho konvexnost. V praxi se penalizace za pohyb v omezeném sektoru jeví pouze jako jednorázová. Což způsobuje, že se AMR po odchýlení od preferované trasy a vjetí do omezené zóny (například při objíždění překážky) na tuto trajektorii nevrátí. Konvexní tvar zajišťuje, že se trajektorie v budoucnu s preferovanou linií opět protne, a to motivuje vozík k okamžitému návratu na optimální trasu.
- Obdobně jako zakázané zóny pracují i zakázané čáry, v praxi je ale jednodušší prostor oddělovat pomocí zón. V řešeném podkladu jsou proto využívány duplicitně, spíše jen pro vizuální označení dveří a vrat vedoucích z aktivního prostoru vozíku. Jsou však také použity poblíž napájecího portu 400, kde zajišťují, že AMR nebude přejíždět přes ulici v nebezpečné blízkosti vrat (pravá strana obr. 84.b). Zde by nemusel být včas zpozorován řidiči vysokozdvížných vozíků.

- Posledním z prvků vložených do mapy jsou čáry, které vozík donutí přejít do ztraceného stavu, čímž mu zcela zamezí v pohybu a upozorní operátora. Jsou opět využity spíše duplicitně. A to sice v prostoru kde se AMR může pohybovat relativně blízko schodiště směřujícího do podchodu a hrozí tak jeho pád. Tato kritická oblast je ve spodní části obrázku 84.

7.3 Doplnění mapy o makra a úprava konfigurace vozíku

7.3.1 Makra

Pro zajištění správné funkce AMR je mapový soubor doplněn o makra, která v navrhovaném řešení slouží primárně jako trvale platné podmínky a specifikace pohybu. Nemají žádnou vazbu na logiku přepravy ani na řízení celého systému, které je realizováno prostřednictvím PLC. Přestože lze pomocí příkazů ovládat celkové chování vozíku, tuto metodu autor nedoporučuje. To ani v případě systému s pouze jediným AMR. Software MobilePlanner totiž neumožňuje cyklické provádění maker, což znamená, že logická cesta tvořená jejich sekvencí musí mít vždy jednoznačně definovaný začátek a konec. Řízení vozíku výhradně tímto způsobem je tedy neefektivní a zbytečně složité.

V závislosti na funkci jednotlivých bloků v takto vytvořeném programu je možné je rozdělit do několika kategorií: ovládání výstražného osvětlení; příkazy pro najíždění k dopravníkům; příkazy pro odjíždění od dopravníků; kontrola naložení bedny a spouštění dopravníku. Jejich podrobnější popis:

- Příkazy BlueSpot (OFF/Backward/Forward) slouží k ovládání LED projektorů, které promítají viditelnou modrou zónu na podlahu před a za vozík, a tím zajišťují výstražnou signalizaci pro chodce a řidiče vysokozdvizných vozíků. Nástavba AMR je vybavena třemi projektory: dvěma vpředu (s projekční vzdáleností jednoho a dvou metrů) a jedním vzadu (s projekční vzdáleností jednoho metru). Tato konfigurace byla v praxi ověřena jako efektivní. Dodatečný projektor s dvoumetrovým dosahem poskytuje včasné varování při pohybu vozíku v blízkosti vysokých překážek a nepřehledných rohů. Spínání projektorů je řízeno prostřednictvím třech digitálních výstupů AMR (o6, o7, o8), příslušná makra jsou aktivována před každou operací, která iniciuje jeho pohyb. Z tohoto důvodu se také na konci příkazů vyskytuje 2s prostoje, ten je nutný pro splnění normativních požadavků – před zahájením pohybu po pauze delší než 10 s musí 2 s svítit výstražné osvětlení [148].
- Makra Conveyor (OFF/IN/OUT) slouží ke spínání dopravníkového pásu, výstup o3 řídí jeho sepnutí a výstup o4 jeho reverzaci. Samotný příkaz neobsahuje žádnou logiku, pouze přiřazuje digitální výstupy. Funkční význam získává až při začlenění do logické cesty v rámci jiných příkazů nebo definovaných cílů.
- Příkazy pro najíždění k dopravníkům (Engage Conveyor 200/300/400) obsahují detailně definovaný postup pro přesné přistavení AMR k dopravníkovému pásu na jednotlivých stanicích. Vzhledem k drobným rozdílům mezi stanicemi je nutné je rozlišovat a pro každou z nich použít samostatně upravitelné makro. Každý proces začíná funkcí PrecisionDrive, která využívá předem definovaný tvar trojúhelníku umístěného na dopravníku pro kalibraci polohy s přesností ± 8 mm [149] a následné najíždění. Na základě zkušeností autora se AMR

při prvním natočení zároveň podle trojúhelníku, následně provede požadovaný pohyb a na konci se znovu natočí pro korekci úhlu. Toto druhé natočení však způsobuje problémy, jelikož v této fázi je vozík již v těsné blízkosti dopravníku. To často vede ke kolizi mezi rohem jeho vlastního dopravníku a stacionárním dopravníkem. Aby se předešlo tomuto nežádoucímu kontaktu, je za funkci PrecisionDrive zařazen dodatečný příkaz Move, který umožní vozíku popojet o předem stanovenou vzdálenost bez závislosti na datech z LiDARu (zde se mohou vyskytnout problémy s prokluzem koleček). Tímto způsobem může PrecisionDrive ukončit svůj pohyb v bezpečné vzdálenosti od dopravníku. Následně se vozík přesně natočí podle trojúhelníku, a nakonec popojede přímo na finální pozici. Poté následuje jednoduchá sekvence příkazů pro manipulaci s bednou (makra Conveyor) a závěrečná kontrola správného provedení procesu (makra Exit Check).

- Po najetí k dopravníku se vozík nachází ve stavu Engaged. Proto je před odjezdem nutné definovat jeho chování tak, aby bezpečně opustil nakládací prostor. K tomu slouží makra Disengage (Conveyor 200/300/400). Tato makra začínají aktivací zadních BlueSpot projektorů jako výstražného signálu. Následuje zpomalený pohyb vzad, jehož parametrizace je specifická pro každý dopravník (v některých případech může vozík couvat přímo do uličky, to vyžaduje kratší trasu). Po dokončení pohybu se aktivují přední BlueSpot projektory. Vozík je tak připraven k dalšímu přesunu již v režimu autonomní navigace.
- Makra Exit Check (Conveyor 200/300/400) slouží k ověření správného naložení či vyložení bedny. Kontrola je realizována prostřednictvím digitálního vstupu (i3), na který je připojen koncový senzor dopravníku vozíku. Pokud není bedna správně naložena, zůstane zaseknuta v pozici, kde tento senzor detekuje její přítomnost. Jestliže se snímač neuvolní do pěti sekund po zastavení dopravníku, vozík přejde do chybového stavu Exit Check Fault. V tomto režimu dojde k zablokování celého systému a k přivolání operátora, který musí manuálně odstranit zaseknutou bednu a potvrdit bezpečný stav vozíku.

Příkazy lze vrstvit jeden do druhého, ale také je přiřazovat k cílům nebo specifickým zónám na mapě. To lze provést ve dvou stavech: před zahájením navigace na cíl/zónu a po jeho dosažení. Pro všechny cíle, parkoviště a dokovací body je předřazen příkaz BlueSpot Forward, který zajišťuje dostatečnou vizuální signalizaci pohybu vozíku v hale. Pouze na parkovištích je po příjezdu nastaveno makro BlueSpot OFF. Dále je pak na cílech Conveyor (200/300/400) po příjezdu aktivována sekvence Engage, která vždy obsahuje příslušné dokovací a odjezdové makro. Specificky je v těchto procesech nastavena chyba při najíždění a odjíždění jako „Consider Engaged“, což znamená, že pokud během těchto operací dojde k chybě bránící pohybu vozíku, AMR zůstane stát na místě a vyvolá asistenci operátora (bezpečnostní funkce).

7.3.2 Konfigurace

Dále je nutné upravit některé hodnoty v konfiguraci vozíku, které definují jeho obecné vlastnosti a parametry nezávislé na mapě. Většina těchto hodnot je specifická pro konkrétní

nasazení ve firmě a některé z nich byly převzaty z aktuálního provedení. V rámci ochrany know-how nebudou tyto specifické hodnoty parametrů sdíleny.

Před samotnou tvorbou mapy byly povoleny všechny speciální zóny. To umožňuje jejich následnou integraci do navigace. Jazyk mluvené řeči byl přepnut na češtinu a zároveň byly experimentálně upraveny hodnoty pro syntézu hlasu tak, aby byl hlasový výstup vozíku co nejlépe srozumitelný i v hlučném provozu.

Parametr `AutoDockStateOfCharge` byl navýšen na 30 %, což znamená, že vozík zahájí automatické dokování při vyšším stavu nabití. Tato úprava byla provedena s ohledem na životnost baterie a provoz dvou či více AMR současně. Díky možnosti střídání se totiž prodlužuje doba, po kterou může každý z vozíků pracovat bez nutnosti nabíjení. Doba nečinnosti před automatickým dokováním, parametr `AutoDockIdleTime`, byla prodloužena na 60 minut, což se ukázalo jako optimální hodnota během testování v reálném provozu.

Výpis stavu vozíku pomocí `DebugMode` během optimalizace a oprav byl změněn z `Normal` na `Extensive`, což umožňuje podrobnější diagnostiku při jakémkoliv problému a usnadňuje rychlé nalezení příčiny poruchy. AMR byla také přiřazena nově vytvořená mapa. Dále byla hodnota `MaxSecondsToKeepCumulative` snížena z 30 sekund na 3 sekundy. Tento parametr ovlivňuje dobu, po kterou vozík uchovává předchozí hodnoty získané z LiDARu, sonaru a spodního laseru. Experimentálně bylo zjištěno, že delší ukládání těchto dat způsobovalo problémy při častém průjezdu vysokozdvížných vozíků kolem vozíku (hodnoty zaznamenané spodním laserem zůstávaly aktivní moc dlouho, což vedlo k tomu, že AMR odmítá projet již uvolněnou cestou).

Rozměry vozíku byly upraveny podle tvaru jeho nástavby ve vztahu k okolnímu prostředí. Tato konfigurace byla stanovena experimentálně s ohledem na všechny přechínavající části nejen samotné nástavby, ale také okolních strojů a překážek nacházejících se ve výšce nad 20 cm, tedy mimo dosah hlavního LiDARu. Zároveň byly stanoveny časové limity pro blokaci cesty, pomocí kterých je definováno, jak dlouho se vozík pokouší dostat k cíli, než vzdá navigaci kvůli dočasné nepřístupnosti místa v závislosti na okolním provozu.

Maximální rychlost při volném pohybu byla omezena na 1 m/s a současně byla snížena i rychlost otáčení. Bezpečnostní zóna, kterou se vozík snaží udržovat mezi sebou a stacionárními překážkami, byla zmenšena na 1 m. Tím je umožněn efektivnější pohyb v omezeném prostoru, zejména při využití preferenčních tras v těsné blízkosti překážek. Rychlost, kterou systém považuje za rychlý pohyb, byla nastavena na 0,7 m/s a na základě této hodnoty byly upraveny odpovídající odstupy (minimální vzdálenosti, které vozík musí zachovat od okolních statických i dynamických objektů při vyšších rychlostech).

Režim chování vozíku při prokluzu koleček byl nastaven na `Medium Slip`, opět stanoveno na základě experimentů, které zohledňovaly faktory jako jsou vlastnosti podlahy (její čistota, sklon atd.), a hmotnost převáženého nákladu. Byly také definovány priority procesů `DropOff` a `PickUp`, tím je zajištěno správné pořadí operací při nakládání a vykládání materiálu. Byla aktivována funkce `ConnectToFleetManager`, její podrobnější využití je rozvedeno v následující kapitole.

Na závěr byl identifikátor vozíku nastaven jako Unit 1 (LD-90). Toto označení umožňuje snadnou rozšiřitelnost mezi AMR (v případě nasazení dalších robotů by byly označeny jako Unit 2, Unit 3 atd.). Kompletní mapový soubor je součástí přílohy 10.

7.4 Fleet Manager

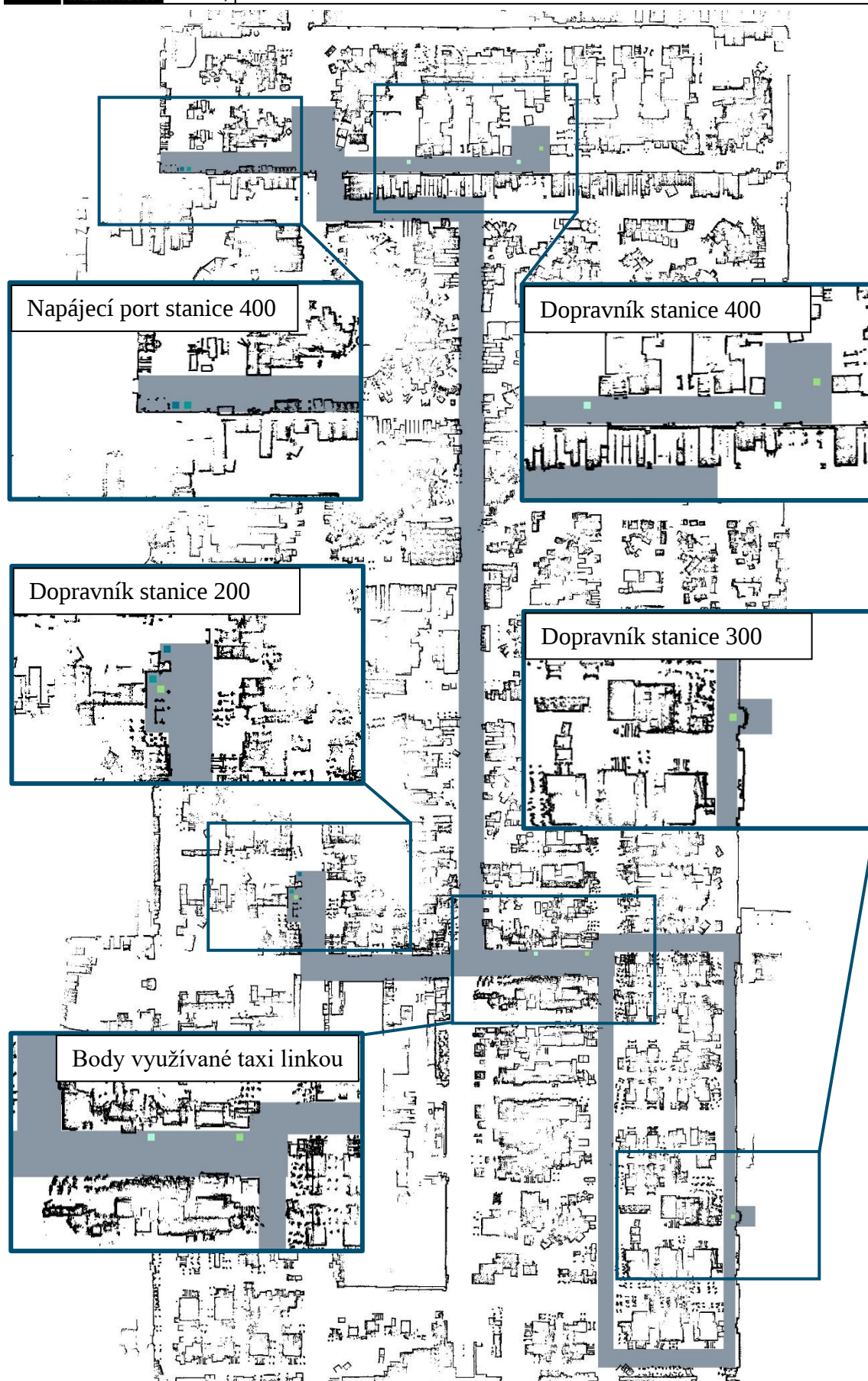
Takto připravené mapové podklady už jsou, po sepsání řídicího programu v PLC, schopny ovládat pohyb a logiku provozu jednoho AMR. Pokud chce ale síť využívat více než jeden vozík, je nutné mezi komunikace PLC a AMR vložit ještě člen pro řízení flotily (pomocí aktivace funkce ConnectToFleetManager v konfiguraci). V návrhu řešení této práce se jedná o Fleet Manager, který rozšiřuje funkčnost systému Fleet Operations Workspace (dále také FLOW) integrovaného v každém vozíku. Jeho činnost je krátce představena v příloze 11.

Konkrétně je zde využíván EM2100, a to ve starší čistě hardwarové verzi, kterou je možno umístit do serverového racku (dnes se již postupně přechází na cloudovou verzi se vzdáleným přístupem). Jako správce flotily je schopný koordinovat pohyby až 100 vozíků, jednotně spravovat mapy, sdílet konfigurace a řídit frontu aktivních úloh [150]. Využití pouze jednoho EM2100 s sebou ale přináší některá úskalí. Při výpadku připojení (např. v důsledku odpojení elektrické energie) přestane celý systém pracovat. Z důvodu prostředků poskytnutých firmou THK a nedostupnosti dalších Fleet Manager serverů (dostupná je pouze online verze, kterou nejde s hardwarovou kombinovat), se tomuto nebezpečí však není možné nikterak vyvarovat.

Fleet Manager je podobně jako Mobile Planner při prvním spuštění nutné nakonfigurovat. Celý tento proces je podrobně popsán v manuálu [98], proto zde nebude nadbytečně uváděn. Je však důležité podotknout, že připojením AMR na Fleet Manager je možné jeho konfiguraci a mapu nasdílet pro všechny ostatní vozíky připojené na stejného správce. Lze tak jednoduše upravovat všechna jejich nastavení dohromady a jednoduše tak udržovat systém standardizovaný.

Připojením všech AMR do systému Fleet Manager je kompletně zajištěna logika provozu dvou a více vozíků bez jakéhokoliv dodatečného programování. Fleet sám rozhoduje, kterému z vozíků danou práci přiřadí v závislosti na několika faktorech. V potaz je brána obsazenost, stav baterie, pozice, a dokonce je možné nastavit i vhodnost daných vozíků pro určité typy úkolů. Lze například učit převozní úkoly pro náklad s větší zátěží či nestandardními rozměry, pro který je nutné použít jiný z modelů (pokud jsou dostupné např. LD-250).

Hlavním provozním omezením tedy zůstávají okolní dopravní prostředky, které nejsou součástí systému, jako jsou vysokozdvizné vozíky, logistické vláčky nebo jiná ručně řízená vozidla. Kvůli principu fungování AMR není tento problém snadno řešitelný. Na rozdíl od AGV, jejichž navigační systém bývá jednodušší a lze jej snadněji přizpůsobit konkrétním podmínkám provozu [77]. AMR spoléhá na dynamickou navigaci v reálném čase, což komplikuje jeho schopnost efektivně reagovat na nepředvídatelný pohyb těchto vozidel. Jediným efektivním řešením je proto jasně stanovit pravidla pohybu v provozu, kde má AMR na křižovatkách vždy přednost před ručně řízenými vozidly. Tento princip zajišťuje plynulost a předvídatelnost provozu, čímž se minimalizuje riziko kolizí a prostoje. Není však možné se jim zcela vyhnout a lze tak tvrdit, že zavedením AMR do kombinovaného provozu se ostatní logistika zpomalí. Pro zachování stability zásobování výrobních strojů se tak zároveň v kombinaci s přednostmi využívají jednosměrné ulice. Zde si operátoři mohou být jisti, že pokud do nich vjedou správným směrem, AMR jejich průjezd nebude nijak omezovat a v případě potřeby jednoduše vyčká na uvolnění cesty.



Obr. 85 Výřez z kompletní mapy s naznačením trasy a detaily, vytvořeno v programu Mobile Planner [autor]

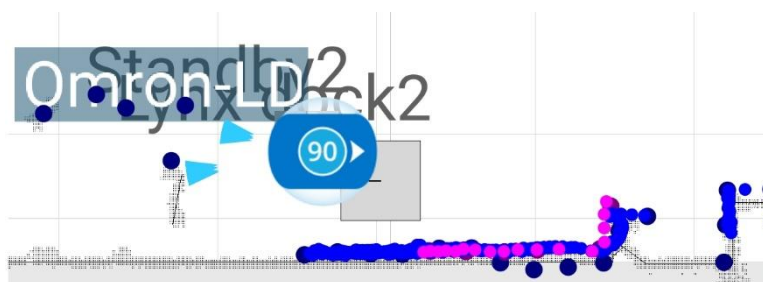
7.5 Ověření funkčnosti programu a optimalizace

Postupem popsaným v předchozích kapitolách byla vytvořena kompletní mapa s logikou převozu a nastavením vozíků. Bude-li řídicí systém doplněn i o PLC, bude spolehlivě schopen ovládat celou logistickou síť. Tato kapitola tak obsahuje schematický přehled (obrázek 85), který slouží k lepší orientaci v jinak poměrně složité problematice. Schéma znázorňuje hlavní trasy vozíku v rámci uliček, všechna klíčová stanoviště a jejich detaily. Mezi vyznačená stanoviště patří hlavní dopravník s řídicí elektronikou na stanici Kvalita 3D (označení 300), periferní dopravník určený pro přepravu aktuálně zavážených kusů na stanovišti 200 a nově navrhované rozšíření s dopravníkem pro přepravu nových kusů na stanovišti 400. Každé z těchto stanovišť je v detailu doplněno o cílové body (olivová), parkovací pozice (světle modrá), dokovací stanice (tmavě modrá) a pomocné průjezdné body pro optimalizaci navigace v prostoru (světle zelená).

7.5.1 Celkový přehled programu

Kontrola práce vozíku je v praxi operátory nejčastěji prováděna prostřednictvím softwaru Mobile Planner. V rámci této práce byla proto vytvořena uživatelská příručka operátora, která je připojena jako příloha 4. Příručka obsahuje všechny zásadní informace nezbytné pro každodenní provoz systému (je důležité podotknout, že se nejedná o kompletní manuál ke stroji, uvedeny jsou pouze informace potřebné ze strany operátora ke každodennímu provozu systému). Mezi její klíčové kapitoly patří zejména přehled nestandardních situací (tedy chyb), které byly identifikovány během testování vozíku. Tato část příručky, i když z praktického hlediska poměrně zajímavá, je v rámci úspory stran ponechána pouze v příloze. V textu zde je uveden především obecný přehled pohybu vozíku s popisem.

Na mapě v obr. 86 je vyobrazeno několik klíčových prvků, které operátorům poskytují přehled o aktuálním stavu vozíku a jeho okolí. Ikona a jméno robota, která se dynamicky mění podle jeho stavu: pokud je vše v pořádku, zobrazuje se modře; oranžová barva signalizuje ztrátu lokalizace; červená indikuje kritickou chybu nebo aktivovaný nouzový vypínač (E-stop). Černé tečky a čáry představují mapu nahranou do robota, tedy statické prvky prostředí, které jsou neměnné. Šedé čtverce a obdélníky označují specializované zóny, které jsou součástí této stálé mapy, například zpomalovací oblasti, preferované trasy, zakázané zóny nebo definované cílové body (ty jsou v porovnání s desktopovou verzí zašedlé jako indikace toho, že je nelze upravovat). Aktuální informace ze snímání okolí jsou rozlišeny podle zdroje dat: tmavě a světle modré tečky odpovídají detekcím z hlavního LiDARu, zatímco tmavě a světle fialové tečky pocházejí ze spodního laseru, tmavší z barev vždy signalizuje historické záznamy z několika předešlých sekund. Dále jsou na mapě zobrazeny světle modré trojúhelníky umístěné za vozíkem, které znázorňují data získaná ze zadních sonarových senzorů (ta se objeví pouze tehdy, začne-li AMR couvat).



Obr. 86 Provoz AMR v aplikaci Mobile Planner [autor]

7.5.2 Princip funkce logistické sítě

Princip funkce logistické sítě využívající mobilního robota začíná u operátora obráběcího stroje, který umístí díly určené k proměření do KLT bedny. Tuto bednu položí na horní dopravníkový pás stacionárního dopravníku a stiskne tlačítko Start. V reakci na tento pokyn se pás začne otáčet, dokud se bedna neposune k separátoru v přední pozici a neaktivuje senzor umístěný na dopravníku. Tento stav vyvolá v PLC požadavek na odběr z daného dopravníku. PLC tuto informaci odešle do serveru Fleet Manager, který vybere nejvhodnější dostupný mobilní robot a přidělí mu úkol PickUp na příslušném dopravníku.

Vozík aktivuje své přední BlueSpot projektory, opustí napájecí port (pokud předtím nebyl delší dobu aktivní) a zahájí automatickou navigaci k cílové souřadnici. Po dosažení určené pozice začne vykonávat sekvenci najížděcích příkazů, čímž přechází do stavu Engaged. Nejprve provede PrecisionDrive s pomocí najížděcího trojúhelníku, následovaný pohybem Move, během něhož separátor uvolní bednu v první pozici a zabráni pohybu další bedny na pozici dvě. Oba dopravníky se aktivují a bedna je přesunuta na vozík. Pokud je naložení úspěšné (ověřeno pomocí Exit Check), vozík provede Disengage proceduru a v reakci na přerušení senzoru na svém dopravníku automaticky přejde do režimu převozu bedny.

Následně zahájí autonomní navigaci na stanici 300, přičemž respektuje pravidla a prvky definované v mapě. Po přiblížení k cíli vstoupí do vymezené zóny, čímž aktivuje svůj DQ výstup, na základě kterého PLC otevře padací dveře dopravníku. Vykládka probíhá stejným způsobem jako u periferního dopravníku. Během tohoto procesu PLC z Fleet Manageru zaznamená informaci o původu bedny a přiřadí ji k RFID kódu naskenovanému čtečkou na dopravníkovém pásu. Tato informace je následně využita při zpětném převozu proměřených dílů k určení původní destinace, ze které bedna pocházela. Mechanické záměně beden je zabráněno pomocí tištěných proložek, které jsou pro každý typ dílu unikátní.

Po naložení zpět na hlavní dopravník bedna (tentokrát s již proměřenými kusy) aktivuje senzor v dolní pozici, čímž PLC znovu vyšle požadavek na Fleet Manager, který přidělí úkol AMR. Následuje opakování sekvence naložení a převozu bedny zpět na původní pracoviště, kde je umístěna na spodní část dopravníku. Pokud v tuto chvíli vozík nemá žádný další úkol, přesune se na nejbližší vhodné stanoviště, kde zůstane v režimu aktivního čekání po dobu jedné hodiny. Pokud během této doby neobdrží nový úkol, automaticky se vrátí na napájecí port.

V praxi se tak jedná o podobně pracující systém, jako je ve firmě aplikován doposud (kapitola Logika převozu). Je však doplněný o rozšíření na více vozíků, další dopravníkovou stanici, Fleet Manager a prvky řídicí a stabilizující provoz.

7.5.3 Optimalizace funkčnosti programu

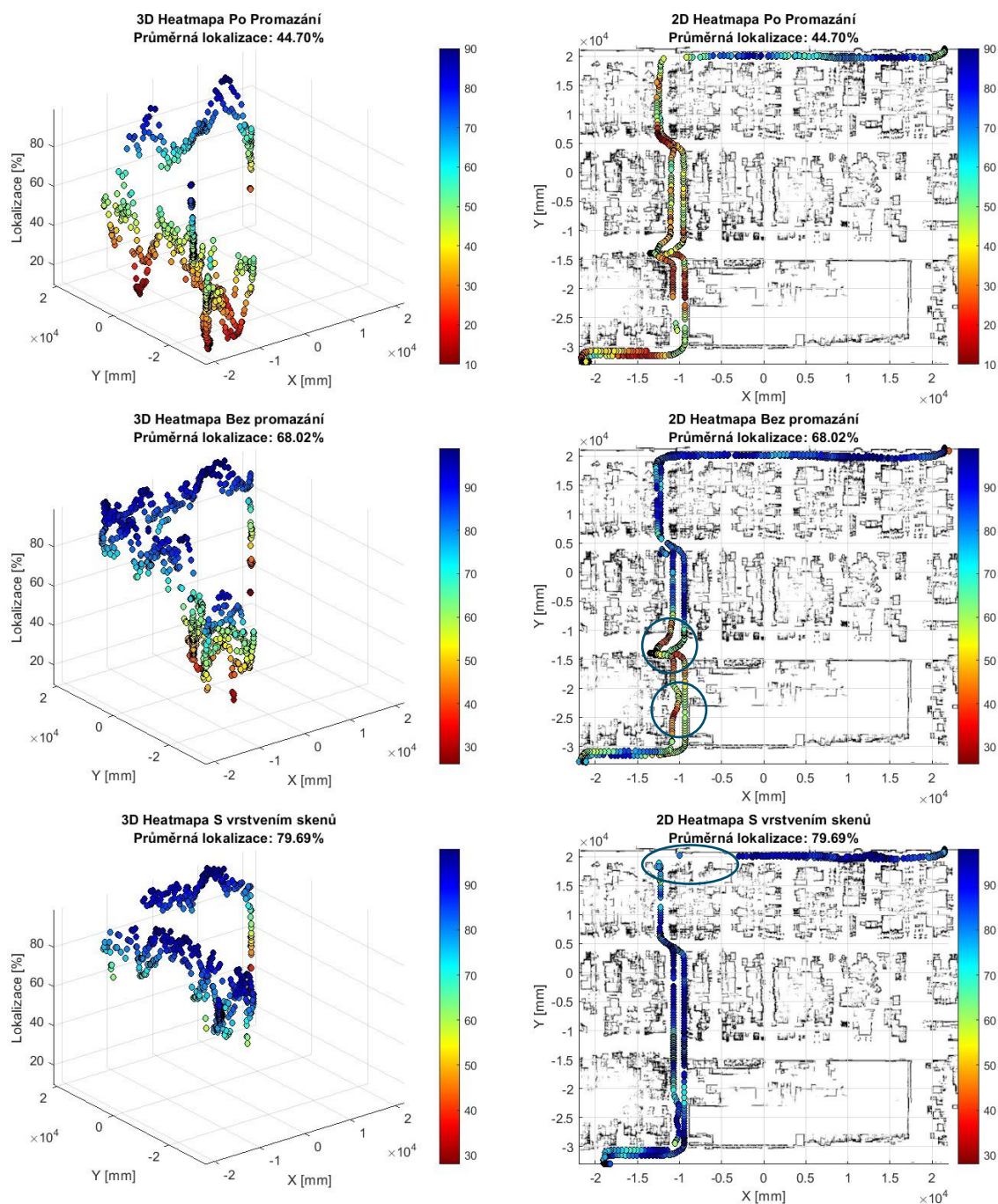
Díky možnosti celý návrh složit a zprovoznit na vývojové dílně v THK se jako součást diplomové práce naskytla i jedinečná příležitost vytvořené mapové podklady s logikou otestovat v prostředí, pro které byly navrženy. Následující kapitoly jsou tak výsledkem měření a optimalizačních procedur, které probíhaly přímo na výrobní hale podniku.

Měření lokalizace a signálu Wi-Fi nejdříve zahrnovalo extrakci dat. Ta byla provedena záznamem obrazovky, na které je spuštěn program Mobile Planner s vozíkem, který projíždí vždy stejný úsek cesty tam a zpátky (vznikaly zde však drobné odchylky kvůli vyhýbání se vysokozdvizným vozíkům). Z dat, která se vypisují při otevření diagnostiky vozíku, byla následně pomocí Python scriptů (které jsou také součástí přílohy 9) získána tabulka záznamů pozic x a y a k nim náležící hodnoty lokalizace nebo síly signálu Wi-Fi. Pomocí dalšího Python scriptu byla data upravena. Extrakce z videa probíhala strojovým viděním, které

bylo autorem sice optimalizováno pro čtení čísel, vyskytly se však problémy se zápornými hodnotami a občasným vynecháním desetinné tečky. Takto upravená data byla následně využita jako vstup do Matlab Skriptu, ve kterém probíhaly vyhodnocovací procesy. Veškeré naměřené hodnoty a využití skriptů jsou uvedeny v příloze 9.

7.5.4 Měření lokalizace při pohybu halou

Kvůli minimalizaci omezení provozu bylo měření lokalizace prováděno pouze na sekci mapy mezi dopravníky 200 a 300, stejné principy lze však aplikovat na celou trasu vozíku. 2D verze tepelných map jsou pro přehlednost proložené mapou této měřené oblasti.



Obr. 87 Lokalizační skóre při průjezdu halou, vytvořeno v programu Matlab [autor]

Na obrázku 87 jsou grafy s třemi různými průjezdy halou: první byl proveden s mapou, ze které byly zcela odstraněny záznamy nestabilních objektů (např. beden); druhý se záznamem mapy vytvořené pouze jedním průjezdem, nestabilní objekty byly však zachovány; poslední je tvořen na mapě složené ze tří skenů provedených několik dnů po sobě. Měření výsledného lokalizačního skóre probíhalo v jeden den, během kterého nebyly pořizovány žádné záznamy, vzhledem k možnému rozdílnému rozložení výroby na hale v průběhu týdne, a to zhruba týdně po tvorbě mapových podkladů (např.: skenování v pondělí, středu a čtvrtků; měření v pátek).

Jak lze pozorovat na měření „Po promazání“, promazávat z mapy nestabilní objekty je objektivně ta nejhorší možnost. V několika kritických místech lokalizačního skóre spadlo pod hranici 30 %, při které vozík přechází do módu hledání a výrazně se zpomaluje jeho pohyb [77]. Jediná zóna, ve které AMR navigoval spolehlivě, je dlouhá ulice vedoucí ke stanici 300, která celá vede podél holé stěny s vystupujícími sloupy (tedy zcela ideální případ pro lokalizaci).

Z grafů „Bez promazání“, na kterém je mapa bez smazání nestabilních objektů, už jsou lépe pozorovatelná dvě nejkomplikovanější (zvýrazněná) místa po cestě. Jedná se o dlouhou ulici lemovanou z jedné strany bednami a hlavní křižovatku ze všech stran obestavenou bednami a shop-stock regály. Místa jsou kromě očividného problému s proměnlivou podstatou okolí kritická také kvůli plynulosti průjezdu vozíkem. Jede-li vozík rovně, porovnává svou polohu pomocí nejen LiDAR skeneru ale i dat z enkodérů na kolech. Během zatáčení (které v těchto místech nastává, protože se AMR v křižovatce vyhýbá okolnímu provozu a na rovné části cesty bednám přesahujícím přes svůj vyhrazený prostor do kraje komunikace) ale vozík, alespoň podle pozorování, klade menší váhu na data z enkodérů a orientuje se spíše podle LiDARu. Ten v tento moment zaznamenává právě špatně umístěné překážky a dochází tak k rozhození celého navigačního systému.

Na finálním měření „S vrstvením skenů“ je průjezd podle mapového podkladu tvořeného ze tří různých záznamů. Všechny nestabilní objekty jsou tak zaznamenány přes sebe v různých pozicích. Přestože se vozík při průjezdu křižovatkou nevyhýbal a ovlivnil tak srovnatelnost měření, na průjezdu kritickou ulicí je pozorovatelné markantní zlepšení (lokálně o cca 30 %). Průměrná lokalizace během tohoto přístupu vzrostla o více než 10 %, jedná se tak o jednoznačně nejvhodnější metodu tvorby mapových podkladů.

Na některých z grafů je v levém horním rohu pozorovatelný menší počet měření, to naznačuje dočasný výpadek komunikace s AMR; tato hypotéza byla potvrzena při proměření stability Wi-Fi signálu v následující kapitole.

7.5.5 Měření signálu Wi-Fi při pohybu halou

Na rozdíl od lokalizace zahrnovalo měření síly Wi-Fi signálu pouze jeden průjezd tam a zpátky (a tím i menší omezení provozu). Bylo proto provedeno pro celou trasu, kterou by navrhované rozšíření AMR sítě využívalo.

Z obrázku 88 je patrné, že se na trase vozíku vyskytují tři oblasti s nestabilním připojením. Dvě z těchto oblastí, nacházející se na rovných úsecích trasy vedoucí k oběma stacionárním dopravníkům z hlavní křižovatky, jsou způsobeny blokováním signálu budovami uvnitř haly. Tyto zóny, přestože nejsou ideální, během provozu nevytvářejí závažné komplikace. Vzhledem k tomu, že nedochází k úplnému výpadku signálu a zóny se nenacházejí v blízkosti přenosově náročných míst (například v okolí dopravníků, kde jsou zadávány úkoly), není oprava těchto oblastí považována za nezbytnou. Částečné snížení síly signálu komunikace

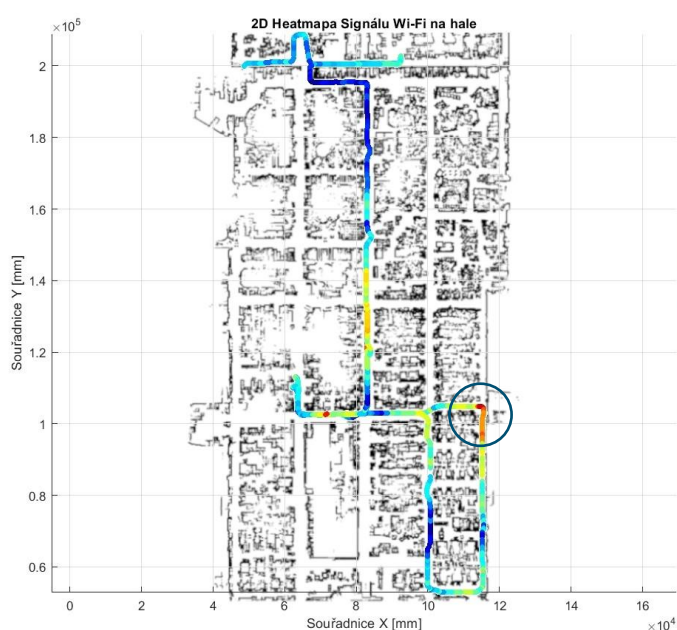
s AMR v těchto oblastech nemá vliv na jeho funkci, neboť mapa je vždy uložena ve vnitřní paměti vozíku (i při připojení na Fleet Manager), a proto AMR pokračuje v cestě plynule.

Poslední (zvýrazněná) oblast ale představuje provozně kritickou zónu. Nachází se u vrat vedoucích ven z haly při odbočování ke stanici 300. V této oblasti dochází běžně k úplnému výpadku komunikace s AMR, který je obnoven až po přibližně 30 sekundách. Tento výpadek vede ke ztrátě připojení k Mobile Planner Tablet Edition, která je používána operátorem k monitorování celého procesu. Ulička, kterou vozík projíždí směrem k hlavní stanici, je také poměrně úzká a bývá často zablokována bednami připravenými operátory na odvoz. To může způsobit, že vozík zůstane zablokovaný bez vědomí operátora. Dalším problémem je nestabilní doba obnovení komunikace. V některých případech k obnovení nedochází ani po přiblížení vozíku k dopravníku, PLC tak neobdrží signál o otevření dveří před dopravníkem, což způsobí, že dveře zůstanou zavřené a AMR nemůže najet.

Na základě těchto dat je doporučeno před nasazením navrhovaného řešení umístit dodatečný přístupový bod (AP) do blízkosti této oblasti, tím bude zajištěno stabilnější připojení a minimalizují se výpadky komunikace.

7.5.6 Úpravy okolního prostředí vozíku na hale

Vzhledem k problémům způsobeným nestabilními předměty jako jsou bedny v okolí komunikací aktivně využívaných roboty je vyvíjena značná snaha těmto problémům předejít. Kvůli rozložení strojů na hale není ideální odkládací místa přesouvat. Tato možnost se jeví jako vhodná až při využití výrazně většího počtu AMR, které by zajišťovaly většinu logistické přepravy po hale. Jediným dalším řešením tak je zabránit vozíku bednu vůbec vidět. Většina beden bývá ukládána do kovových zábran, podobným těm na obrázku 89. Nabízí se tedy umístit mezi nohy zábrany laserem neprůhlednou bariéru, například polyuretanovou desku. Tím by se zamezilo nejen tomu, aby se vozík podle bedny orientoval, ale přibude i nová pevná orientační plocha s přesně definovanými rohy. To vede k dalšímu zvýšení lokalizačního skóre.



Obr. 88 Síla Wi-Fi signálu při průjezdu halou [autor]



Obr. 89 Zábrany LiDARu [autor]

Tyto úpravy návrhu vycházející ze závěrečné práce byly ve firmě již implementovány na několika místech, například v okolí napájecího portu využívaného dosavadním řešením (právě ten je na obr. 89). Ačkoliv nevedly k měřitelnému zvýšení lokalizace v těchto oblastech, nedochází zde už k poklesu lokalizačního skóre při špatném umístění bedny. Celý systém je tak stabilnější a méně poruchový.

Zároveň je žádoucí, aby pracovníci přicházející do styku s AMR na denní bázi byli seznámeni s principem fungování jeho navigace. Naprostá většina operátorů vysokozdvížných vozíků a logistických vláček neví, jak se vozík v prostoru naviguje, a není tudíž schopna předvídat jeho chování, což může vést k nebezpečným situacím. Důležité je, varovat je především ohledně tendence vozíku vybočovat z přímé trasy, pokud má v cestě být i kraj bedny či jiné překážky. Je také nutné je poučit o způsobu, jak AMR ideálně objíždět, a zdůraznit problém s umístěním LiDARu ve výšce 20 cm od země (viz IgnoreLowLaser zóny). Většina těchto kritických informací je uvedena v příloze 4 - Příručka operátora, v sekci na konci dokumentu.

8 EKONOMICKO-TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ A VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

Jako součást projektu bylo také ve finální fázi vypracováno ekonomicko-technické zhodnocení. Do něho je zahrnuta cena všech komponent, která je ale v rámci jisté anonymizace uvedena pouze pro jednotlivé sestavy, a hodinový rozpočet práce strávené nad projektem. Celková suma a mezisoučty, ze kterých vychází, jsou uvedené v tabulce 7.

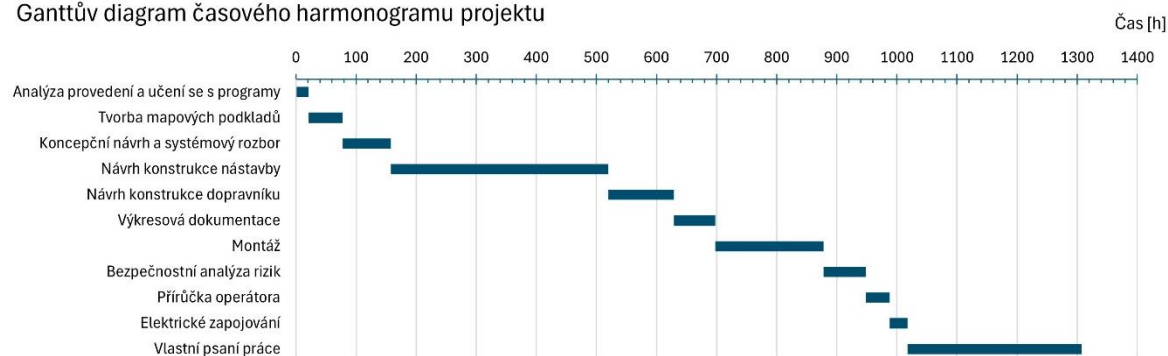
Vzhledem k tomu, že se jedná o čistě vývojový návrh, pro který není nutné počítat návratnost (která u obdobných projektů bývá zhruba dva roky, alespoň podle rozhovorů s obchodními zástupci v kapitole 4.1), není tak učiněno.

V kapitole je také na obr. 90 uveden Ganttův diagram s časovým harmonogramem všech činností v projektu. Celková časová investice (po začátek psaní této kapitoly) činí zhruba 1307 hodin, s podrobnějším přehledem v tabulce 8. Do nákladů ale nevstupuje celá tato suma, počítáno je pouze s prací na samotném projektu. Čas, během kterého byl projekt dokumentován v diplomové práci, zde tak není promítnut. Dále již není počítáno s ještě neprovedenými činnostmi, které by však před uvedením vozíku s nástavbou a periferních dopravníků do provozu bylo nutné vykonat. Chybí zde tak například náklad na programování PLC a čas pro samotné zprovoznění.

Tab. 7 *Evaluace projektu [autor]*

Sestava	ID	Cena [Kč]
Krytování motoru	021-105.00	5 675
Krytování nástavby	021-192.00	57 828
Sestava pro napínání řemenu	021-193.00	9 211
Sestava motoru a polohovadla	021-194.00	34 722
Sestava rozváděče	021-195.00	63 753
Vozík s deskou a ostatními periferiemi	021-196.00_2	1 129 300
Sestava dopravníku vozíku	021-197.00	98 267
Posuvová sestava	021-198.00	74 892
Kompletní vozík s nástavbou	021-100.00	1 473 649
Nosná sestava dopravníku	021-592.00	15 221
Sestava elektrických zařízení dopravníku	021-595.00	41 893
Dvě sestavy samotných dopravníků	021-597.00	103 413
Separátor dopravníku	021-598.00	9 504
Kompletní periferní dopravník	021-500.00	170 031
Dodatečné náklady		168 422
Práce		458 066
Celkem		2 270 169

Ganttův diagram časového harmonogramu projektu



Obr. 90 Ganttův diagram časového harmonogramu projektu [autor]

Tab. 8 Přehled časových investic projektu [autor]

Činnost	Čas [h]
Analýza a učení se s programy	21
Tvorba mapových podkladů	57
Koncepční návrhy a systémový rozbor	80
Návrh konstrukce nástavby	362
Návrh konstrukce dopravníku	109
Výkresová dokumentace	69
Montáž	181
Bezpečnostní analýza rizik	70
Příručka operátora	40
Část zapojování	30
Mezisoučet pro hodinovou sazbu	1018
Tvorba dokumentu	289
Celkem	1307

V rámci konstrukčního procesu byla kromě detailních 3D modelů vypracována také kompletní výkresová dokumentace všech konstrukčních prvků a sestav. Celkem bylo vytvořeno 74 technických výkresů, z nichž 15 tvoří výkresy sestav. Některé klíčové výkresy, zásadní pro porozumění konstrukčnímu řešení, jsou přiloženy v příloze 8, přičemž zbývající dokumentace je k dispozici na vyžádání u autora. Součástí přílohy je také schéma hierarchie výkresové dokumentace pro lepší přehlednost.

Některé z výkresů byly v rámci zpětné kompatibility s aktuálním provedením poskytnuty firmou THK a nejsou v zájmu zachování know-how jakkoliv zveřejňovány. Ze stejného důvodu také nikde není uvedený výkres layoutu dopravníku a vozíku v prostoru.

9 BEZPEČNOSTNÍ ANALÝZA RIZIK

Jako součást diplomové práce byla vypracována i bezpečnostní analýza rizik (dále také RA), ta je ve své celistvosti uvedena v příloze 2. Tato kapitola se věnuje pouze zběžnému přehledu jejího obsahu. Zároveň zde také v rámci přehlednosti a úspory místa nejsou znovu uváděny žádné z důležitých informací, které jsou již uvedeny v zmíněné příloze. Bezpečnostní analýza rizik a všechny její části uvedené v této kapitole byly zpracovány na téma rozebírané v této diplomové práci jako součást výuky v předmětu GMR ve formě semestrální práce [151].

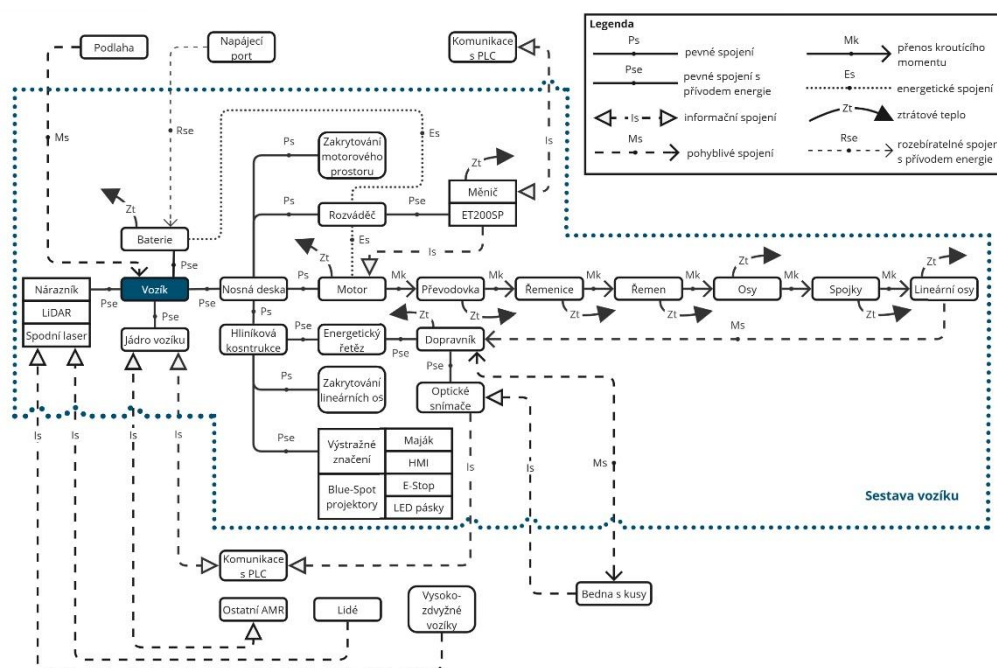
První z částí RA seznamuje čtenáře s analyzovaným systémem a jsou zde také uvedeny specifické parametry, ať už vozíku nebo dopravníku, které mohou bezpečnost ovlivnit. Následuje podrobný soupis právních požadavků a norem, vztahující se na analyzovaný systém. Nejdůležitější z nich je norma ČSN EN ISO 3691-4:2024 typu C, která stanovuje požadavky na bezpečnost a způsoby jejich ověřování pro automatické průmyslové vozíky a jejich systémy.

Součástí je také schematický přehled analyzovaného systému, všech jeho prvků a jejich vzájemných vazeb, uvedený v podobě blokových diagramů na obr. 91. Z diagramu byl následně vypracován seznam identifikující všechna relevantní nebezpečí. V systému se vyskytují primárně mechanické a elektrické nebezpečí, ale jsou zde přítomna i další.

Důležitou informací v RA je i způsob samotného hodnocení nebezpečí. Zde se autor snažil vyvarovat standartního hodnocení pomocí postupů z ČSN EN ISO 13849 ed. 2. Využita je tak podrobnější a rozsáhlejší metodika SCRAM (obr. 92) vyvinutá společností SICK [152].

Nejdůležitější z kapitol RA je podrobný přehled identifikovaných nebezpečí s přiřazenými indexy a celkovou mírou rizika (obrázek 93), která jsou v následující kapitole přiřazeny do částí životního cyklu systému (obr. 94). Tím tak vzniká komplexní přehled všech možných nebezpečí během každé z činností týkající se vozíku a periferních dopravníků.

Poslední z kapitol RA je samotný proces snižování rizik. Ten je uváděn ve formě jednostránkových formulářů o třech krocích. Příkladem je na obrázku 95 uveden druhý z nich.



Obr. 91 Blokový diagram systému vozíku, [151]

Závažnost zranění	Vystavení nebezpečí	Možnost zamezení škod	Pravděpodobnost výskytu			PLr
			Q1	Q2	Q3	
S1	-	-	0	0	0	a
S2	-	A1	0	0	1	b
		A2	0	1	2	c
S3	F1	A1	1	2	3	d
		A2	2	3	4	
	F2	A1	3	4	5	
		A2	4	5	6	
S4	F1	A1	5	6	7	e
		A2	6	7	8	
	F2	A1	7	8	9	
		A2	8	9	10	

Obr. 92 Hodnocení rizika podle metody SCRAM, [151]

3.4 Přehled identifikovaných nebezpečí

ID	Popis nebezpečí	Prvky rizika	Výsledný index rizika
1. Mechanická nebezpečí			
1.1 Nebezpečí přejetí nebo přeběhnutí			
1.1-1	Nebezpečí přejetí při pohybu vozíku, v důsledku přehlédnutí vozíku nebo nepozornosti pracovníků	S2 F2 A2 Q2	1
1.2 Nebezpečí vymrštění			
Nenachází se v analyzovaném systému			
1.3 Nebezpečí stlačení (kvazistatický kontakt)			
1.3-1	Nebezpečí stlačení mezi dopravníkem (nebo jeho částí) na vozíku a stacionárním dopravníkem při najíždění	S3 F2 A2 Q2	5

Obr. 93 Výňatek z přehledu identifikovaných nebezpečí, [151]

3.5 Analýza významných nebezpečí během životního cyklu

Analýza významných nebezpečí během celého životního cyklu stroje/systému			Typ stroje/systému: Logistický systém využívající autonomní mobilní robot Model: OMRON LD-90	
Pořadí	Fáze životního cyklu	Popis	IDs	Popis nebezpečné události:
1. Doprava				
1.1	Nakládání a vykládání	Nebezpečí vyplývající z ruční manipulace komponent, ergonomická nebezpečí	1.8-8, 1.11-3, 8.1-1, 8.3-1	Při nakládání/vykládání může dojít k vysmeknutí komponent a stlačení či nárazu na části těla; ruční manipulace s nákladem může také být ergonomicky náročná.
1.2	Přeprava	Nebezpečí vyplývající ze strojové manipulace komponent	1.8-8	Při přepravě může dojít k uvolnění komponent a stlačení.

Obr. 94 Výňatek z analýzy významných nebezpečí během životního cyklu, [151]

Formulář pro odhad a snižování rizika			Model stroje: OMRON LD-90 Datum vypracování: 13/11/2024
ID nebezpečí: 1.3-1, 1.3-3, 1.3-28			
Vypracoval: Jakub Čurda		Pořadové číslo protokolu: 2	1. Mechanické nebezpečí
Životní etapa: Provoz		Ohrožené osoby: Zaměstnanci	1.3 Stlačení
Popis nebezpečné události: Nebezpečí stlačení mezi dopravníkem (popř. jeho částí), nebo mezi vodíci lištami na vozíku a stacionárním dopravníkem při najíždění			
Počáteční riziko	Závažnost zranění:	S3 – Závažné zranění	Index rizika: 5
	Vystavení nebezpečí:	F2 – Vysoké	
	Možnost zamezení škod:	A2 – Nemožné	
	Pravděpodobnost výskytu:	Q2 – Střední	
Implementace těchto mechanických a konstrukčních opatření: Odstranit ostré hrany; umístit stacionární dopravníky a napájecí porty mimo frekventované trasy. ⁴			
Snížené riziko po implementaci mechanických a konstrukčních opatření	Závažnost zranění:	S2 – Závažné zranění	Index rizika: 1
	Vystavení nebezpečí:	F2 – Vysoké	
	Možnost zamezení škod:	A2 – Nemožné	
	Pravděpodobnost výskytu:	Q2 – Střední	
Implementace této bezpečnostní ochrany a doplňkových ochranných zařízení: Instalace světelné signalizace na vozík a signalizování nájezdu a výjezdu ⁵ ; zpomalit pohyb vozíku při najíždění a vyjíždění pod 300 mm/s ⁶ .			
Snížené riziko po implementaci bezpečnostní ochrany a doplňkových ochranných zařízení	Závažnost zranění:	S2 – Závažné zranění	Index rizika: 0
	Vystavení nebezpečí:	F1 – Nízké	
	Možnost zamezení škod:	A1 – Možné	
	Pravděpodobnost výskytu:	Q2 – Střední	
Implementace těchto varovných informací a informací pro použití: Informování zasažených pracovníků viz Tabulka doplňků k manuálu, ad.1.			
Snížené riziko po implementaci varovných informací a informací pro použití	Závažnost zranění:	S2 – Závažné zranění	Index zbytkového rizika: 0
	Vystavení nebezpečí:	F2 – Nízké	
	Možnost zamezení škod:	A1 – Možné	
	Pravděpodobnost výskytu:	Q1 – Nízká	
Výsledné bezpečnostní hodnocení: Opatření jsou dostatečná			

⁴ Bez normy, logické snížení rizika odstraněním zdroje nebezpečí.

⁵ ČSN EN ISO 12100:2011 článek 6.4.3

⁶ ČSN EN ISO 3691-4:2023 články 4.3.2 a 4.7

10 DOPORUČENÍ PRO PRAXI A DISKUSE

V následujících dvou podkapitolách jsou uvedena doporučení pro provoz AMR, která byla získána na základě praktických zkušeností autora a nebylo možné je zařadit do žádné z předchozích kapitol. Následně je stručně diskutováno, jaké další aspekty by mohly být do diplomové práce či zpracovávaného projektu zahrnuty. Tato část tedy představuje soubor různých návrhů a myšlenek, které nebylo možné zařadit do jiných částí práce.

10.1 Praktické doporučení pro provozování AMR robotů

AMR jsou primárně vhodné pro vysoce dynamická prostředí a kombinované provozy, kde by automaticky řízená vozidla (AGV) měla tendenci se zastavovat a nedosahovala by stabilního doručování. Pro navigaci v takovýchto prostředích by však byla efektivnější technologie využívající dynamické mapování, například metoda SLAM, než zaznamenávání prostoru čistě staticky.

Jednou z hlavních výhod AMR je minimalizace potřeby lidského zásahu, což je zvláště přínosné v provozech, kde mají logističtí pracovníci již značné množství dalších úkolů. Díky tomu jsou AMR vhodné i pro přepravu menších (méně důležitých) položek, jako je například jednotlivý díl k proměření, nebo nástroj k pracovnímu stroji. Naopak AGV jsou vhodnější pro aplikace, kde je zaručena stálá průjezdnost přepravní trasy a je požadován vyšší a stálý takt doručování.

Chování mobilního robotu OMRON LD-90 v nebezpečných situacích je založeno na jeho specifickém způsobu plánování trasy. Primárně je pro navigaci využíván algoritmus podobný A*, který určuje celkovou trajektorii pohybu na větší vzdálenosti. Přibližně tři metry před aktuální polohou vozíku je trajektorie následně upravována vyhlazovací funkcí, která se chováním jeví jako polynom. Při detekci překážky může robot reagovat třemi způsoby: Pokud je překážka ve větší vzdálenosti (> 3 m), dojde k přeplánování trasy. V případě překážky ve střední vzdálenosti se robot zastaví běžným způsobem. Pokud se překážka objeví extrémně blízko (obecně méně než 10 cm), například když někdo náhle vstoupí do zorného pole LiDARu, robot provede okamžité nouzové zastavení a přejde do chybového stavu.

Pro provozování mobilního robotu v hale by bylo nutné splnit veškeré požadavky stanovené normou ČSN EN ISO 3691-4:2024, která byla aktualizována v roce 2024. Konstrukce samotného systému tyto požadavky víceméně splňuje. Výjimkou je vyznačení upínacích bodů pro transport, které by bylo nutné doplnit jak pro vozík, tak pro nástavbu. Kromě toho by bylo nezbytné na podlaze vyznačit některé nebezpečné zóny, zejména v bezprostředním okolí dopravníků, kde probíhá nakládka a vykládání. Šířka uliček v hale nepředstavuje větší problém. To je však způsobeno spíše zavedením jednosměrného provozu, jelikož dva roboty by se vedle sebe v uličce u dopravníku 300 nevešly.

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, jedním z největších problémů při provozu AMR je nejistota ohledně jejich přesné polohy. I když jsou vybaveny mechanismy pro korekci lokalizace, v praxi není možné dosáhnout stoprocentní přesnosti. Pokud se přesnost lokalizace pohybuje v rozmezí 90–40 %, provoz zůstává stabilní. Avšak při poklesu pod 30 % dochází k opakovaným přepočtům a kontrolám aktuální pozice. Úpravy navržené v této práci využívající vizuální zábrany již byly ověřeny v praxi a prokázaly vysokou účinnost.

Pro další implementaci podobných vozíků do kombinovaných provozů by proto bylo vhodné volit trasy s minimem nestabilních objektů nebo zajistit jejich zakrytí pevnými zábranami, které zlepšují podmínky pro spolehlivou lokalizaci.

Během vypracování této práce byl společností OMRON vydán program DebuInfoViewer, který umožňuje jednoduché zobrazení všech informací stažených z Debug Info souborů (DeI). Tyto informace zahrnují (po nastavení uvedeném v kapitole Konfigurace) mapy lokalizace a Wi-Fi signálu, které byly dosavadně pracně vytvářeny. Pro budoucí optimalizaci procesů je možné se této situaci vyhnout tím, že DeI bude zaslán technickému zástupci firmy, který je schopen z něj získat potřebná data. Je však nutné DeI takto zasílat, software totiž zatím není veřejně dostupný.

Kvůli standardizaci byly také sjednoceny všechny verze softwarů na AMR, které se původně rozcházely. Nyní je na všech vozících instalován FLOW 4.1.7. Instalaci softwaru je možné provádět přímo v provozu. V této diplomové práci ji ale prováděl technik OMRON, protože autor nemá žádné oficiální školení na to, jak s vozíky pracovat. V novější verzi došlo k drobným změnám, které musejí být reflektovány v mapových podkladech. Největší z nich je odstranění Taxi linek, ty v nové verzi zastupuje pouze jeden Standby cíl.

Provoz AMR v kombinovaném a komplikovaném prostředí je ale více než možný. To bylo ověřeno i díky přístupu k aktuálně fungujícímu provedení ve firmě THK, na kterém byla možnost vyzkoušet v práci navrhované úpravy okolí a optimalizace programu. Největším problémem, kromě komplikací kvůli Wi-Fi signálu zmíněných v kapitole 7.5.5, je však servisovatelnost celého systému. Z pozorování se zdá, že každého půl roku musí být měněno jedno nebo více koleček, což je přičítáno množství kovových špon na podlaze (ty jsou pozorovatelné na obrázku 97) v kombinaci s poměrně agresivním čisticím prostředkem proti olejům, který je ve firmě využíván. Cena výměny jednoho kolečka se pohybuje v rozmezí tisíců korun. V provozu se také občas stává, že dojde k poškození nebo odření LiDAR jednotky. Pokud se jedná jen o plastový kryt, jak je vidět na obr. 96, ten může být vyměněn a servis tak není příliš drahý. Většinou však dochází k většímu otřesu, který způsobí vnitřní chybu na LiDARu (nejčastěji posunutí ostřicích zrcadel v mechanismu), což vyžaduje kompletní výměnu celé jednotky. Cena výměny je opět neveřejná, nicméně se pohybuje v řádu vyšších desítek až stovek tisíc korun.



Obr. 96 LiDAR jednotka se zvýrazněným poškozením [autor]



Obr. 97 Poškozené kolečko (nepoháněné) [autor]

Jedním z dalších postupů v práci je tak (kromě těch uvedených jako nehotové v následující podkapitole) navrhována tvorba laser prostupného krytování umístitelného na přední část vozíku. To s sebou samozřejmě přináší mnohé další komplikace. Největší z nich by nejspíše bylo čištění samotného LiDARu a prostoru kolem něj. Ověření výhodnosti tohoto konceptu už ale zůstává závislé na samotném zpracování a předpokládaném potvrzení funkčnosti v praxi.

AMR jsou autorem celkově vnímány jako univerzální a vhodný přístup k řešení logistických problémů. Je však znepokojující, že naprostá většina vozíků na trhu funguje spíše nebo výhradně jako AGV. Tento stav je samozřejmě ovlivněn poptávkou, mobilní roboty jsou totiž často aplikovány až pro větší skladové jednotky a výrobní linky. Naprostá většina těchto systémů, s výjimkou doručovacích společností jako Amazon, se vyskytuje v automobilovém průmyslu, kde je kladen důraz právě na takty. AMR tak zde, vzhledem ke své proměnlivé době doručování, nejsou zcela praktické nebo nutné.

Autorem bylo také pozorováno, že v kombinaci s mobilními vozíky, ať už AMR nebo AGV, dochází také k nárůstu využívání holografických projekcí v provozu. Tyto projekce slouží například jako varování před vozíkem v nepřehledných křižovatkách nebo okolo rohů.

10.2 Diskuse diplomové práce

Celkově je projekt zpracovaný v diplomové práci autorem hodnocen jako úspěšný. Jedná se o poměrně rozsáhlý problém, jehož velká část byla již v této práci zpracována. Stále však chybí některé činnosti, které je nutné dokončit předtím, než bude možné vozíky nasazovat v reálném provozu. Je nutné zajistit souladnost s normativními požadavky (viz předešlé kapitoly). Není také vypracováno schéma elektrického zapojení obou rozváděčů (jak vozíku, tak periferních dopravníků). Dále je potřeba vypracovat kompletní dokumentaci k projektu, zejména manuál, který by mohl přebrat mnoho informací z operátorské příručky, stále by ale vyžadoval hodně práce. Největší překážkou je chybějící PLC program, který by celý systém řídil. Bez něj bude obtížné ověřovat funkčnost jednotlivých prvků mezi sebou, nemluvě o nemožnosti aplikovat řešení na výrobní hale.

Pro případné další rozšíření projektu jsou klíčové některé prvky. Nejurgentnější je instalace signalizačního osvětlení (majáků) na všechny křižovatky, které jsou v provozu využívány AMR. Tím se předejde zbytečným kolizím s ostatním provozem na hale. Dále by pro využití více než dvou vozíků bylo vhodné zpracovat logistické propočty vytížení. Vozík dosud jezdí pouze relativně krátkou dobu na začátku směny (důvod nelze sdělit – know-how). Pro další využití je však nutné brát v potaz i časy nabíjení a přejezdů mezi případnými dalšími lokalitami. V případě výrazného rozšíření logistického systému využívajícího AMR by bylo také nutné kompletně přepracovat logistické a zásobovací trasy na celém prostoru haly tak, aby došlo k co nejmenšímu omezení kombinovaného pohybu vozíků a ostatního provozu.

11 ZÁVĚR

Předložená práce na téma Uplatnění autonomních mobilních robotů ve výrobě se ve své úvodní části zabývá rozbořem a přehledem současného stavu poznání týkajícího se mobilní robotiky. Ta zahrnovala analýzu pohybu, systémový rozbor řízení mobilních robotů, jejich vnímání a chápání okolí, vysvětlení jejich navigace, lokalizace, plánování a vyhýbání se kolizím a konečně principy řízení a ovládání.

Následovala kapitola zabývající se systémovým rozbořem a analýzou aktuálního stavu používání. Ta obsahuje přehled současného využívání vozíku OMRON LD-90 ve firmě THK, jeho konstrukční provedení, úvod do mapových podkladů a logiku převozu. Dále je zde také uveden přehled českého trhu s mobilními roboty. Zde jsou uvedeny všichni větší zástupci, kteří do Česka dodávají svoje nebo jiné unikátní AMR, společně s analýzou jejich katalogů. Nad rámec práce byly také s několika technickými a obchodními zástupci firem provedeny rozhovory, ze kterých vzešlo množství praktických i zákulisních informací, které doplňují přehledy jejich katalogů. V poslední části kapitoly byl také zpracován kompletní systémový rozbor všech jednotlivých prvků systému a jejich vzájemných vazeb, ze kterého následně vycházely koncepty provedení v další sekci.

Tím vzniklo šest možných variant provedení nástavby vozíku, které byly hodnoceny metodou multikriteriálního hodnocení, do níž byly zahrnuty parametry jako funkčnost a univerzálnost, inovativnost, nutnost úpravy okolí a ekonomičnost konstrukce. Jako nejlepší z konceptů vzešlo provedení se čtveřicí lineárních os a vertikálně pohyblivým dopravníkem, které tak bylo zvoleno jako finální konstrukční varianta.

Ta byla v šesté kapitole, společně s návrhem periferního dopravníku, kompletně konstrukčně rozpracována. Její návrh probíhal iteračně, největšími ovlivňujícími faktory zde byly zástavbové rozměry a nosnost vozíku. Celý návrh byl zároveň designován tak, aby bylo možné změny případně aplikovat na již využívané provedení ve společnosti THK. To ovlivňovalo i vytvořený periferní dopravník a jeho provedení. Nad rámec práce byly všechny komponenty zhotoveny a obě konstrukce reálně smontovány do funkční podoby ve vývojové dílně firmy. K tomu sloužila i kompletní výkresová dokumentace o zhruba 74 výkresech, která byla rovněž vytvořena jako součást závěrečné práce.

Pro vozík byly také vytvořeny kompletní mapové podklady v softwaru Mobile Planner. Tento proces zahrnoval tvorbu skenů prostoru výrobní haly, jejich doplnění logické bloky a zóny, sepsání řídicích příkazů a úpravy konfigurace vozíku, propojení s nově zavedeným systémem Fleet Manager a finální optimalizaci jak samotného programu, tak experimentální změny na hale a měření nad rámec zadání.

Pro takto zhotovený projekt bylo v dalším kroku provedeno ekonomicko-technické zhodnocení, které zahrnovalo i hodinovou sazbu práce za zhruba 1010 hodin. Výsledná cena, cirká 2 300 000 Kč, tak naprosto odpovídá realitě současného stavu systému (tj. před samotným zprovozněním).

Součástí výsledku práce, kromě samotné tvorby systému, byla i řada doporučení pro praktické využívání AMR v reálném provozu. Ta jsou uvedena jak v poslední kapitole, tak ve všech předchozích sekcích. Práce je tak doplněna i o potřebné znalosti vyplývající z reálných zkušeností s prací s vozíky LD-90.

Mimo stanovené cíle byla provedena i bezpečnostní analýza rizik celého systému. Byla sepsána příručka operátora, která obsahuje další praktické znalosti vhodné pro každodenní provoz AMR. Provedena byla také statická kontrola zatížení nosné desky vozíku v programu SolidWorks. V přílohách lze nalézt i přehled drobných konstrukčních nedostatků zjištěných prakticky při samotném sestavování nástavby vozíku a periferního dopravníku.

Obecně se nebojím tvrdit, že zkušenosti z vypracování této práce mi pomohly získat větší pochopení toho, jak moc jsou všechny oblasti automatizace propojené, a naučily mě, že finální projekt je vždy mnohem víc než součet jeho jednotlivých částí. Každá součást, od nejmenšího plechového výpalku po software, který ovládá celou logistickou síť ve firmě, musí fungovat v souladu. Toto uvědomění mě přimělo nahlížet na podobnou problematiku více holisticky a uvědomit si, že v praxi neexistuje žádné ideální řešení na všechny problémy.

Snad nejvíce obohacující na tomto projektu byla příležitost vést si sám (samozřejmě pod dozorem) vlastní práci, od počáteční koncepce až po finální fáze testování a doladění. Byl jsem zapojen do každého kroku aplikačního procesu – od navrhování možných řešení, práce na výrobě, montáže a částečného uvedení do provozu až po dohled nad tím, že finální systém splňuje bezpečnostní standardy. Toto stoprocentní zapojení mi pomohlo rozvinout nejen moje technické dovednosti, ale také si vytvořit pocit zodpovědnosti za svou práci a hrdost z úspěchu projektu.

Cítím, že dovednosti, které jsem během vypracování této práce získal, spolu s uspokojením z toho, jak vše dohromady funguje, mi pomohly vytvořit si pevný základ pro budoucí kariéru v oblasti robotiky a automatizace. Za to všechno bych chtěl znovu poděkovat společnosti THK RHYTHM AUTOMOTIVE CZECH, a. s., díky které mohl celý projekt bezúplatně vzniknout. Velké díky patří také mému vedoucímu Radku Knoflíčkovi za všechny jeho expertní rady, konzultace a vstřícný přístup, který provázel všechny části této práce.

12 SEZNAMY POUŽITÝCH ZDROJŮ

12.1 Seznam informačních zdrojů

- [1] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [2] SIEGWART, Roland; NOURBAKHSH, Illah Reza a SCARAMUZZA, Davide. *Introduction to autonomous mobile robots*. Second edition. Intelligent robotics and autonomous agents. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, [2011]. ISBN 978-026-2015-356.
- [3] RUBIO, Francisco; VALERO, Francisco a LLOPIS-ALBERT, Carlos. A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. Online. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019, roč. 16, č. 2. ISSN 1729-8814. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1729881419839596>. [cit. 2024-04-09].
- [4] BRUZZONE, L. a QUAGLIA, Q. Review article: locomotion systems for ground mobile robots in unstructured environments. Online. S. 49-62. Dostupné z: <https://doi.org/doi.org/10.5194/ms-3-49-2012>. [cit. 2024-04-09].
- [5] TODD, D. J. *Walking Machines - An Introduction to Legged Robots*. New York, NY: Springer, 19 March 2012. ISBN 978-1-4684-6860-1.
- [6] WAYNE, W. Daniel. *Introductory statistics with applications*. Houghton Mifflin, 1977. ISBN 978-0395244302.
- [7] BATAVIA, P.H. a NOURBAKHSH, I. Path planning for the Cye personal robot. Online. *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113)*. 2000, s. 15-20. ISBN 0-7803-6348-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IROS.2000.894575>. [cit. 2024-09-24].
- [8] JARAMILLO-MORALES, Mauricio F; DOGRU, Sedat; GOMEZ-MENDOZA, Juan B a MARQUES, Lino. Energy estimation for differential drive mobile robots on straight and rotational trajectories. Online. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2020, roč. 17, č. 2. ISSN 1729-8814. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1729881420909654>. [cit. 2024-09-24].
- [9] MOREAU, Benoit; TOMATIS, Nicola; ARRAS, Kai O.; JENSEN, Bjoern; SIEGWART, Roland Y. et al. A Multi Modal Web Interface for Task Supervision and Specification. Online. 2001, s. 368-378. Dostupné z: <https://doi.org/10.1117/12.417322>. [cit. 2024-09-24].
- [10] VINTAGECOMPUTER.CA. *Heathkit Hero 1 (ET-18) Robot*. Online. 2018. Dostupné z: <https://vintagecomputer.ca/heathkit-hero-1-et-18-robot/>. [cit. 2024-09-24].
- [11] THEMANIPULATIONLAB. *Palm Pilot Robot Kit*. Online. 11/05/2001. Dostupné z: <https://www.cs.cmu.edu/~pprk/>. [cit. 2024-09-24].

- [12] MARS LAND, Stephen; NEHMZOW, Ulrich a SHAPIRO, Jonathan. *A Real-Time Novelty Detector for a Mobile Robot*. Online. 2000. [cit. 2024-09-24].
- [13] MOBILE INDUSTRIAL ROBOTS. *Scalable robotics solution: Dream big, adapt with ease*. Online. 2024. Dostupné z: <https://mobile-industrial-robots.com/cs/produkty/mir-go/hyperion-robot-platform-for-mir200>. [cit. 2024-09-24].
- [14] VTM. *Stretch RE1*. Online. 2020. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/byvaly-vysoky-manazer-googlu-ukazal-robota-stretch-re1-vysaje-utre-prach-a-stoji-jako-nova-skodovka/sc-870-a-204892/default.aspx>. [cit. 2024-09-24].
- [15] BLACKWELL, Mike. Uranus mobile robot. In: . Carnegie Mellon University, 1991. Dostupné také z: https://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub3/blackwell_mike_1990_1/blackwell_mike_1990_1.pdf.
- [16] ANTONELLI, G.; CHIAVERINI, S. a FUSCO, G. A calibration method for odometry of mobile robots based on the least-squares technique: theory and experimental validation. Online. *IEEE Transactions on Robotics*. 2005, roč. 21, č. 5, s. 994-1004. ISSN 1552-3098. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TRO.2005.851382>. [cit. 2024-09-24].
- [17] SCHILL, Felix. *Distributed temporal event mapping and fusion*. Diplomová práce. Australian National University Research School for Information Sciences and Engineering Department of Systems Engineering: University of Karlsruhe (TH) Faculty of Computer Science Industrial Applications of Informatics and Microsystems (IAIM) Prof. Dr.-Ing. R. Dillmann, 2002.
- [18] ROBOTICS INSTITUTE CARNEGIE MELLON UNIVERSITY LOGO. *The Terregator Mobile Robot*. Online. 1991, 2024. Dostupné z: <https://www.ri.cmu.edu/publications/the-terregator-mobile-robot/>. [cit. 2024-09-24].
- [19] TAKAYAMA, Toshio a HIROSE, Shigeo. Connected Crawler Vehicle for Inspection of Narrow and Winding Space. Online. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2003, roč. 15, č. 1, s. 61-69. ISSN 1883-8049. Dostupné z: <https://doi.org/10.20965/jrm.2003.p0061>. [cit. 2024-05-17].
- [20] BRUZZONE, Luca; NODEHI, Shahab Edin a FANGHELLA, Pietro. Tracked Locomotion Systems for Ground Mobile Robots: A Review. Online. *Machines*. 2022, roč. 10, č. 8. ISSN 2075-1702. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/machines10080648>. [cit. 2024-05-17].
- [21] CHRISTENSEN, Henrik; AMATO, Nancy; YANCO, Holly; MATARIC, Maja; CHOSET, Howie et al. A Roadmap for US Robotics – From Internet to Robotics 2020 Edition. Online. *Foundations and Trends® in Robotics*. 2021, roč. 8, č. 4, s. 307-424. ISSN 1935-8253. Dostupné z: <https://doi.org/10.1561/23000000066>. [cit. 2024-05-17].
- [22] WANG, Tianhai; CHEN, Bin; ZHANG, Zhenqian; LI, Han a ZHANG, Man. Applications of machine vision in agricultural robot navigation: A review. Online. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022, roč. 198. ISSN 01681699. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107085>. [cit. 2024-05-17].

- [23] MATEO SANGUINO, Tomás de J. 50 years of rovers for planetary exploration: A retrospective review for future directions. Online. *Robotics and Autonomous Systems*. 2017, roč. 94, s. 172-185. ISSN 09218890. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.04.020>. [cit. 2024-05-17].
- [24] NAGATANI, Keiji; KIRIBAYASHI, Seiga; OKADA, Yoshito; OTAKE, Kazuki; YOSHIDA, Kazuya et al. Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots. Online. *Journal of Field Robotics*. 2013, roč. 30, č. 1, s. 44-63. ISSN 1556-4959. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/rob.21439>. [cit. 2024-05-17].
- [25] VYŠÍN, Martin. HYBRID ARCHITECTURES OF MOBILE ROBOTS. Online. *ENGINEERING MECHANICS 2004 NATIONAL CONFERENCE*. 2004, roč. 10 - 13 May 2004, s. 1-7. Dostupné z: <https://engmechx.it.cas.cz/improc/2004/T-Vysin-Martin.pdf>. [cit. 2024-05-17].
- [26] TADAKUMA, Kenjiro; TADAKUMA, Riichiro; MARUYAMA, Akira; ROHMER, Eric; NAGATANI, Keiji et al. Mechanical design of the Wheel-Leg hybrid mobile robot to realize a large wheel diameter. Online. *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2010, s. 3358-3365. ISBN 978-1-4244-6674-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5651912>. [cit. 2024-05-20].
- [27] VARGAS, German A.; GOMEZ, David J.; MUR, Over a CASTILLO, Ricardo A. Simulation of a wheel-leg hybrid robot in Webots. Online. *2016 IEEE Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA)*. 2016, s. 1-5. ISBN 978-1-5090-3787-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/CCRA.2016.7811403>. [cit. 2024-09-22].
- [28] KIM; JINWOOK AND KIM; YOON-GU AND KWAK; JEONG-HWAN; HONG et al. *Wheel & Track hybrid robot platform for optimal navigation in an urban environment*. Proceedings of SICE Annual Conference 2010. Taipei, Taiwan, 2010, pp. 881-884.
- [29] BRUZZONE, Luca; BAGGETTA, Mario; NODEHI, Shahab E.; BILANCIA, Pietro a FANGHELLA, Pietro. Functional Design of a Hybrid Leg-Wheel-Track Ground Mobile Robot. Online. *Machines*. 2021, roč. 9, č. 1. ISSN 2075-1702. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/machines9010010>. [cit. 2024-05-22].
- [30] WANG, Yaoyao; JIANG, Surong; YAN, Fei; GU, Linyi a CHEN, Bai. A new redundancy resolution for underwater vehicle–manipulator system considering payload. Online. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2017, roč. 14, č. 5. ISSN 1729-8814. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1729881417733934>. [cit. 2024-05-22].
- [31] RIDAO, Pere; CARRERAS, Marc; RIBAS, David; SANZ, Pedro J. a OLIVER, Gabriel. Intervention AUVs: The next challenge. Online. *Annual Reviews in Control*. 2015, roč. 40, s. 227-241. ISSN 13675788. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2015.09.015>. [cit. 2024-05-22].
- [32] ROSZKOWSKA, Elzbieta; MAKOWSKI-CZERSKI, Piotr a JANIEC, Lukasz. Multi-level control for mobile robot systems *. Online. *IFAC-PapersOnLine*. 2022, roč. 55,

č. 28, s. 87-92. ISSN 24058963. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.328>. [cit. 2024-10-12].

- [33] ANDREASSON, H.; GRISETTI, G.; STOYANOV, T. a PRETTO, A. Sensors for Mobile Robots. In: . Berlin, Heidelberg: Springer, s. 1-22. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-642-41610-1_159-1S.
- [34] TECHTARGET. *What is a complementary metal-oxide semiconductor (CMOS)?* Online. 2024. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/CMOS-complementary-metal-oxide-semiconductor>. [cit. 2024-09-23].
- [35] EVERETT, H. R. *Sensors for mobile Robots*. Canada, 1995. ISBN 15-688-1048-2.
- [36] KUCNER, Tomasz Piotr; MAGNUSSON, Martin; MGHAMES, Sariah; PALMIERI, Luigi; VERDOJA, Francesco et al. Survey of maps of dynamics for mobile robots. Online. *The International Journal of Robotics Research*. 2023, roč. 42, č. 11, s. 977-1006. ISSN 0278-3649. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/02783649231190428>. [cit. 2024-10-12].
- [37] ČURDA, Jakub; CHALUPA, Pavel; HLAVÁČEK, Petr; OSTRATICKÝ, Jakub a ŠKOPEC, Filip. *Semestrální projekt do předmětu GVO-A: Drony v zemědělství*. PDF. Písemné. Vysoké učení technické v Brně, 2024.
- [38] CHOSET, Howie M.; LYNCH, Kevin M.; HUTCHINSON, Seth; KANTOR, George; BURGARD, Wolfram et al. *Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementation*. Intelligent robotics and autonomous agents. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, [2005]. ISBN 978-026-2033-275.
- [39] LATOMBE, Jean-Claude. *Robot Motion Planning: The Springer International Series in Engineering and Computer Science*. Online. Springer Book Archive. NYC: Springer New York, 2012. ISBN 978-1-4615-4022-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4022-9>. [cit. 2024-10-28].
- [40] WAYAHDI, Muhammad Rhifky; GINTING, Subhan Hafiz Nanda a SYAHPUTRA, Dinur. Greedy, A-Star, and Dijkstra's Algorithms in Finding Shortest Path. Online. *International Journal of Advances in Data and Information Systems*. 2021, roč. 2, č. 1, s. 45-52. ISSN 2721-3056. Dostupné z: <https://doi.org/10.25008/ijadis.v2i1.1206>. [cit. 2024-10-28].
- [41] JIMÉNEZ, P.; THOMAS, F. a TORRAS, C. 3D collision detection: a survey. Online. 2001, roč. 25, č. 2, s. 269-285. ISSN 00978493. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0097-8493\(00\)00130-8](https://doi.org/10.1016/S0097-8493(00)00130-8). [cit. 2024-11-04].
- [42] KLOSOWSKI, J.T.; HELD, M.; MITCHELL, J.S.B.; SOWIZRAL, H. a ZIKAN, K. Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-DOPs. Online. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Roč. 4, č. 1, s. 21-36. ISSN 10772626. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/2945.675649>. [cit. 2024-11-04].
- [43] MIRTICH, Brian. V-Clip. Online. *ACM Transactions on Graphics*. 1998, roč. 17, č. 3, s. 177-208. ISSN 0730-0301. Dostupné z: <https://doi.org/10.1145/285857.285860>. [cit. 2024-11-04].

- [44] LUMELSKY, V.J. a SKEWIS, T. Incorporating range sensing in the robot navigation function. Online. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Roč. 20, č. 5, s. 1058-1069. ISSN 00189472. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/21.59969>. [cit. 2024-11-04].
- [45] COX, Ingemar J. a WILFONG, Gordon T. (ed.). *Autonomous Robot Vehicles*. Online. Springer New York, NY, 2012. ISBN 978-1-4613-8997-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8997-2>. [cit. 2024-11-04].
- [46] KAMON, I.; RIVLIN, E. a RIMON, E. A new range-sensor based globally convergent navigation algorithm for mobile robots. Online. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 1996, s. 429-435. ISBN 0-7803-2988-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1996.503814>. [cit. 2024-11-04].
- [47] BORENSTEIN, J. a KOREN, Y. The Vector Field Histogram – Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots. *IEEE Journal of Robotics and Automation*. Vol. 1991, no. 7, s. 278–288.
- [48] SEDER, Marija a PETROVIC, Ivan. Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles. Online. *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2007, s. 1986-1991. ISBN 1-4244-0602-1. ISSN 1050-4729. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2007.363613>. [cit. 2024-11-04].
- [49] FOX, D.; BURGARD, W. a THRUN, S. The dynamic window approach to collision avoidance. Online. Roč. 4, č. 1, s. 23-33. ISSN 10709932. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/100.580977>. [cit. 2024-11-04].
- [50] KHATIB, M.; JAOUNI, H.; CHATILA, R. a LAUMOND, J.P. Dynamic path modification for car-like nonholonomic mobile robots. Online. *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*. 1997, s. 2920-2925. ISBN 0-7803-3612-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1997.606730>. [cit. 2024-11-04].
- [51] ARKIN, Ronald C. *Behavior-based robotics*. Intelligent Robots Autonomous Agents. Cambridge: MIT Press, 1998. ISBN 02-620-1165-4.
- [52] MINGUEZ, J. a MONTANO, L. Nearness diagram navigation (ND): a new real time collision avoidance approach. Online. *Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000) (Cat. No.00CH37113)*. 2000, s. 2094-2100. ISBN 0-7803-6348-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IROS.2000.895280>. [cit. 2024-11-04].
- [53] RIGATOS, Gerasimos G. State-Space Approaches for Modelling and Control in Financial Engineering. Online. 2017. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52866-3>. [cit. 2024-10-12].
- [54] BEHAL, Aman; DIXON, Warren; DAWSON, Darren M. a XIAN, Bin. Lyapunov-Based Control of Robotic Systems. Online. 2009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781420006278>. [cit. 2024-10-12].

- [55] Sharkawy, Abdel-Nasser & Koustoumpardis, Panagiotis.: Dynamics and Computed-Torque Control of a 2-DOF manipulator: Mathematical Analysis. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 28. 201-212. Online. [cit. 2024-10-12].
- [56] YURKOVICH, Stephen a LI, Xiaoqiu. Sliding-Mode Control Methodologies for Regulating Idle Speed in Internal Combustion Engines. Online. *The Electrical Engineering Handbook*. 2005, s. 1115-1129. ISBN 9780121709600. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-012170960-0/50087-6>. [cit. 2024-10-12].
- [57] SAKAGAMI, Y.; WATANABE, R.; AOYAMA, C.; MATSUNAGA, S.; HIGAKI, N. et al. The intelligent ASIMO: system overview and integration. Online. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*. 2002, s. 2478-2483. ISBN 0-7803-7398-7. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IRDS.2002.1041641>. [cit. 2024-10-12].
- [58] NOVÁČEK, Radomír. *Telekonference na téma Mobilní roboty: společnost ABB*. Soukromý hovor. 2024.
- [59] ABB. *Autonomní mobilní roboty (AMR)*. Online. 2024. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/autonomni-mobilni-roboty>. [cit. 2024-10-30].
- [60] AGILOX. *Agilox Automated Guided Vehicles (AGVs)*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.agilox.net/en/products/>. [cit. 2024-11-19].
- [61] BOSCH REXROTH. *Bosch Rexroth Mobilní Robotika*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.boschrexroth.com/cs/cz/produkty/skupiny-produktu/mobilni-robotika/>. [cit. 2024-11-19].
- [62] ŽALUD, Petr. *Emailová komunikace na téma Mobilní roboty: Soukromá*. Email. 2024.
- [63] ASSECO CEIT. *Asseco CEIT AGV*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.asseco-ceit.com/cz/asseco-ceit-agv-cz/>. [cit. 2024-11-19].
- [64] GOLIÁŠ, Petr. *Telekonference na téma Mobilní roboty*. Soukromý hovor. 2024.
- [65] EK ROBOTICS. *Ek robotics Transport Robots*. Online. 2021. Dostupné z: <https://ek-robotics.com/en/transport-robots/#c723>. [cit. 2024-11-19].
- [66] ETISOFT. *Etisoft AGV/AMR intralogistics systems*. Online. 2022. Dostupné z: <https://etisoft.eu/pt/amr-intralogistics-systems/>. [cit. 2024-11-19].
- [67] INDEVA. *INDEVA-AGV-ENG-Rev-5*. PDF. 2015. Dostupné také z: <https://www.indevagroup.com/wp-content/uploads/2018/03/INDEVA-AGV-ENG-Rev-5.pdf>.
- [68] JUNGHEINRICH. *Jungheinrich Driverless transport systems*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.jungheinrich.co.uk/automation/mobile-robots>. [cit. 2024-11-19].
- [69] PUSKAR, Marek. *Telekonference na téma Mobilní roboty: společnost Kivnon*. Soukromý hovor. 2024.
- [70] KIVNON. *KIVNON MOBILNÍ ROBOTI*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.kivnon.com/cs/>. [cit. 2024-10-21].

- [71] VELEBIL, Radek. *Telekonference na téma Mobilní roboty: společnost KUKA*. Soukromý hovor. 2024.
- [72] KUKA. *Mobilní roboty KUKA*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/amr-autonomni-mobilni-robotika/mobiln%C3%AD-roboty>. [cit. 2024-10-21].
- [73] LINDE. *Linde C-MATIC*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.linde-mh.cz/cs/Vyroby/Automatizovane-voziky/C-MATIC/>. [cit. 2024-11-19].
- [74] LINDE. *Linde C-MATIC HP*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.linde-mh.cz/cs/Vyroby/Automatizovane-voziky/C-MATIC-HP/>. [cit. 2024-11-19].
- [75] MOBILE INDUSTRIAL ROBOTS. *Mobile Industrial Robots*. Online. 2014. Dostupné z: <https://mobile-industrial-robots.com/>. [cit. 2024-11-19].
- [76] OMRON. *Mobile Robots*. Online. 2020. Dostupné z: <https://automation.omron.com/en/mx/products/families/mobile-robots>. [cit. 2024-11-04].
- [77] JASANSKÝ, Jan a ENGL, Tomáš. *Telekonference na téma Mobilní roboty*. Soukromý hovor. 2024.
- [78] OMRON *aplikační seminář*. Seminář. Tři Věžičky, Jihlava. 2024.
- [79] SEW EURODRIVE. *SEW Mobile Transport Systems*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.sew-eurodrive.de/automation/plant-automation/mobile-systems/mobile-transport-systems/mobile-transport-systems.html>. [cit. 2024-11-19].
- [80] SSI SCHAEFER. *SSI Schaefer AGV*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.ssi-schaefer.com/cs-cz/produkty/dopravniky-doprava/agv>. [cit. 2024-11-19].
- [81] STAUBLI. *MRS90: Mobile Robot System*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.staubli.com/global/en/robotics/products/mobile-robot-system.html>. [cit. 2024-11-19].
- [82] STAUBLI. *AGV Platform Series*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.staubli.com/global/en/robotics/products/AGV-platforms.html>. [cit. 2024-11-19].
- [83] STAUBLI. *FL1500 AGV forklift*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.staubli.com/global/en/robotics/products/AGV-forklift.html>. [cit. 2024-11-19].
- [84] TÁBORSKÝ, Zdeněk. *Emailová komunikace na téma Mobilní roboty: Soukromá*. Email. 2024.
- [85] STAUBLI. *Staubli aplikační seminář*. Seminář. 2024. Dostupné také z: <https://www.youtube.com/watch?v=ZIARWIKjTrA>.
- [86] STILL. *AXH iGo and ACH iGo Technical Data Autonomous Mobile Robots (AMR)*. PDF. 2022. Dostupné také z: <https://www.still.cz/intralogisticke-systemy/automatizace-v-intralogistice/ach.html>.

- [87] SIENIUTYCZ, Stanisław. *Complexity and Complex Thermo-Economic Systems*. Online. Warsaw University of Technology, Faculty of Chemical and Process Engineering, Warsaw, Poland: Elsevier, 2019. ISBN 978-0-12-818594-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03207-7>. [cit. 2024-10-30].
- [88] FESTO. *Electric Motion Sizing*. Online. 2018. Dostupné z: <https://www.festo.com/cz/cs/s/electric-motion-sizing/>. [cit. 2024-10-30].
- [89] FESTO. *ELGD-TB-KF-80-500-0H-PU2*. Online. FESTO. 2018. Dostupné z: <https://www.festo.com/cz/cs/a/8192356/?q=ELGD-TB-KF-80-500-0H%7E%3AfestoSortOrderScored>. [cit. 2024-10-30].
- [90] FESTO. *Servomotor, EMMT-AS-80-*. Online. FESTO. 2018. Dostupné z: <https://www.festo.com/cz/cs/a/4595815/?q=4595815%7E%3AfestoSortOrderScored&identCode1=EMMT-AS-80-S-RB>. [cit. 2024-10-30].
- [91] FESTO. *ELGR-TB-55-500-0H*. Online. FESTO. 2018. Dostupné z: <https://www.festo.com/cz/cs/a/8083788/?q=ELGR-TB-55-500-0H%7E%3AfestoSortOrderScored>. [cit. 2024-10-30].
- [92] FESTO. *Krokový motor - EMMS-ST-57-M-SEB-G2*. Online. FESTO. 2018. Dostupné z: <https://www.festo.com/cz/cs/a/1370481/?identCode1=EMMS-ST-57-M-SEB-G2&autoShowConfigurator=true&fwacid=28737f306f0ce8>. [cit. 2024-10-30].
- [93] THK. *SDA-16-05-V*. Online. THK. Dostupné z: <https://tech.thk.com/en/products/thkdlinks.php?id=11001>. [cit. 2024-10-30].
- [94] THK. *LMF-16-M*. Online. THK. Dostupné z: https://tech.thk.com/en/products/pdfs/en_a04_054.pdf. [cit. 2024-10-30].
- [95] FESTO. *Převodovky EMGA*. Online. FESTO. Dostupné z: https://www.festo.com/cz/cs/p/prevodovky-id_EMGA/?q=EMGA-40-P%7E%3AfestoSortOrderScored. [cit. 2024-10-30].
- [96] SMC. *Electric slide table - LES/LESH/LESYH*. Online. SMC. Dostupné z: <https://www.smc.eu/cs-cz/produkty-a-podpora/les-lesh-lesyh~134028~nav>. [cit. 2024-10-30].
- [97] KOLÍBAL, Zdeněk a KNOFLÍČEK, Radek. *Morfologická analýza stavby průmyslových robotů*. Edice vědecké a odborné literatury. Košice: Viena, 2000. ISBN 80-889-2227-5.
- [98] OMRON ADEPT TECHNOLOGIES, INC. *LD Platform OEM User's Guide, 11970-000 Rev G*. Neveřejný PDF dokument. G. United States of America: Omron Adept Technologies, c2013 - 2017. [cit. 2025-02-11].
- [99] FATH. *Stainless Steel Hinge 40 x 40*. Online. FATH. HOME. C2025. Dostupné z: <https://www.fath24.cz/portfolio/products/stainless-steel-hinge-40-x-40>. [cit. 2025-02-11].
- [100] ITEM. *Úhelník Zn -item*. Online. ITEM. Item Industrietechnik GmbH. 2024. Dostupné z: <https://www.item24.com/cs-cz/uhelnik-6-30x30-zn-bily-hlinik-odstin-podobny-ral>.

9006-41963?type=BR6&outerDimensions=3030&category=profilova-technologie%2Ftechnologie-spojovani. [cit. 2025-02-11].

- [101] NOCTUA. *NF A4x10 24V PWM*. Online. NOCTUA. Noctua.at Premium cooling components designed in Austria. 2023, 2025. Dostupné z: <https://noctua.at/en/nf-a4x10-24v-pwm/specification>. [cit. 2025-02-11].
- [102] RITTAL. *Filtrační vložka z netkané textilie*. Online. RITTAL. 2024. Dostupné z: https://www.rittal.com/cz-cs/products/PG0168KLIMA1/PGR1953KLIMA1/PGR2010KLIMA1/PRO0303?Balen%C3%AD=5_ks. [cit. 2025-02-11].
- [103] ITEM. *Profil 6 30x30*. Online. ITEM. 2024. Dostupné z: <https://www.item24.com/cs-cz/profil-6-30x30-prirodni-odstin-41901>. [cit. 2025-02-11].
- [104] ITEM. *Standartní upevňovací sada*. Online. 2024. Dostupné z: <https://www.item24.com/cs-sk/standardni-spoj-6-pozinkovani-41914?type=BR6&thread=6>. [cit. 2025-02-11].
- [105] ITEM. *Matice s T-drážkou St*. Online. ITEM. Item Industrietechnik GmbH. 2024. Dostupné z: <https://www.item24.com/cs-cz/drazkova-matice-6-st-m6-pozinkovani-41940?type=BR6&thread=6&category=profilova-technologie%2Fmatice-s-t-drazkou>. [cit. 2025-02-12].
- [106] SKF. *16101 - Kuličková ložiska SKF*. Online. SKF. SKF. 2015, 2025. Dostupné z: <https://www.skf.com/cz/productinfo/productid-16101>. [cit. 2025-02-12].
- [107] HABERKORN. *Ozubená řemenice AT T34912*. Online. HABERKORN. Eshop s komponenty pro stavbu strojů - Haberkorn. 2020, 2024. Dostupné z: <https://eshop.haberkorn.cz/ozubena-remenice-at5-roztec-5-0-mm-ozubena-remenice-at5-roztec-5-0-mm-1-28.html>. [cit. 2025-02-12].
- [108] HABERKORN. *Ozubený řemen PU nekonečný AT5 T41682 - Haberkorn*. Online. HABERKORN. Eshop s komponenty pro stavbu strojů - Haberkorn. 2020, 2024. Dostupné z: <https://eshop.haberkorn.cz/ozuben-y-remen-pu-nekonecny-at5-ozuben-y-remen-pu-nekonecny-at5-1-280.html>. [cit. 2025-02-12].
- [109] HABERKORN. *Matice pro T-drážku T34335 - Haberkorn*. Online. HABERKORN. Eshop s komponenty pro stavbu strojů - Haberkorn. 2020, 2024. Dostupné z: <https://eshop.haberkorn.cz/matice-pro-t-drazku-matice-pro-t-drazku-1-38.html>. [cit. 2025-02-12].
- [110] FESTO. *Servomotor EMMT-AS-80-S-LS-RM*. Online. FESTO. Automatizační technologie a technické vzdělání Festo CZ. 1998, 2024. Dostupné z: <https://www.festo.com/cz/cs/a/5255426/>. [cit. 2025-02-12].
- [111] FESTO. *Převodovka EMGA-80-P-G5-EAS-80*. Online. FESTO. Automatizační technologie a technické vzdělání Festo CZ. 1998, 2024. Dostupné z: <https://www.festo.com/cz/cs/a/2297691/>. [cit. 2025-02-12].

- [112] NEUGART GMBH. *PLFE - Neugart GmbH*. Online. NEUGART GMBH. Home - Neugart GmbH. 2022. Dostupné z: <https://www.neugart.com/en/gearboxes/economy-gearboxes/plfe#PLFE64>. [cit. 2025-02-12].
- [113] SIEMENS. *SIMATIC ET 200SP - Siemens Global*. Online. SIEMENS. Siemens. 2022. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/io-systems/et-200sp.html>. [cit. 2025-02-12].
- [114] SIEMENS. *CPU 1510SP-1 PN - Industry Mall - Siemens Ceska republika*. Online. SIEMENS. Siemens. 2015, 2024. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/cs/cz/Catalog/Product/6ES7510-1DK03-0AB0>. [cit. 2025-02-12].
- [115] SIEMENS. *F-TM ServoDrive ST - Industry Mall - Siemens Ceska republika*. Online. SIEMENS. Siemens. 2015, 2024. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/cs/cz/Catalog/Product/6BK1136-6AB01-0BU0>. [cit. 2025-02-12].
- [116] MEAN WELL. *Mean Well RSD-150B-24*. Online. MEAN WELL. MEAN WELL Web: the official MEAN WELL Power Supplies distributor. 2017, 2025. Dostupné z: <https://www.meanwell-web.com/en-gb/dc-dc-enclosed-converter-input-14-4-33-6vdc-output-rsd--150b--24>. [cit. 2025-02-12].
- [117] SCHNEIDER ELECRIC. *NSYSBM405012 - kovová průmyslová skříňka-plné dveře-400x500x120 IP66 IK10 RAL 7035*. Online. SCHNEIDER ELECRIC. Schneider Electric Česká Republika. 2018, 2025. Dostupné z: <https://www.se.com/cz/cs/product/NSYSBM405012/kovov%C3%A1-pr%C5%AFmyslov%C3%A1-sk%C5%99%C3%AD%C5%88kapln%C3%A9-dve%C5%99e400x500x120-ip66-ik10-ral-7035/>. [cit. 2025-02-12].
- [118] STEGO. *KTO 111*. Online. STEGO. Thermal Management for Enclosures. 2023. Dostupné z: <https://www.stego-group.com/products/kto-111>. [cit. 2025-02-12].
- [119] SCHNEIDER ELECRIC. *NSYCVF85M24DPF - ClimasyS ventilátor IP54 - 85m3/h - 24V DC - s výstupní mřížkou a filtrem G2*. Online. SCHNEIDER ELECRIC. Schneider Electric Česká Republika. 2018, 2025. Dostupné z: <https://www.se.com/cz/cs/product/NSYCVF85M24DPF/climasyS-ventil%C3%A1tor-ip54-85m3-h-24v-dc-s-v%C3%BDstupn%C3%AD-m%C5%99%C3%AD%C5%BEkou-a-filtrem-g2/>. [cit. 2025-02-12].
- [120] IGUS. *B17 series | Openable from one side along the inner radius*. Online. IGUS. Igus UK. 2024. Dostupné z: <https://www.igus.co.uk/product/series-B17i>. [cit. 2025-02-12].
- [121] FESTO. *Ovladač pro servomotory CMMT-ST-C8-1C-MP-S0 Festo*. Online. FESTO. Automatizační technologie a technické vzdělání Festo CZ. 1998, 2024. Dostupné z: <https://www.festo.com/cz/cs/a/8163946/>. [cit. 2025-02-12].
- [122] SEZ-CZ. *Plastový box IP 65, 500x400x175 mm*. Online. SEZ-CZ. Úvodní stránka - e-shop.sez-cz.com. 2021, 2025. Dostupné z: <https://eshop.sez-cz.cz/e-shop/3446-plastovy-box-ip65-400x500x170>. [cit. 2025-02-12].

- [123] ICOTEK. *KEL-ER Dělené průchodkové rámečky konfekcionované kabely / IP66 / UL Type 12/4X*. Online. ICOTEK. Průchodkové systémy - EMC komponenty icotek. 2020. Dostupné z: <https://www.icotek.com/cs/produkty/pruchodkove-systemy/kel-er>. [cit. 2025-02-12].
- [124] FOXON. *Průmyslový 8x port Ethernetový switch, zdroj PoE a WiFi (2,4/5 GHz)*. Online. FOXON. FOXON - první volba pro průmyslovou automatizaci a inovace. 2019, 2024. Dostupné z: <https://eshop.foxon.cz/p/prumyslovy-8x-port-ethernetovy-switch-zdroj-poe-a-wifi-24-5-ghz-access-point-bridge-repeater-montaz-na-din>. [cit. 2025-02-24].
- [125] SICK. *WL100-2P3439 - W100-2 SICK*. Online. SICK. SICK Sensor Intelligence. 2015, 2025. Dostupné z: <https://www.sick.com/us/en/catalog/products/detection-sensors/photoelectric-sensors/w100-2/wl100-2p3439/p/p342659>. [cit. 2025-02-12].
- [126] ICOTEK. *KBH Držák pásků na suchý zip pro kabelové pásy na suchý zip*. Online. ICOTEK. Průchodkové systémy - EMC komponenty icotek. 2022. Dostupné z: <https://www.icotek.com/cs/produkty/organizace-kabelaze/kbh>. [cit. 2025-02-12].
- [127] ALUTEC KK. *02-DPS-dopravníky-pasove-new.indd: Pásové dopravníky Určeny k mezioperační dopravě v různých typech provozů*. Elektronický PDF dokument. Čelákovice: ALUTEC KK. Dostupné také z: <https://www.aluteckk.cz/files/dopravníky-pasove-prospekt.pdf>.
- [128] MURTFELDT. *Typ CF / Murtfeldt - Výkon v oblasti plastů*. Online. MURTFELDT. Home / Murtfeldt - Výkon v oblasti plastů. 2016. Dostupné z: <https://www.murtfeldt.cz/produkty/vedeni-retezu-remenu-a-kluzne-profilu/profilu-pro-dopravníky/typ-cf/>. [cit. 2025-02-17].
- [129] FESTO. *Toothed belt axis ELGR-TB55-500-OH Festo GR*. Online. FESTO. Automatizační technologie a technické vzdělání Festo CZ. 2020, 2024. Dostupné z: <https://www.festo.com/gr/en/a/8083780/?q=ELGR-TB-45-500-OH>. [cit. 2025-02-17].
- [130] VYDRAŘ, David. *Projektant systémových řešení Festo: Rozhovor na téma ELGR-TB-45-500-OH*. Soukromý hovor. 2024.
- [131] FESTO. *Spojka EAMD-25-22-12-10X12 Festo CZ*. Online. FESTO. Automatizační technologie a technické vzdělání Festo CZ. 2025. Dostupné z: <https://www.festo.com/cz/cs/a/5029897/>. [cit. 2025-02-17].
- [132] ELSA+GANTER. *GN 30-S/SK Polohovací nohy s/bez matice vnější šestihran dole*. Online. ELSA+GANTER. Vítejte v Elsa+Ganter. 2019, 2024. Dostupné z: <https://www.elesa-ganter.cz/cs/cze/Polohovací-elementy--Polohovací-nohy--GN30-SSK>. [cit. 2025-02-19].
- [133] SIEMENS. *3LD2704-0TK53 SENTRON, zátěžový odpojovač 3LD, nouzový vypínač, 3-pólový*. Online. SIEMENS. Domovská stránka - Siemens SieProtal. C2022. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/cs/cz/Catalog/Product/3LD2704-0TK53>. [cit. 2025-02-24].
- [134] SIEMENS. *3RT2015-2BB42 výkonový stykač*. Online. SIEMENS. Domovská stránka - Siemens SieProtal. C2022. Dostupné z:

- <https://mall.industry.siemens.com/mall/cs/cz/Catalog/Product/3RT2015-2BB42>. [cit. 2025-02-24].
- [135] SIEMENS. *6GK5008-0BA10-1AB2 SCALANCE XB008, nekonfigurovatelný průmyslový ethernetový switch*. Online. SIEMENS. Domovská stránka - Siemens SiePortal. 2021, c2022. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/cs/cz/Catalog/Product/6GK5008-0BA10-1AB2>. [cit. 2025-02-24].
- [136] SCHNEIDER ELECRIC. *XVMB1RAG XVMB1RAG Image Schneider Electric signální sloup bez bzučáku + 3 světelné návěští - Ø 45 mm - 24 V AC/DC - IP42*. Online. SCHNEIDER ELECRIC. Schneider Electric Česká Republika. C2025. Dostupné z: <https://www.se.com/cz/cs/product/XVMB1RAG/sign%C3%A1ln%C3%AD-sloup-bez-bzu%C4%8D%C3%A1ku-+-3-sv%C4%9Bteln%C3%A9-n%C3%A1v%C4%9B%C5%A1t%C3%AD-%C3%B8-45-mm-24-v-ac-dc-ip42/?range=1057-harmony-xvm&parent-subcategory-id=5010&filter=business-1-pr%C5%AFmyslov%C3%A1-automatizace-a-%C5%99%C3%ADzen%C3%AD&selectedNodeId=12144417735>. [cit. 2025-02-24].
- [137] SCHNEIDER ELECRIC. *XALK178G - žlutá skříňka - 1 červené hřibové tlačítko nouzového zastavení Ø40 uvolnění otočením 1Z+2V*. Online. SCHNEIDER ELECRIC. Schneider Electric Česká Republika. C2025. Dostupné z: <https://www.se.com/cz/cs/product/XALK178G/%C5%BElut%C3%A1-sk%C5%99%C3%AD%C5%88ka-1-%C4%8Derven%C3%A9-h%C5%99ibov%C3%A9-tla%C4%8D%C3%ADtko-nouzov%C3%A9ho-zastaven%C3%AD-%C3%B840-uvoln%C4%9Bn%C3%AD-oto%C4%8Den%C3%ADm-1z+2v/>. [cit. 2025-02-24].
- [138] SCHNEIDER ELECRIC. *Harmony XB4 Schneider Elecric Česká republika*. Online. SCHNEIDER ELECRIC. Schneider Electric Česká Republika. C2025. Dostupné z: <https://www.se.com/cz/cs/product-range/632-harmony-xb4/?parent-subcategory-id=89188&filter=business-1-pr%C5%AFmyslov%C3%A1-automatizace-a-%C5%99%C3%ADzen%C3%AD#products>. [cit. 2025-02-24].
- [139] SIEMENS. *6ES7677-2SB42-0GB0 SIMATIC ET 200SP Open Controller, CPU 1515SP PC2 F*. Online. SIEMENS. Domovská stránka - Siemens SiePortal. C2024. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7677-2SB42-0GB0>. [cit. 2025-02-24].
- [140] OMRON. *NX102-9000 OMRON, Česká republika*. Online. OMRON. Průmyslová automatizace OMRON, Česká republika. C2024. Dostupné z: <https://industrial.omron.cz/cs/products/NX102-9000>. [cit. 2025-02-24].
- [141] BALLUFF. *BIS017A (BIS M-4008-048-002-ST4) HF hlavy čtení/zápis 13,56 MHz*. Online. BALLUFF. Homepage Balluff. C2025. Dostupné z: <https://www.balluff.com/cs-cz/products/BIS017A>. [cit. 2025-02-24].
- [142] ALUTEC KK. *Dopravník DP55-2000x345mm: rev1*. Neveřejná PDF výkresová dokumentace. 2022. [cit. 2025-02-19].

- [143] AMMERAAL BELTECH. *TT S04.12 C*. Online. AMMERAAL BELTECH. Ammeraal Beltech. 2022. Dostupné z: <https://www.ammeraalbeltech.com/contentassets/db3d964be9e4473ba5b245352e18e6a5/datasheet/datasheet-fbtt054751-en-us.pdf/download>. [cit. 2025-02-19].
- [144] BONFIGLIOLI. *BN 63B 4 230/400-50 IP55 CLF B14 CUS - Motori asincroni*. Online. BONFIGLIOLI. Bonfiglioli Shop US. 2022. Dostupné z: <https://shop.bonfiglioli.com/store/bonfigliolib2c/en/product/8D10020404>. [cit. 2025-02-19].
- [145] BONFIGLIOLI. *VF 30 F1 40 P63 B14 B3 - Right Angle Gearboxes - Gear Units*. Online. BONFIGLIOLI. Bonfiglioli Shop US. 2022. Dostupné z: <https://shop.bonfiglioli.com/store/bonfigliolib2c/en/product/000000000200350189>. [cit. 2025-02-19].
- [146] FESTO. *Ložiskové těleso LBG-63Festo CZ*. Online. FESTO. Automatizační technologie a technické vzdělání Festo CZ. 2015, 2024. Dostupné z: <https://www.festo.com/cz/cs/a/31764/>. [cit. 2025-02-19].
- [147] OMRON. *MobilePlanner Tablet Mobile Robot Management Software*. Online. OMRON. Omron Automation - Omron. 2019. Dostupné z: <https://automation.omron.com/en/us/products/family/mobile%20planner>. [cit. 2025-02-26].
- [148] ČSN EN ISO 3691-4:2024. *Motorové manipulační vozíky - Bezpečnostní požadavky a ověřování - Část 4: Vozíky bez řidiče a jejich systémy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 01/2024. 94 s. Třídící znak: 26 8812.
- [149] OMRON. *OMRON Autonomní mobilní robot*. Online. 2020. Dostupné z: <https://industrial.omron.cz/cs/products/autonomous-mobile-robot>. [cit. 2024-11-19].
- [150] OMRON ADEPT TECHNOLOGIES, INC. *Fleet Operations Workspace Core*. Neveřejný PDF dokument. I635-E-05. United States of America: Omron Adept Technologies, c2021. [cit. 2025-03-04].
- [151] ČURDA, Jakub. *Bezpečnostní analýza rizik k diplomové práci: Semestrální projekt GMR*. PDF. V13. Vysoké učení technické v Brně, 2024. [cit. 2025-03-11].
- [152] *Dokumenty společnosti SICK týkající se SCRAM metody: poskytnuty na školení pro bezpečnost práce s roboty*. Prezentace Powerpoint. 2024.
- [153] HOSOGAYA, Hirotaka; INAGAKI, Shinkichi; MURATA, Yuki a SUZUKI, Tatsuya. *Gait Transition to Spinning Gait and Fewer-Legged Walking for Hexapod Robot Based on FCP Gait Control*. Online. *IFAC-PapersOnLine*. 2023, roč. 56, č. 2, s. 2146-2151. ISSN 24058963. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1119>. [cit. 2024-10-12].
- [154] WEVOLVER. *Big Dog Boston Dynamics*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/specs/big.dog>. [cit. 2024-10-12].
- [155] BOSTON DYNAMICS. *Atlas® and beyond: the world's most dynamic robots*. Online. 2024. Dostupné z: <https://bostondynamics.com/atlas/>. [cit. 2024-10-12].

- [156] MICH. *Omnidirectional Industrial Car Caster Wheel*. Online. 2022. Dostupné z: <https://roboc2021.en.made-in-china.com/product/KOiTueXUrgWS/China-Omnidirectional-Industrial-Car-Caster-Wheel.html>. [cit. 2024-09-24].
- [157] EUROPEAN SPACE AGENCY. *Nanokhod*. Online. 2002. Dostupné z: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Automation_and_Robotics/Nanokhod. [cit. 2024-10-12].
- [158] TADAKUMA, Kenjiro; TADAKUMA, Riichiro; MARUYAMA, Akira; ROHMER, Eric; NAGATANI, Keiji et al. Mechanical design of the Wheel-Leg hybrid mobile robot to realize a large wheel diameter. Online. *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2010, s. 3358-3365. ISBN 978-1-4244-6674-0. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IROS.2010.5651912>. [cit. 2024-10-12].
- [159] MDPI. *Talbot*. Online. 2022. Dostupné z: https://www.mdpi.com/sensors/sensors-22-01470/article_deploy/html/images/sensors-22-01470-g001.png. [cit. 2024-09-25].
- [160] . Online. J. Kim, Y. -G. Kim, J. -H. Kwak, D. -H. Hong and J. An, "Wheel & Track hybrid robot platform for optimal navigation in an urban environment," *Proceedings of SICE Annual Conference 2010, Taipei, Taiwan, 2010*, pp. 881-884. [cit. 2024-10-12].
- [161] MICHAUD, Francois; L'TOURNEAU, Dominic; ARSENAULT, Martin; BERGERON, Yann; CADRIN, Richard et al. Multi-Modal Locomotion Robotic Platform Using Leg-Track-Wheel Articulations. Online. *Autonomous Robots*. 2005, roč. 18, č. 2, s. 137-156. ISSN 0929-5593. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10514-005-0722-1>. [cit. 2024-10-12].
- [162] CAPRARI, G.; ESTIER, T. a SIEGEWART, R. Fascination of Down Scaling - Alice the Sugar Cube Robot. Online. Dostupné z: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010107463>. [cit. 2024-11-04].
- [163] NORD MODULES. *OMRON HD EU Pallet Lift for the OMRON HD 1500*. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.nord-modules.com/product/pl-eu-omron-hd/>. [cit. 2024-11-19].

12.2 Seznam tabulek

Tab. 1 Základní typy pohybů v přírodních systémech	str. 19
Tab. 2 Rozložení kol na podvozku	str. 24
Tab. 3 Klasifikace a popis senzorů užívaných v mobilní robotice	str. 32
Tab. 4 Kritéria posuzovaná v multikriteriální analýze	str. 81
Tab. 5 Tabulka s jednotlivými výpočty hodnocení multikriteriální analýzy	str. 81
Tab. 6 Finální hodnocení vyplývající z multikriteriální analýzy	str. 83
Tab. 7 Evaluace projektu	str. 119
Tab. 8 Přehled časových investic projektu	str. 120

12.3 Seznam obrázků

Obr. 1 Mobilní roboty OMRON LD-90	str. 17
Obr. 2 Porovnání výkonu a dosažitelné rychlosti různých mechanismů	str. 20
Obr. 3 Kategorie pozemních mobilních robotů	str. 20
Obr. 4 Konstrukce šestinohého robotu Hexapod	str. 21
Obr. 5 Čtyřnohý robot BigDog	str. 21
Obr. 6 Robot Atlas	str. 21
Obr. 7 Příklady noh s třemi stupni volnosti	str. 22
Obr. 8 Čtveřice základních konstrukčních typů kol	str. 23
Obr. 9 Pásový robot Nanokhod od ESA	str. 27
Obr. 10 Kolo-nohová konstrukce robotu	str. 27
Obr. 11 Porovnání lokomočních ústrojí využívaných v mobilní robotice	str. 28
Obr. 12 Hybridní noho-pásový robot	str. 29
Obr. 13 Kolo-pásový hybridní robot	str. 29
Obr. 14 AZIMUT univerzální hybridní robot	str. 29
Obr. 15 Referenční schéma řídicího systému mobilních robotů	str. 30
Obr. 16 Vizuální reprezentace rozdílu mezi rozlišením, přesností a správností	str. 34
Obr. 17 Lokalizační smyčka při použití statické (neproměnné) mapy	str. 35
Obr. 18 Lokalizační smyčka při použití dynamické (proměnné) mapy	str. 37
Obr. 19 Graf viditelnosti	str. 38
Obr. 20 Voronoiho diagram	str. 39
Obr. 21 Metoda rozkladu do buněk	str. 40
Obr. 22 Ukázky algoritmu Bug1 (a) a Bug2 (b)	str. 41
Obr. 23 Metoda histogramu vektorového pole	str. 42
Obr. 24 Metoda bublinového pásu	str. 44
Obr. 25 Pad ABB AMR P604	str. 48
Obr. 26 Tahač ABB AMR T901	str. 48
Obr. 27 Paletový vozík ABB AMR F702	str. 48
Obr. 28 Active Shuttle společnosti Bosch Rexroth	str. 50
Obr. 29 1500UDS od společnosti CEIT	str. 50
Obr. 30 Platforma 2000AF-BD společnosti CEIT	str. 51

Obr. 31 Tahač 3000A společnosti CEIT	str. 51
Obr. 32 Platforma X MOVE 600 společnosti ek robotics	str. 52
Obr. 33 AGV skladovací plošina BHL MOVE od ek robotics	str. 52
Obr. 34 Platforma VARIO MOVE společnosti ek robotics	str. 53
Obr. 35 Platforma HEAVY MOVE 02 společnosti ek robotics	str. 53
Obr. 36 Provedení pad InraBot Flat společnosti Etisof	str. 54
Obr. 37 IntraBot Fork společnosti Etisof	str. 54
Obr. 38 INDEVA Tunnel AGV	str. 56
Obr. 39 arculee S od Jungheinrichu	str. 56
Obr. 40 Mobilní robot K03 s otočným stolem, firma Kivnon	str. 56
Obr. 41 Mobilní robot K11 „myš“, firma Kivnon	str. 56
Obr. 42 Nový KMP 1500P, firma KUKA	str. 57
Obr. 43 Vozík iiwa s manipulační rukou, firma KUKA	str. 57
Obr. 44 Platforma omniMove, firma KUKA	str. 57
Obr. 45 AMR společnosti Linde: C-MATIC HP 10	str. 59
Obr. 46 Robot MiR250 od Mobile Industrial Robots	str. 59
Obr. 47 LD-60 ve verzi ESD společnosti OMRON	str. 59
Obr. 48 LD-250 společnosti OMRON	str. 59
Obr. 49 OMRON HD-1500 s nástavbou od Nord Modules	str. 60
Obr. 50 Nový vozík OL-450S společnosti OMRON (původně Lowpad)	str. 60
Obr. 51 Logistický asistent pro montážní aplikace a propojení procesů společnosti SEW	str. 62
Obr. 52 AGV WEASEL společnosti SSI Schaefer	str. 62
Obr. 53 Mobilní manipulátor (MoMa) MRS90 společnosti Stäubli	str. 63
Obr. 54 Nadcházející vysokozdvizný autonomní vozík FL1500 společnosti Stäubli	str. 63
Obr. 55 AMR od společnosti STILL: ACH 06	str. 63
Obr. 56 AXH iGo z katalogu STILL	str. 63
Obr. 57 Fotografie současného konstrukčního provedení dopravníku na hlavní hale	str. 64
Obr. 58 Fotografie současného konstrukčního provedení dopravníku na stanici kvality	str. 65

Obr. 59 Fotografie současného konstrukčního provedení vozíku LD-90	str. 66
Obr. 60 Současná mapa z programu MobilePlanner	str. 67
Obr. 61 Systémový rozbor – proces návrhu	str. 70
Obr. 62 Systémový rozbor - logika řízení	str. 71
Obr. 63 Systémový rozbor – logický systém	str. 71
Obr. 64 Systémový rozbor – systém vozíku	str. 72
Obr. 65 Systémový rozbor – systém periferních zařízení	str. 72
Obr. 66 Koncepční návrh varianty se dvěma lineárními osami	str. 74
Obr. 67 Koncepční návrh varianty se čtyřmi lineárními osami	str. 76
Obr. 68 Koncepční návrh varianty provedení s kuličkovým šroubem a maticí	str. 77
Obr. 69 Koncepční návrh varianty se dvěma dopravníky	str. 78
Obr. 70 Koncepční návrh varianty Pick&Drop	str. 79
Obr. 71 Koncepční návrh varianty se stojany Pick&Drop	str. 81
Obr. 72 Vozík OMRON LD-90 s navrženou nástavbou	str. 85
Obr. 73 Nosné desky	str. 86
Obr. 74 Spojovací kostky	str. 87
Obr. 75 Krytování motorového prostoru	str. 89
Obr. 76 Univerzální nosná deska a nosná konstrukce	str. 90
Obr. 77 Sestava pro napínání řemenu a sestava motoru a polohovadla	str. 91
Obr. 78 Sestava dopravníku a posuvová sestava	str. 92
Obr. 79 Sestava stacionárního dopravníku a nosná konstrukce	str. 95
Obr. 80 Sestava horního dopravníku, přepravní bedna a sestava separátoru	str. 98
Obr. 81 Možnosti připojení, vytvořeno v programu Mobile Planner	str. 99
Obr. 82 Skenování mapy, vytvořeno v programu Mobile Planner	str. 100
Obr. 83 Holá mapa s detaily, vytvořeno v programu Mobile Planner	str. 102
Obr. 84 Výřez z kompletní mapy s detaily, vytvořeno v programu Mobile Planner	str. 104
Obr. 85 Výřez z kompletní mapy s naznačením trasy a detaily, vytvořeno v programu Mobile Planner	str. 111
Obr. 86 Provoz AMR v aplikaci Mobile Planner	str. 112
Obr. 87 Lokalizační skóre při průjezdu halou, vytvořeno v programu Matlab	str. 114
Obr. 88 Síla Wi-Fi signálu při průjezdu halou	str. 115

Obr. 89 Zábrany LiDARu	str. 115
Obr. 90 Ganttův diagram časového harmonogramu projektu	str. 120
Obr. 91 Blokový diagram systému vozíku	str. 121
Obr. 92 Hodnocení rizika podle metody SCRAM	str. 122
Obr. 93 Výňatek z přehledu identifikovaných nebezpečí	str. 122
Obr. 94 Výňatek z analýzy významných nebezpečí během životního cyklu	str. 122
Obr. 95 Formulář pro proces snižování rizika	str. 123
Obr. 96 LiDAR jednotka se zvýrazněným poškozením	str. 126
Obr. 97 Poškozené kolečko (nepoháněné)	str. 126

13 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Neznámá	Rozměr	Význam
x	[-]	senzorem měřený podnět
y	[-]	odpověď na senzorem měřený podnět
z_{min}	[-]	nejmenší hodnota signálu, kterou je senzor schopný zachytit
z_{max}	[-]	největší hodnota signálu, kterou je senzor schopný zachytit
v	[-]	odezva senzoru
T_1	[-]	jednoduchost montáže
T_2	[-]	funkčnost a univerzálnost
T_3	[-]	spolehlivost
T_4	[-]	inovativnost
T_5	[-]	nutnost úpravy okolí
T_6	[-]	ekonomičnost
T_7	[-]	bezpečnost
t_j	[-]	třídírník multikriteriální metody
g_n	[-]	důležitostní koeficient multikriteriální metody
p_τ	[%]	hodnocený faktor
τ_n	[-]	relativní technická hodnota n-tého faktoru multikriteriální metody
τ	[-]	konečná technická hodnota multikriteriální metody

Zkratka	Původní význam	Český význam
1D	One-dimensional	Jednodimenzionální
2D	Two-dimensional	Dvoudimenzionální
3D	Three-dimensional	Třídímnízní
AGV	Autonomous Guided Vehicle	Automaticky naváděné vozidlo
AMR	Autonomous Mobile Robot	Autonomní mobilní robot
AMS	Active Shuttle Management System	Systém aktivního řízení vozíku
AP	Access Point	Přístupový bod do sítě
ATS	Automated Transportation Systems	Systémy pro automatický transport

CCD	Charge-Coupled Device	Zařízení s vázanými náboji
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor	Technologie vycházející z MOSFET tranzistorů
ČR		Česká republika
DeI	Debug Info	Ladící informace
DI	Digital Input	Digitální vstup
DQ	Digital Output	Digitální výstup
EC		Exteroceptivní
ESD	Electro-Static Discharge	Elektrostatický výboj
E-Stop	Emergency Stop	Vypínač pro nouzové zastavení
EUR1	EUR-pallet type 1	Standardizovaná europaleta o rozměrech 800 x 1200 mm
EUR3	EUR-pallet type 3	Standardizovaná europaleta o rozměrech 1000 x 1200 mm
FLOW	Fleet Operations Workspace	Systém a protokoly pro nastavení, integraci a správu flotil autonomních mobilních robotů OMRON
GLT	Großladungsträger	Velké nosiče nákladu (bedny)
GPS	Global Positioning System	Satelitní navigační systém
HMI	Human Machine Interface	Rozhraní mezi člověkem a strojem
IP	Internet Protocol	Jedinečná adresa (identifikátor), který je přidělen každému zařízení připojenému k dané internetové síti
ISO	International Organization for Standardization	Mezinárodní organizace pro normalizaci
KLT	Kleinladungsträger	Specializované plastové přepravky vyvinuté pro automobilový průmysl, výrobu a logistiku
LED	Light-Emitting Diode	Světlo vyzařující dioda
LiDAR	Light Detection and Ranging	Laserový dálkoměr
MES	Manufacturing Execution System	Výrobní informační systémy
MoMA	Mobile Manipulator	Mobilní manipulátor
OEM	Original Equipment Manufacturer	Výrobce zařízení, prodávající výrobek nabízen jinou, původní, obchodní značkou.

PC		Proprioceptivní
PLC	Programmable Logic Controller	Programovatelný logický automat
QR (code)	Quick Response (code)	Maticový 2D kód pro vysokorychlostní čtení
RA	Risk Assesment	Bezpečnostní analýza rizik
RTLS (system)	Real-Time Locating Systems	Systém pro lokalizaci v reálném čase
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	Simultánní lokalizace a mapování
SR		Slovenská republika
TMS	Tether Management System	Automatickým systémem správy kabelu
VDC	Volts Direct Current	Voltů jednosměrného napětí
VSLAM	Visual Simultaneous Localization and Mapping	Vizuální simultánní lokalizace a mapování

14 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Příklady konstrukčního provedení mobilních robotů
Příloha 2	Bezpečnostní analýza rizik
Příloha 3	Systémový rozbor
Příloha 4	Příručka operátora
Příloha 5	Statické zatížení nosné desky vozíku
Příloha 6	Přehled iterací návrhu nástavby
Příloha 7	Konstrukční nedostatky zjištěné prakticky
Příloha 8	Výkresová dokumentace a model
Příloha 9	Měření lokalizačního skóre a Wi-Fi signálu
Příloha 10	MobilePlanner a mapové podklady
Příloha 11	Dodatečné vizuální podklady
Příloha 12	Vizitka THK