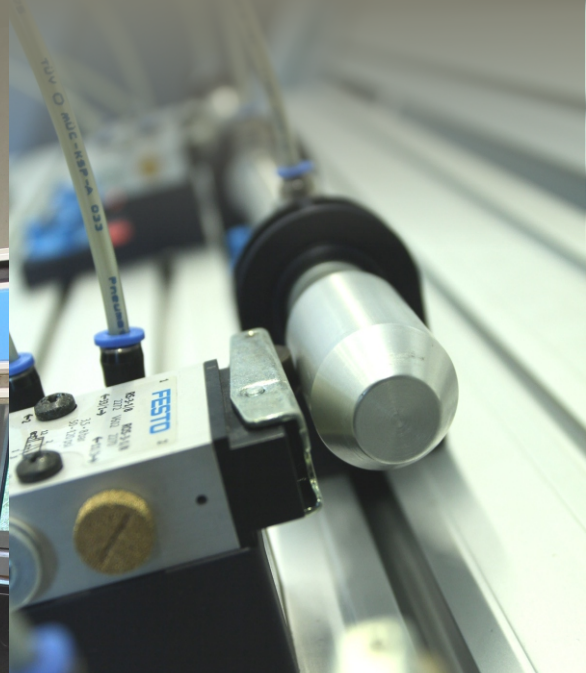
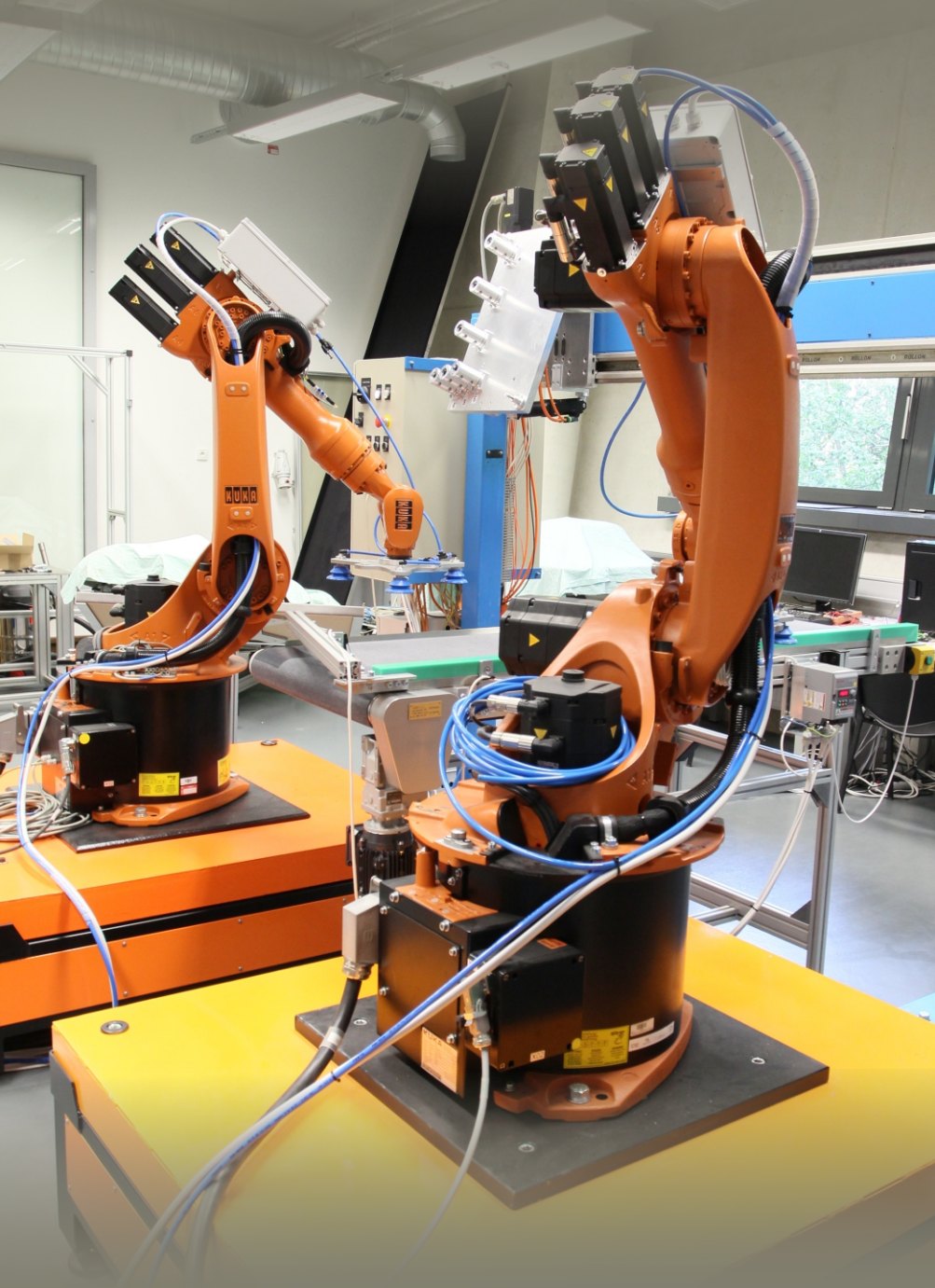


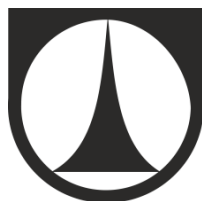
# ÚVOD DO AUTOMATIZACE A ROBOTIZACE VE STROJÍRENSTVÍ

FRANTIŠEK NOVOTNÝ, VLASTIMIL HOTAŘ,  
MARCEL HORÁK, MARIE STARÁ, MICHAL STARÝ



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
2020

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**  
**FAKULTA STROJNÍ**  
**KATEDRA SKLÁŘSKÝCH STROJŮ A ROBOTIKY**



**ÚVOD DO AUTOMATIZACE A ROBOTIZACE  
VE STROJÍRENSTVÍ**

Doc. Ing. František Novotný, CSc.,

Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D.,

Ing. Marcel Horák, Ph.D.,

Ing. Marie Stará, Ph.D.,

Ing. Michal Starý, Ph.D.

2020

Vydala Technická univerzita v Liberci v roce 2020  
ISBN 978-80-7494-545-8

## ÚVOD DO AUTOMATIZACE A ROBOTIZACE VE STROJÍRENSTVÍ

Výukový text vznikl na základě zkušeností z výuky odborných předmětů na katedře sklářských strojů a robotiky. Skripta představují úvod do poměrně široké problematiky a je možné je chápat jako vhodný podklad pro znalosti, které budou studenty rozvíjeny v dalších letech. Text se opírá o současné poznatky z oboru a zmiňuje trendy v automatizaci a robotice.

Skripta jsou určena pro studenty Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci i pro širokou odbornou veřejnost. Jsou doplňkovým studijním materiálem pro předměty bakalářského i navazujícího studijního programu. Skripta nalezou uplatnění během studia předmětu Automatizace a robotizace ve strojírenství pro studenty 1. ročníku bakalářského studijního programu B0715A270008 Strojírenství na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci.

© doc. Ing. František Novotný, CSc., Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D., Ing. Marcel Horák, Ph.D., Ing. Marie Stará, Ph.D., Ing. Michal Starý, Ph.D.

Recenzent	Doc. Ing. Radovan Holubek, Ph.D.
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci Studentská 1402/2, Liberec
Schváleno	Rektorátem TUL dne 26. 11. 2020, čj. RE 38/20
Vyšlo	V prosinci 2020
Počet stran	215
Vydání	1.
Rok prvního vydání	2020
ISBN	978-80-7494-545-8
Č. publikace	55-038-20

## Obsah

<b>Seznam použitých zkratk</b> .....	<b>6</b>
<b>Poděkování</b> .....	<b>10</b>
<b>Předmluva</b> .....	<b>11</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>12</b>
<b>1 Trendy automatizace strojírenské výroby</b> .....	<b>14</b>
1.1 FLEXIBILNÍ A ADAPTIVNÍ VÝROBNÍ ZAŘÍZENÍ.....	14
1.2 SNADNÉ NASTAVENÍ STROJŮ A ZAŘÍZENÍ .....	15
1.3 KOLABORATIVNÍ ROBOTIKA .....	15
1.4 ADITIVNÍ TECHNOLOGIE .....	15
1.5 POKROČILÁ SENZORIKA, ZPRACOVÁNÍ A INTERPRETACE DAT .....	16
1.6 INFRASTRUKTURA PRO UKLÁDÁNÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT.....	17
1.7 PRŮMYSLVÝ INTERNET VĚCÍ .....	17
1.8 PROPOJENÍ REÁLNÉHO A VIRTUÁLNÍHO SVĚTA.....	19
1.9 MASS CUSTOMIZATION.....	19
1.10 UMĚLÁ INTELIGENCE.....	20
<b>2 Roboty – rozdělení a trendy</b> .....	<b>21</b>
<b>3 Průmyslové roboty a manipulátory</b> .....	<b>24</b>
3.1 KINEMATICKÁ STRUKTURA MECHANISMŮ PR A MANIPULÁTORŮ.....	24
3.1.1 Členění kinematického řetězce .....	26
3.1.2 Kinematické (strukturální) uspořádání PR a manipulátorů.....	28
3.1.3 Manipulační prostor a manipulační možnosti .....	44
3.1.4 Požadovaná přesnost polohování .....	47
3.1.5 Orientace objektu .....	47
3.2 PŘEHLED PNEUMATICKÝCH POHONŮ PRO AUTOMATIZAČNÍ TECHNIKU .....	50
3.2.1 Přehled základních pneumatických značek.....	51
3.2.2 Členění pneumatického obvodu.....	55
3.2.3 Základní přehled pneumotorů.....	57
3.2.4 Rozvaděče a ventily.....	61
3.2.5 Základní logické funkce pro řízení pneumatických obvodů.....	64
3.2.6 Postup úpravy a užití tlakového vzduchu.....	65
3.2.7 Základní schémata zapojení.....	66
3.2.8 Pneumatické obvody.....	69
3.2.9 Hledání chyb v pneumatických obvodech .....	79
3.3 ELEKTRICKÉ POHONY STROJŮ A ZAŘÍZENÍ.....	80
3.3.1 Elektropohony s asynchronními motory .....	80
3.3.2 Elektropohony s DC motory .....	84
3.3.3 Elektropohony s bezkartáčovými motory.....	90
3.3.4 Elektropohony s krokovými motory .....	95
3.3.5 Lineární elektromotory v pohonech PR .....	99
<b>4 Efektory a periferní zařízení robotů</b> .....	<b>106</b>
4.1 TECHNOLOGICKÉ HLAVICE.....	109
4.1.1 Svařovací technologické hlavice.....	109
4.1.2 Stříkací (lakovací) technologické hlavice.....	112
4.1.3 Technologické hlavice pro obrábění materiálu .....	113
4.2 KOMBINOVANÉ HLAVICE .....	115

4.3	KONTROLNÍ HLAVICE .....	116
4.4	SPECIÁLNÍ HLAVICE .....	117
4.5	ÚCHOPNÉ HLAVICE .....	117
4.5.1	<i>Pasivní úchopné hlavice PR</i> .....	121
4.5.2	<i>Aktivní mechanické úchopné hlavice – chapadla</i> .....	124
4.5.3	<i>Aktivní podtlakové úchopné hlavice</i> .....	132
<b>5</b>	<b>Přehled, principy a úloha senzorů v robotice a automatických linkách</b> .....	<b>142</b>
5.1	FUNKCE A CHARAKTERISTIKY SENZORŮ .....	144
5.2	SENZORY POLOHY A POSUNUTÍ .....	146
5.2.1	<i>Senzory pro spojité snímání polohy pro servomotory</i> .....	146
5.2.2	<i>Kontaktní mechanické senzory</i> .....	148
5.2.3	<i>Indukční senzory</i> .....	148
5.2.4	<i>Kapacitní senzory</i> .....	149
5.2.5	<i>Magnetické senzory</i> .....	150
5.2.6	<i>Odporové senzory</i> .....	151
5.2.7	<i>Resolvery</i> .....	151
5.2.8	<i>Induktosyny</i> .....	152
5.2.9	<i>Lankové senzory</i> .....	153
5.2.10	<i>Ultrazvukové senzory</i> .....	154
5.2.11	<i>Tekutinové senzory</i> .....	155
5.2.12	<i>Optické senzory</i> .....	155
5.2.13	<i>Senzory náklonu</i> .....	163
5.3	SENZORY OTÁČEK .....	163
5.3.1	<i>Tachometrické dynamo a tacholternátor</i> .....	163
5.3.2	<i>Impulzní senzory otáček</i> .....	163
5.4	SENZORY TLAKU A SÍLY .....	164
5.5	SENZORY TEPLoty .....	164
5.5.1	<i>Kontaktní senzory teploty</i> .....	165
5.5.2	<i>Bezkontaktní senzory teploty</i> .....	167
5.6	DALŠÍ SENZORIKA .....	169
5.7	SENZORIKA PRO VIZUALIZACI TECHNOLOGICKÉ SCÉNY .....	171
5.7.1	<i>3D kamery</i> .....	182
5.8	ZÁKLADNÍ PRINCIPY STROJOVÉHO VIDĚNÍ, ROBOT VISION, BIN PICKING.....	185
<b>6</b>	<b>Aplikační oblasti průmyslových robotů</b> .....	<b>189</b>
6.1	ROBOTIZOVANÁ MANIPULACE U OBRÁBĚCÍCH STROJŮ .....	190
6.2	ROBOTIZOVANÉ VÝROBNÍ SYSTÉMY PRO OBLAST TVÁŘENÍ .....	191
6.3	ROBOTIZACE OBLOUKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ .....	193
6.4	ROBOTIZACE BODOVÉHO SVAŘOVÁNÍ .....	194
6.5	ROBOTIZACE PRO POVRCHOVÉ ÚPRAVY .....	196
6.6	ROBOTIZOVANÉ VÝROBNÍ SYSTÉMY V MONTÁŽI .....	197
<b>7</b>	<b>Přehled a charakteristika mobilních a servisních robotů</b> .....	<b>199</b>
7.1	TRENDY VÝVOJE A APLIKAČNÍ OBLASTI NASAZENÍ SERVISNÍCH ROBOTŮ .....	200
<b>8</b>	<b>Závěr</b> .....	<b>208</b>
<b>9</b>	<b>Literatura</b> .....	<b>209</b>

## Seznam použitých zkratk

AGV	Automated Guided Vehicle (automaticky řízené vozíky)
AMR	Autonomous Mobile Robots (autonomní mobilní roboty)
AND	Logická funkce „A“ (konjunkce)
APÚH	Aktivní podtlaková úchopná hlavice
BLDC motor	BrushLess DC motor (bezkartáčový stejnosměrný motor, stejné označení jako EC motor)
CCD	Charge Coupled Device (obrazový senzor s technologií CCD)
CJP	Color Jet Printing (technologie plnobarevného 3D tisku)
CMOS APS	Complementary Metal Oxide Semiconductor Active Pixel Sensor (obrazový senzor s technologií CMOS)
CNC	Computer Numerical Control (počítačem řízený stroj)
CVS	Compact Vision System (kompaktní a odolný systém pro zpracování obrazu)
DC	Stejnoseměrný proud (DC motor – motor na stejnosměrný proud)
DLP	Digital Light Processing (3D tisk vytvrzováním tekutého materiálu pomocí projektoru)
DMP	Direct Metal Printing (3D tisk z kovů ve formě prášku)
DOF	Degree of Freedom (stupeň volnosti)
EC motor	Electronically Commutated motor (elektronicky komutovaný motor, stejné označení jako BLDC)
FDM	Fused Deposition Modeling (3D tisk pomocí tavené struny, podobně jako FFF a PJP)
FFF	Fused Filament Fabrication (3D tisk pomocí tavené struny, podobně jako FDM a PJP)
FMS	Flexible Manufacturing System (flexibilní výrobní systémy)
FPM	Pryž (obchodní název VITON)
fps	Frame per second (počet snímků za sekundu)
GPS	Global Positioning System (globální polohový systém)
HRC	Human Robot Collaboration (spolupráce člověk-robot)
IFR	International Federation of Robotics (Mezinárodní robotická federace)
IMU	Inerciální měřicí jednotka
IR záření	Infrared (infračervené) záření
KM	Krokový motor
$L_i$	Halova sonda $i$ (1, 2, ...)
LIM	Lineární indukční (asynchronní) elektromotor
LEM	Lineární elektromotory
LOM	Laminated Object Manufacturing (3D tisk na principu oddělování materiálu v každé vrstvě)
IoT	Internet of Things (Internet věcí)
MAG	Metal Active Gas (svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu)
MIG	Metal Inert Gas (svařování v ochranné atmosféře inertního plynu)
MÚH	Mechanická úchopná hlavice
NBR	Materiál perbunan
NIR	Blízké infračervené elektromagnetické záření (750 až 1 000 nm)
NON	Logická funkce „NE“ (negace)

NTC	Negative Temperature Coefficient (negastor, typ termistoru s negativní závislostí odporu na teplotě)
NUV	Blízké ultrafialové elektromagnetické záření (300 až 390 nm)
OR	Logická funkce „NEBO“ (disjunkce)
PJP	Plastic Jet Printing (3D tisk pomocí tavené struny, podobně jako FFF a FDM)
PM	Pneumotor
PLC	Programmable Logic Controller (programovatelný logický automat)
PR	Průmyslový robot
PTC	Positive Temperature Coefficient (pozistor, typ termistoru s pozitivní závislostí odporu na teplotě)
PTP	Point To Point (sekvenční řízení)
PUR	Materiál polyuretan
PWM	Pulse Width Modulation (pulsně šířková modulace)
R	Rotační jednotka
RGB	Barevný model (Red, Green, Blue)
ROI	Region of Interest (oblast zájmu)
RRR	Rotace Rotace Rotace (Angulární struktura polohovacího ústrojí PR)
RRT	Rotace Rotace Translace (Sférická struktura polohovacího ústrojí PR)
RTP	Robotizované technologické pracoviště
ŘS	Řídicí systém
SCARA	Compliance Assembly Robot Arm (selektivní kompatibilní kloubové robotické rameno)
SLA	Stereolithography Apparatus (3D tisk vytvrzováním tekutého materiálu pomocí laserového paprsku)
SLM	Selective Laser Melting (3D tisk z materiálu ve formě prášku pomocí tavení laserem)
SLS	Selective Laser Sintering (3D tisk z materiálu ve formě prášku pomocí sintrování laserem)
SR	Servisní robot
T	Translační jednotka
T <sub>i</sub>	Tranzistor i (1, 2, ...)
TB	Transformační blok
TIG	Tungsten Inert Gas (svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu pomocí netavící se elektrody)
ToF	Time of Flight (měření vzdálenosti na základě doby letu světla nebo zvuku)
TRT	Translace Rotace Translace (válcová struktura polohovacího ústrojí PR nebo RTT)
TTT	Translace Translace Translace (kartézská struktura polohovacího ústrojí PR)
ÚH	Úchopná hlavice
ÚP	Úchopné prvky
UV záření	Ultraviolet (ultrafialové) záření
VIS	Viditelné záření (390 až 750 nm)



## Seznam použitých symbolů

A	[m <sup>2</sup> ]	Plocha smyčky
a	[m.s <sup>-2</sup> ]	Zrychlení
B	[kg.s <sup>-2</sup> .A <sup>-1</sup> ]	Magnetická indukce (statoru B <sub>s</sub> , rotoru B <sub>R</sub> )
b <sub>t</sub>	[mm]	Triangulační báze u triangulace
b <sub>v</sub>	[pixel]	Vzdálenost projekce bodu na snímku
b <sub>v mm</sub>	[mm]	Vzdálenost projekce bodu na čipu
C	[mm]	Průměr otvoru clony
c	[m.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost světla
D	[mm]	Průměr
d	[m]	Vzdálenost vinutí cívek
d <sub>j</sub>	[-]	Počet kinematických dvojic j-té třídy
d <sub>w</sub>	[mm]	Účinný průměr přísavky
F	[N]	Síla (úchopná F <sub>u</sub> , axiální F <sub>ax</sub> , radiální F <sub>rad</sub> )
F <sub>n</sub>	[N]	Síla odpovídající jmenovitému napětí U <sub>n</sub>
F <sub>a</sub>	[N]	Hnací síla odpovídající napětí U (maximální hnací síla F <sub>amax</sub> )
f	[Hz]	Frekvence
f <sub>oh</sub>	[mm]	Ohnisková vzdálenost
g	[m.s <sup>-2</sup> ]	Gravitační zrychlení
I	[A]	Elektrický proud
i	[-]	Počet stupňů volnosti
j	[-]	Třída kinematické dvojice
J	[kg.m <sup>2</sup> ]	Moment setrvačnosti vnější zátěže
K	[-]	Koeficient obslužnosti
k	[-]	Koeficient bezpečnosti
L <sub>v</sub>	[m]	Délka vodiče
L <sub>WD</sub>	[mm]	Pracovní vzdálenost kamery
l	[m]	Vzdálenost
l <sub>z</sub>	[mm]	Měřená vzdálenost bodu na povrchu objektu v ose z
M	[Nm]	Moment (sedlový M <sub>s</sub> , záběhový M <sub>z</sub> , zvratu M <sub>zvr</sub> , na hřídeli rotoru M <sub>k</sub> )
m	[kg]	Hmotnost
m <sub>n</sub> <sup>3</sup>	[m <sup>3</sup> ]	Normální metr krychlový (při tlaku p=101,325 kPa a teplotě t=0° C)
m <sub>f</sub>	[-]	Počet fází
μ	[-]	Koeficient tření
N	[N]	Normálová síla
N <sub>c</sub>	[-]	Clonové číslo
n	[-]	Počet členů včetně rámu
n <sub>s</sub>	[ot.min <sup>-1</sup> ]	Synchronní otáčky
n <sub>N</sub>	[ot.min <sup>-1</sup> ]	Jmenovité otáčky
n <sub>s mm</sub>	[mm]	Velikost snímače
p	[Pa]	Tlak (atmosférický tlak p <sub>a</sub> , přetlak Δp, podtlak Δp <sub>u</sub> )
p <sub>d</sub>	[-]	Počet pólových dvojic
p <sub>z</sub>	[-]	Zubová rozteč

R	[m]	Poloměr
$R_0$	[ $\Omega$ ]	Elektrický odpor
$\Delta R$	[ $\Omega$ ]	Změna elektrického odporu
S	[-]	Označení koncového bodu
$S_p$	[m <sup>2</sup> ]	Plocha
$S_T$	[-]	Poloha těžiště
$S_w$	[m <sup>2</sup> ]	Účinná plocha přísavky
s	[-]	Skluz (skluz zvratu $S_{zvr}$ )
$s_K$	[-]	Počet kroků
tp	[s]	Doba letu letu paprsku elektromagnetického záření
T	[N]	Třecí síla
$T_0$	[°C]	Teplota referenčního spoje
$T_m$	[°C]	Teplota měřeného spoje
$\Delta T$	[°C]	Přírůstek teploty
t	[s]	Čas
U	[V]	Elektrické napětí (jmenovité napětí $U_n$ )
v	[m/s]	Rychlost (synchronní rychlost $v_s$ )
V	[m <sup>3</sup> ]	Objem (objem pod přísavkou po stlačení $V_0$ , objem pod přísavkou při manipulaci $V_1$ )
$v_{s\text{ mm}}$	[mm]	Šířka snímače v mm
$v_{s\text{ pixel}}$	[pixel]	Šířka čipu v pixelech
W	[m]	Šířka smyčky
x	[mm]	Souřadnice osy x
$x_s$	[mm]	Oblast zájmu v ose x
y	[mm]	Souřadnice osy y
z	[mm]	Souřadnice osy z
$\alpha$	[°]	Úhel natočení
$\alpha_{A,B}$	[-]	Seebeckovy koeficienty pro materiál A a B
$\alpha_R$	[K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel odporu
$\alpha_t$	[°]	Úhel zdroje paprsku svíraný s triangulační bází
$\beta_t$	[°]	Úhel odraženého paprsku svíraný s triangulační bází
$\gamma$	[°]	Vzájemný úhel obou vektorů
$\Delta_c$	[-]	Celková odchylka
$\theta$	[°]	Úhel obslužnosti
$\theta_t$	[°]	Úhel normály snímače
$\kappa$	[-]	Rozdělení kroku na díly
$\lambda$	[-]	Jednotkový krok
$\mu$	[-]	Součinitel tření
$\varphi$	[°]	Úhel natočení objektu
$\varphi_{1,2}$	[-]	Velikost kroku

## Poděkování

Na tomto místě by chtěl tým autorů poděkovat za účinnou pomoc při přípravě těchto skript kolegům z katedry a fakulty, akademickým pracovníkům z dalších univerzit a odborníkům z průmyslové praxe. Jmenovitě panu kolegovi Ing. Ondřeji Matúškovi, Ph.D., také kolegyni Ing. Aleně Horákové a kolegovi doc. Ing. Vladimíru Klebsovi, CSc. za korekturu a cenné připomínky. Dále děkujeme recenzentu této práce, panu doc. Ing. Radovanu Holubkovi, Ph.D.

## Předmluva

Skripta představují přehled trendů automatizace strojírenské výroby, podrobněji jsou charakterizovány soudobé prostředky automatizace s důrazem na automatickou manipulaci a aplikaci průmyslových robotů. Studijní text objasňuje základní principy činnosti průmyslových robotů a představuje přístupy k tvorbě automatických a robotizovaných pracovišť s vyspělou sensorikou. Jsou ukázány vybrané oblasti aplikačního nasazení a inovativního potenciálu průmyslových a servisních robotů s odkazem na koncepci Průmysl 4.0.

Učební text je určen především pro předmět Automatizace a robotizace ve strojírenství pro studenty 1. ročníku bakalářského studijního programu B0715A270008 Strojírenství na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci. Skripta jsou také určena pro ostatní studenty Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci i pro širokou odbornou veřejnost. Jsou doplňkovým studijním materiálem pro předměty bakalářského i navazujícího studijního programu.

Obsah studijních textů je nejprve věnován koncepci Průmysl 4.0, dopadu nových pojmů jako je internet věcí, kolaborativní robotika, aditivní technologie, pokročilá sensorika, virtuální realita a umělá inteligence. Následuje rozsáhlá kapitola věnovaná průmyslovým robotům. Ta je rozdělena do tří částí, v první jsou vysvětleny pojmy z robotiky s důrazem na průmyslové roboty a manipulátory, ve druhé jsou popsány elektrické pohony a ve třetí jsou popsány pneumotory. Následující kapitola se věnuje základnímu rozdělení efektorů, pohonům efektorů a příkladům použití efektorů v průmyslové praxi. Kapitola o senzorech se věnuje důvodům jejich použití, jejich vlastnostem a také je zde uveden základní přehled používaných senzorů. Důraz je pak kladen na kamerové systémy. Následuje kapitola o aplikačních oblastech průmyslových robotů. Poslední kapitola je věnována přehledu a charakteristice mobilních a servisních robotů.

Při studiu se předpokládá znalost fyziky, matematiky a mechaniky na středoškolské úrovni a přehled o základech průmyslových technologií.

## Úvod

Rozsah současné automatizace v průmyslu je dán historickým kontextem, stavem poznání ve vědě a technice, ale především motivací jednotlivých firem automatizaci zavádět. Tato motivace je dána očekávanou mírou a dobou návratnosti zavedení automatizace, dostupnými lidskými a finančními zdroji, potenciální úsporou výrobních nákladů a zaměstnanců, možným rozšířením trhů vyráběného zboží a především očekávaným zvýšením zisku. To vyplývá ze snížení výrobních nákladů a (nebo) zvýšení přidané hodnoty konečného výrobku. Automatizace a robotizace je účinným nástrojem, který snižuje výrobní náklady, snižuje časovou a personální náročnost, vede k vyšší a konstantnější jakosti výrobků a také ke snižování objemu jednoduché lidské práce a vyšší poptávce po lépe vzdělaných zaměstnancích. Není ale řešením univerzálním a vždy přínosným. Hlavním omezením je vysoká míra specializace těchto zařízení, nízká flexibilita při změně sortimentu a především vysoké počáteční investice. V praxi se tak lze setkat s širokou škálou míry automatizace a stále s relativně velkým podílem ruční práce při kusové, malosériové výrobě nebo při výrobě produktu v mnoha variantách, která se, za současného stavu techniky, nevyplatí automatizovat.

V současné době jsou nepřehlédnutelné pojmy 4. průmyslová revoluce a koncepce Průmysl 4.0 [1, 2, 3].

Zastánci termínu 4. průmyslová revoluce mluví u nové techniky a nových technologií o dosažení bodu zlomu exponenciální křivky jejich praktického využití. Průmyslový internet, internet věcí, analýza velkých dat a dolování informací, pokročilá sensorika, adaptivní výroba, atd. mají dnes přecházet z počátečního lineárního náběhu, kde dosud setrvaly celou řadu let, do fáze strmého exponenciálního růstu. Řečeno slovy Raye Kurzweila, amerického vizionáře v oboru kybernetiky, technologie se dostávají na pomyslnou druhou stranu šachovnice, tj. na tu stranu, kde faktor prudkého exponenciálního růstu začíná mít vážné ekonomické dopady na celkovou strategii libovolné organizace [4]. Existují ale pro tato tvrzení jednoznačná data? Dostávají se technologie na „druhou stranu šachovnice“? Je současná doba taková, že snese srovnání s předchozími průmyslovými revolucemi? Na základě makroekonomického vývoje vyspělých a rozvíjejících se států posledních let by bylo vhodné pojem „4. průmyslová revoluce“ používat opatrně a jako název pro vizi, která může, ale nemusí vést k pokračování růstu světové ekonomiky. Tedy současné dění nemusí vést k tomu, co průmyslové revoluce z makroekonomického hlediska přináší – k dalšímu zvýšení růstu bohatství lidské společnosti.

Je nutné tedy připustit připomínky některých odborníků, že tento pojem je do jisté míry politickou nálepkou pro prosazování vizí politiků a marketingovým pojmem velkých nadnárodních firem, které se zabývají automatizací. Zájmem těchto firem je více a lépe prodávat své produkty, při možnosti dosáhnout na peníze z rozpočtů států, daňových poplatníků.

Z tohoto důvodu je vhodné nahlížet na současný stav spíše jako na evoluci, která může dosáhnout velké dynamiky v budoucích letech.

Pojem Průmysl 4.0 (*Industrie 4.0: Smart Manufacturing for the Future*) oficiálně prezentovala před německou společností kancléřka Angela Merkelová na veletrhu v Hannoveru v roce 2013. Průmysl 4.0 [1] je iniciativou na podporu 4. průmyslové revoluce. Přestože lze o pojmu 4. průmyslová revoluce polemizovat, v případě Průmyslu 4.0 se jedná o ucelenou iniciativu, která zahrnuje současné

trendy v průmyslu, společnosti a politice. Jedná se o proces digitalizace a automatizace, který probíhá a má potenciál zefektivnit průmyslovou výrobu. Tato iniciativa vcelku podrobně shrnuje současný stav průmyslu v ČR a jeho možnosti při očekávaných následujících změnách.

Česká republika má zmíněnou Iniciativu průmysl 4.0, která shrnuje základní charakteristiky inteligentních továren následovně:

- výrobní procesy jsou optimalizované v rámci celého hodnotového řetězce díky vertikálně i horizontálně integrovaným informačním systémům;
- izolované výrobní jednotky jsou nahrazeny plně automatizovanými a vzájemně propojenými výrobními linkami;
- fyzické prototypy jsou nahrazeny virtuálními návrhy výrobků, výrobních prostředků a výrobních procesů, jejich uvedení do provozu probíhá v rámci jednoho integrovaného procesu zapojujícího jak výrobce samotného, tak i jeho dodavatele;
- flexibilní výrobní procesy umožňují efektivní výrobu i malých výrobních dávek přizpůsobených individuálním požadavkům jednotlivých zákazníků;
- vzájemně komunikující roboty, výrobní zařízení a výrobky činí do jisté míry autonomní rozhodnutí v reálném čase a tím zvyšují flexibilitu a efektivitu výrobního procesu;
- výrobní zařízení se samo optimalizuje a konfiguruje v závislosti na parametrech zpracovávaného produktu;
- automatizované logistické zázemí využívající autonomních vozíků a robotů se automaticky přizpůsobuje potřebám výroby. Logistické zázemí se týká více subjektů v rámci kooperace, které nemusí být lokalizovány na jednom místě, a proto se logistický řetězec bude týkat i koordinace dopravního spojení mezi výrobními subjekty. Totéž se týká i koordinace distribučního procesu samotného výrobku.

Hlavními přínosy Iniciativy průmyslu 4.0 pro efektivnější využívání zdrojů je pak snížení energetické a surovinové náročnosti výroby, nárůst produktivity a efektivity ve výrobě, optimalizace logistických tras, technologická řešení pro decentralizované systémy výroby a distribuce energie nebo inteligentní městská infrastruktura. Jedná se o (r)evoluci, kdy nejen v průmyslu, ale i ve službách se postupně přechází od užívání izolovaných počítačů a strojů k integrovaným řešením. To se také týká celého horizontálního řetězce od dodavatelů přes výrobu až k odběratelům, ale také vertikálního vztahu od výrobních procesů směrem k managementu firmy. Je to úplná integrace za pomoci nejnovějších technologií.

Míra uplatnění Iniciativy průmyslu 4.0 v praxi bude dána především zmíněnou motivací průmyslových firem k investicím do inteligentních prvků továren. Firmy budou očekávat rychlou návratnost investice, vyřešení lidských zdrojů, snížení závislosti na lidské obsluze s ohledem na možné další pandemie, snížení nákladů, rozšíření trhu pro své produkty, nové trhy pro nové produkty a především zvýšení zisku [5].

## 1 Trendy automatizace strojírenské výroby

Základní trendy současného vývoje automatizace strojírenské výroby lze shrnout následovně:

- zvyšování flexibility a adaptivity zařízení a strojů;
- snadné nastavení a parametrizace strojů a zařízení;
- kolaborativní robotika;
- aditivní technologie (3D tisk);
- pokročilá sensorika, zpracování a interpretace dat<sup>1</sup>;
- infrastruktura pro ukládání a zpracování dat;
- průmyslový internet věcí;
- propojení reálného a virtuálního světa;
- masová výroba na zakázku (mass customization);
- využití umělé inteligence.

Jednotlivé body jsou v následujícím textu podrobněji popsány. Celá problematika se v současné době vyvíjí a ve většině případů neexistují standardy. Text vychází z článků [6, 7].

### 1.1 Flexibilní a adaptivní výrobní zařízení

Výrobní zařízení a technologie budou získávat na flexibilitě, schopnosti adaptace, sebe-nastavení a sebe-optimalizace. Adaptivní výrobní systémy dokážou lépe reagovat na dynamičnost poptávky na trhu, měnící se požadavky zákazníků, umožní minimalizaci nákladů na změnu sortimentu a budou méně citlivé na rušivé faktory okolí. Změny ve výrobě budou odrážet změnu na trhu k tzv. masové výrobě na zakázku, kap. 1.9.

Tento trend je spojen s vyššími nároky na výrobní stroje a roboty a jejich schopnost se dané změně (pokud možno bez úprav HW a SW) přizpůsobit. Nutnou podmínkou je propojení zařízení s řídicím systémem linky (nebo firmy), také mezi sebou, s dalšími logistickými, servisními, výrobními a dalšími systémy a také s produkovánými výrobky pomocí průmyslového internetu věcí kap. 1.7.

Důležitým prvkem podporujícím flexibilitu zařízení je také sensorika, která umožňuje lepší propojení s okolím (technologí, dalšími stroji, roboty a obsluhou), kap. 6.1. Vhodně implementovaná sensorika rozšiřuje možnosti zařízení bez vysokých nákladů.

Mění se i koncepce robotů, které jsou často osazeny dvěma rameny s více stupni volnosti (podobně jako člověk má dvě ruce) a kamerami, aby byly flexibilnější a mohly provádět širší okruh činností [8]. Stále více se také uplatňují nové flexibilní výrobní technologie, jako jsou aditivní technologie, například 3D tisk (kap. 1.4).

Flexibilní a adaptivní zařízení by se měla sama plnit konstrukčními daty, opravovat chyby a samostatně si určit všechny pohyby a akce.

---

<sup>1</sup> Interpretací dat se rozumí zpracování dat za účelem získání požadovaných informací.

## 1.2 Snadné nastavení strojů a zařízení

Zdlouhavé programování robotů, PLC, CNC a dalších zařízení ve formě procedurálních (imperativních) jazyků je stále v praxi hojně používáno. Je ovšem málo efektivní u flexibilních zařízení. Naopak výhodná je jasná specifikace provedení operací a používá se pro programování průmyslových robotů, linek a automatů především v hromadné výrobě.

Trendem je v současné době parametrizace software, tedy „naprogramování“ zařízení pomocí vybraných návazných operací v rozbalovacím menu, zadání hodnot do políček, posuvníkem v software, propojením ikonek, navedením rukou (např. paže robotu do požadovaných pozic, následně je provedeno dopočítání optimální trajektorie samotným robotem) atd. Velmi často je používáno tabletu nebo notebooku. Jednoznačnou výhodou je, že obsluha zvládne zařízení parametrizovat, aniž by předtím měla nějaké zkušenosti s programováním.

Nedalekou budoucností je ovládání/zadávání úloh hlasem. Zde je nutná již umělá inteligence zařízení (kap. 1.10), která porozumí lidskému hlasu, pochopí například příkaz „zkompletuj“ a rozloží si tento příkaz na snazší a následné operace, např. „uchop a zvedni“ a „předej“.

Umělá inteligence také sama porozumí CAD modelům, technologii výroby, možným změnám se schopností se poučit z chyb vlastních, tak i sdílených s dalšími obdobnými stroji a zařízeními i mimo samotné firmy.

## 1.3 Kolaborativní robotika

V současné době se velmi často zmiňuje pojem kolaborativní (kooperující) robotika, ve které roboty přebírají těžkou monotónní práci a lidé díky tomu mohou věnovat svůj čas komplikovanějším, více kvalifikovaným a žádaným úkonům. Roboty v tomto pojetí jsou v bezprostřední blízkosti člověka a nejsou, jako doposud u běžných průmyslových robotů, odděleny mechanickými zábranami nebo optickými závorami. To přináší požadavek na bezpečnost, která je zajišťována pomocí samotné konstrukce s minimalizací hmotnosti a zaoblenými hranami, pryžovým obložení a dalším. Senzory uvnitř i vně robotu dokážou včas identifikovat osobu nebo stroj v blízkosti, zastavit se a předejít tak kolizi. Kolaborativní robotika je také zmíněna v kap. 6.6.

Otázkou je jednak bezpečnost strojů, které pracují s ostrými objekty (nástroji a díly), protože pak se již stroj stává nebezpečným a nemůže pracovat bez zábran v blízkosti lidí. Otázkou také je vzdálenější budoucnost těchto robotů s pokračujícím trendem dostat lidi z provozů.

## 1.4 Aditivní technologie

Tato progresivní technologie je stále více používána v průmyslové praxi, především pro svou flexibilitu. 3D tisk (nejznámější aditivní technologie) je komerčně využíván od konce 80. let minulého století. Od té doby se velmi zdokonalil a rozšířil. 3D tisk je ve svém principu aditivním způsobem vytváření modelů, což znamená, že materiál je v průběhu procesu tvorby výrobku přidáván. Konvenčním a opačným způsobem je například obrábění, kdy je materiál při výrobě odebírán. V současné době existuje několik základních technologií využívajících čtyři základní principy (tj. dělení je určeno způsobem zpracování základního materiálu):



1. **Tisk pomocí tavené struny** (filamentu), nazývaný FFF (Fused Filament Fabrication), také PJP (Plastic Jet Printing) nebo FDM (Fused Deposition Modeling), což je stejný princip. Na tiskovou podložku je nanášen tiskový materiál po vrstvách. Vždy po dokončení tisku vrstvy se posune tisková hlava (nebo podložka) o jednu vrstvu a zahájí se tisk další vrstvy.

2. **Tisk vytvrzováním tekutého materiálu v definované vrstvě.** V nádobě s tiskovým materiálem (tekutý polymer) je umístěna tisková deska, jejíž úroveň proti hladině polymeru určuje výšku požadované tiskové vrstvy. Světelný paprsek laser (SLA – Stereolithography Apparatus) nebo projektor (DLP – Digital Light Processing) vykreslí požadovaný tvar vrstvy a tím dojde k vytvrzení polymeru v příslušném tvaru. Následně se tisková deska posune a světelný paprsek vykreslí a vytvrdí další požadovaný tvar.

3. **Tisk z materiálu ve formě prášku, který je rozprostřen na podložce a pojen pomocí lepidla, laseru** apod. Tisková deska se posune o úroveň definované výšky, nanese se další vrstva prášku a laser či lepidlo vytvrdí požadovaný tvar. Tento princip je hojně využíván technologiemi SLS (Selective Laser Sintering), SLM (Selective Laser Melting), CJP (Color Jet Printing, technologie plnobarevného 3D tisku) a DMP (Direct Metal Printing). Stavebním materiálem je dle technologie celá škála plastů, kovů a prášků na bázi sádry či keramiky.

4. **„Tisk“ na principu oddělování materiálu v každé vrstvě** je výrobcí aplikován nejméně. Technologie LOM (Laminated Object Manufacturing) využívá jako stavební materiál zpravidla papír nebo fólii. Tvar vrstvy „tištěného“ modelu je vyříznut z materiálu nožem a následně je další vrstva přilepena na předchozí. Po dotištění / vyříznutí vrstvy může být tato vrstva ještě pomocí principu inkoustové hlavy obarvena. Lze tak dosáhnout i barevných efektů finálního modelu.

Podobné a podrobnější rozdělení je možné provést podle připravované mezinárodní normy ISO/ASTM 52900:2015 [9].

## 1.5 Pokročilá sensorika, zpracování a interpretace dat

Současné i budoucí stroje a zařízení se neobejdou bez senzorů. Trendem je stále širší uplatnění senzorů, které se dostávají do všech částí výrobních zařízení. Jedná se o použití jednoduchých, jednoúčelových a levných senzorů integrovaných do zařízení nebo ve formě multisenzorů se schopností získávat a následně dále interpretovat data, za účelem získání potřebné informace. Předpokládá se decentralizace interpretace dat a masivní sdílení získaných informací s okolím. Tím se dá ověřit, zda proces, který má zařízení vykonávat, začal, provádí se správně a byl dokončen podle potřeb. Zároveň sensorika může včas odhalit problém uvnitř zařízení a předejít tak neočekávané odstávce.

Při zpracování velkého objemu dat je používán pojem **big data**. Za big data jsou označována data, jejichž velikost je mimo schopnosti v rozumném čase zachycovat, spravovat a zpracovávat data běžně používaných softwarových nástrojů [10]. Tato data jsou charakteristická exponenciálním nárůstem dat v čase, objevují se také úlohy vyžadující okamžité zpracování velkého objemu průběžně vznikajících dat (příkladem může být zpracování dat produkovaných kamerou s vysokým rozlišením), atd.

Se zpracováním dat také souvisí pojem **data mining**, což je analytická metodologie získávání netriviálních skrytých a potenciálně užitečných informací z dat [11]. Časté aplikace jsou především v oblastech přímého marketingu (výběr klientů pro oslovení), finančnictví (např. odhadování rizika, hledání podvodů), maloobchodního prodeje (analýza nákupních košíků aj.), telekomunikací (segmentace klientů, prodej programů aj.) a internetového prodeje (analýza přechodů mezi stránkami, efektivita reklamy apod.). Aplikace se také pomalu rozšiřují i do průmyslové praxe, kdy mohou být získány informace, které umožní lépe pochopit výrobní proces a lépe ho řídit.

**Sensor fusion** (senzorová fúze) je kombinací sensorických dat nebo dat získaných z různých zdrojů tak, že výsledná informace má méně nejistoty, než kdyby byly tyto zdroje použity jednotlivě [12]. Informace tak může být přesnější, úplnější, spolehlivější nebo může být rozšířena. Například použití dvou kamer za účelem stereoskopického vidění poskytne navíc informaci o hloubce předmětu na základě získaných dvou 2D obrazů, čehož by se u samostatných kamer nedosáhlo.

Velké oblibě se čím dál více těší senzory pro získání obrazu (kamery). Obraz je dnes čím dál častěji získáván jako třírozměrný (3D), kap. 5.7.

## 1.6 Infrastruktura pro ukládání a zpracování dat

Cloudová úložiště jsou datová úložiště mimo podnik, což umožňuje jejich sdílení mezi různými uživateli a jednoduchý přístup z různých platform zařízení (počítač, tablet, chytrý telefon, PLC, řídicí jednotka robotu, ...). Datová úložiště mimo podnik mohou budít nedůvěru, ale s řešením kybernetické bezpečnosti se začínou uplatňovat jejich výhody. Tou je možnost data získat i mimo kancelář (v rámci home-office, práce v terénu, atd.), sdílení potřebných dat s dodavateli a odběrateli, výměna dat mezi dceřinými a spřízněnými firmami, podpora řešení problémů u zákazníků, platformy pro umělou inteligenci a další.

Úložiště budou také stále častěji sloužit pro následné zpracování dat specifickými softwarovými nástroji, které jsou vysoce výpočetně náročné, anebo se daný analytický nástroj nevyplatí firmě pořídit, ale jen si ho externě pronajmout pro danou dávku dat.

## 1.7 Průmyslový internet věcí

Internet věcí (Internet of Things, zkratka IoT) [13] se v současné době velmi zajímavě rozvíjí především ve spotřebitelské sféře. Jedná se o propojení různých zařízení pomocí internetu (většinou bezdrátově). Vznikají tak nové možnosti vzájemné interakce nejen mezi jednotlivými systémy, ale také nové možnosti jejich ovládní, sledování a zajištění pokročilých služeb. Příkladem může být ovládní domácnosti na dálku pomocí chytrého mobilního telefonu. Důležitá je ovšem také komunikace mezi samotnými zařízeními, která dokážou získávat potřebná data, sdílet je, získávat z nich potřebné informace, vhodně je použít a navzájem optimalizovat součinnost těchto zařízení.

Vedle přínosu pro zákazníka v podobě pokročilých funkcí má internet věcí velký potenciál pro výrobce a prodejce. Zákazníka mohou díky internetu věcí mnohem lépe poznat a cíleně mu nabídnout podobné zboží nebo zboží odpovídající jeho vkusu.

Velký potenciál má ovšem využití principu internetu věcí pro průmyslové aplikace (v terminologii OECD nazýván **průmyslovým** nebo také industriálním **internetem věcí**). Jedná se o využití vzájemné komunikace, sdílení dat a informací mezi stroji (komunikace nazývána machine-to-machine), mezi výrobními linkami, výrobky (komunikace nazývána machine-to-product) a ekonomickými systémy (softwaru). Předpokládá se, že veškerá zařízení, stroje a linky budou navzájem propojeny a každý výrobek se již od okamžiku svého vzniku při výrobním procesu sám stane „inteligentním“ **kyber-fyzikálním systémem** [1], propojujícím virtuální a reálný svět. Jedná se o hromadné sdílení dat, informací a kontinuální komunikaci mezi výrobními zařízeními i výrobky. Takováto produkce je nazývána inteligentní výrobou (Smart manufacturing), která využívá průmyslového internetu věcí pro zlepšení efektivity a produktivity výrobních operací. Zároveň se stává nástrojem pro spolehlivé uplatnění masové výroby na zakázku (kap. 1.9).

Nejdříve k tomuto procesu bude docházet (a již dochází) při úplné integraci ekonomických systémů, kdy jsou propojovány systémy financí, personalistiky, výroby a logistiky, marketingu, plánování, optimalizace vytížení strojů, konstrukce a simulace zařízení a výrobků, řízení dodavatelského řetězce a vztahů se zákazníky a další. V tomto případě se jedná především o propojení počítačů a případně několika málo zařízení, často s podporou cloudového úložiště (kap. 1.6). Na rozdíl od současných podnikových informačních systémů by měly systémy více komunikovat mezi sebou, umožňovat úplné propojení všech systémů v podniku s potřebným propojením na další systémy mimo podnik a ideálně eliminovat současnou funkci lidské obsluhy, která musí přesně a zdoluhavě zadávat data do systému.

Další (a mnohem komplikovanější) možností využití vzájemné komunikace je propojení strojů, zařízení a výrobků. Získávání dat a jejich interpretaci, sdílení dat a informací, a to především na decentralizované úrovni, lze chápat jako vzájemnou komunikaci jednotlivých zařízení. Výrobní stroje a linky dokážou samy rozpoznat, jaký produkt se vyrábí (díky umělé inteligenci, kap. 1.10) a podle toho přizpůsobit výrobní technologii (s využitím flexibility zařízení, kap. 1.1). Již na začátku může být výrobek opatřen miniaturním čipem pro komunikaci s okolím, který nese mimo jiné informaci, jak má výsledný produkt vypadat. To je samozřejmě řešitelné i dnes pomocí unikátního kódu, například na samolepce nalepené na výrobku. Rozdíl je ovšem v bezdrátové a decentralizované komunikaci v průběhu celé výroby, ale i v možné komunikaci v okamžiku skladování, prodeje a následně i při používání výrobku. Složitější výrobky mohou být po dobu své životnosti propojeny s výrobní firmou, která získá informace o používání výrobku, možnostech vylepšení a změn v nových verzích výrobků, preferencích uživatele a bude schopna provést určité servisní zásahy na dálku.

Je reálné, že se budeme setkávat s mnoha dalšími možnými aplikacemi, ale je nutné řešit mnoho problémů a hrozeb. Existují především dva problémy.

Prvním jsou různé standardy používané pro komunikaci mezi zařízeními, prosazované různými skupinami, především výrobců. Aby mohla jakákoliv zařízení v průmyslu (ale i v domácnostech) spolu komunikovat a spolupracovat, bude třeba vyvinout sjednocující hardwarové a softwarové platformy, mezinárodní kompatibilitu a technicky sjednocené fyzické a bezdrátové propojování.

Druhým problémem je zajištění kybernetické bezpečnosti a zabránění zneužití dat. Obrovské nakupení citlivých dat v sobě skrývá nebezpečí sofistikovaných kybernetických útoků, které mohou mít dalekosáhlé následky. Při nedostatečném zajištění hrozí ztráty jak finanční, tak v oblasti know-

how firem, ale v případě propojených výrobních zařízení zničení, zneužití výroby nebo ohrožení na zdraví lidí a na životě. Lze předpokládat, že poroste počet pokusů o krádeže dat a zneužití a ovládnutí chytrých zařízení přímo v průmyslové praxi. Uspokojivé řešení ochrany dat a zařízení je nutné pro rozšíření internetu věcí jak v průmyslu, tak v domácnostech.

## 1.8 Propojení reálného a virtuálního světa

S používáním internetu jsme si zvykli na využívání virtuálního světa a na propojení s ním. Již automaticky je přijímáno či dokonce vyžadováno vytváření virtuálních modelů při návrhu a designu nových zařízení, domů, strojů, aut atd. Tyto modely si lze dnes pomocí rozšířené reality prohlížet nebo upravovat, lze je umístit do reálné místnosti a místo nad výkresy je možné s pomocí speciálních brýlí, rukavic a ovladačů diskutovat nad virtuálním modelem. Virtuální modely je možné následně vytisknout na 3D tiskárnách (kap. 1.4). Naopak je možné získávat 3D modely reálných objektů pomocí vhodných senzorů a z nich vytvářet modely virtuální.

Také propojení linky pomocí intranetu s dalšími zařízeními v závodě a ekonomickými systémy již vytváří virtuální prostor pro tuto linku s možností využití komunikace a především dostupných dat a informací. Podobně virtuální prostor získávají výrobky připojené do sítě.

Jako příklad je možné uvést použití virtuální reality pro odzkoušení provozu linky před připravovanou změnou sortimentu, která zasáhne do technologických operací a konstrukce. Na základě přesných numerických simulací technologie a konstrukce linky lze simulovat proces výroby s expertizou potřebných změn. V budoucnu je možné využít i systémy navrhující úpravy technologie a konstrukce již samostatně. (Například pokročilý CAD systém provede sám automaticky úpravu konstrukce v lince a její optimalizaci.) Část dílů pak bude přímo v závodě vytištěna na 3D tiskárně, ostatní objednány a pomocí mobilních robotů implementovány do linky.

Lépe představitelným příkladem je nový obchodní model bez využívání skladů náhradních dílů provázáním reálného a virtuálního světa. Stroj na základě informací ze senzorů, řízení a pomocí definovaného algoritmu rozpozná potřebu výměny komponentů a sám náhradní díl včas objedná. Lze tak minimalizovat náklady na technické prostoje výrobních zařízení i na skladové hospodářství [14].

Propojení reálného a virtuálního světa může být ovšem hlubší. Již dnes se lze setkat s aplikacemi v podobě virtuálních asistentek, se kterými lze hlasem komunikovat.

## 1.9 Mass customization

Mass customization je ve volném překladu masová výroba na zakázku a jedná se o trend, jehož cílem je hromadná výroba zboží, poskytování servisu a služeb individuálně přizpůsobených firmám a jednotlivcům bez zvýšení nákladů. Mělo by se jednat o obrovské zvýšení různorodosti produktů, přizpůsobených potřebám a vkusu zákazníků. Krédem je, že každý jedinec nebo firma je trhem a jeho individuální potřeby musejí být uspokojovány levně, rychle a beze zbytku. Tradiční systém „Výrob, pak prodej“ se transformuje na „Prodej, pak vyrob“ [15].

Tento model má výhody v minimalizaci skladových zásob hotových výrobků, které začne firma vyrábět až v okamžiku objednávky. Celková efektivita prodeje se zlepšuje. Výrobce je také lépe vázán na

zákazníka včetně možné predikce jeho potřeb a tomu odpovídajícímu marketingu. Na druhou stranu zde bude sílit tlak na dodavatelské řetězce včetně logistiky a v případě malých a středních firem jejich ohrožení integrací do systému dodávek velkých korporací.

Masová výroba na zakázku vyžaduje flexibilní výrobní zařízení (flexibilní automatizaci), flexibilní technologie, provázání zařízení a sdílení dat a informací, pokročilou sensoriku, snadné nastavení strojů atd. Směřuje se tak k samoorganizovaným výrobním zařízením, která reagují na autonomně se měnící výrobní požadavky, průběžně optimalizují své provozny a jsou osídlena roboty, které si vzájemně pomáhají. Výrobní zařízení jsou systémy, které se samy plní konstrukčními daty, opravují chyby a samostatně si určují všechny pohyby a akce.

### 1.10 Umělá inteligence

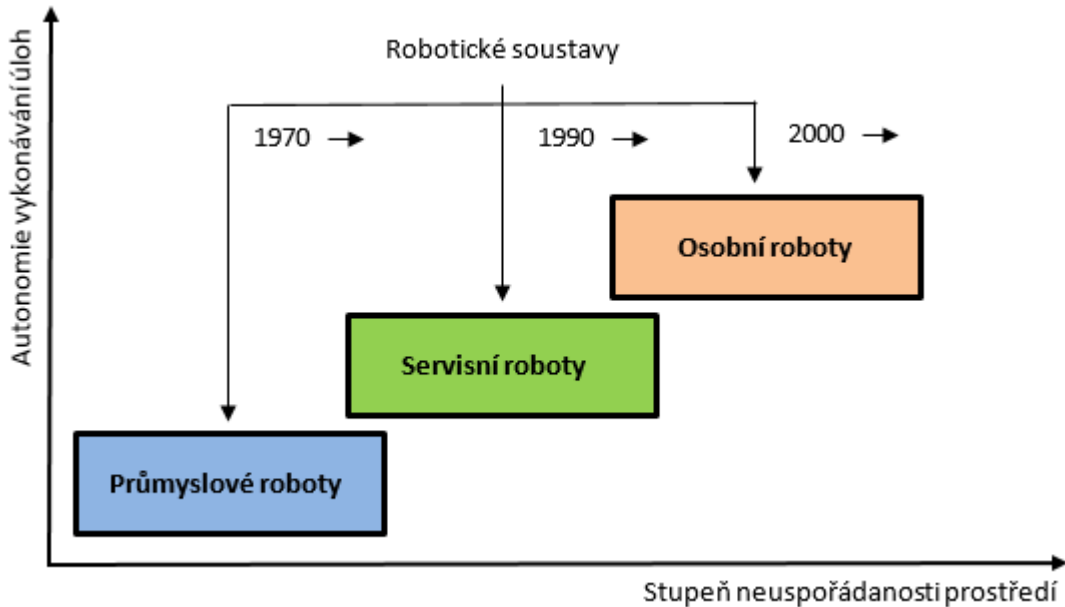
Umělá inteligence (Artificial intelligence) je zmiňována jako poslední, ale je klíčovou pro další změny jak v průmyslové výrobě, tak i ve výrobcích. Neexistuje jednotná definice umělé inteligence a existují spory o to, co lze již označit za umělou inteligenci. Zjednodušeně je pojem "umělá inteligence" používán, když stroj napodobuje "kognitivní" funkce, které lidé spojují s jinými lidskými smysly, jako je "učení" a "řešení problémů". Přes určitou skepsi, která je dána dlouhodobým (a zatím ne příliš úspěšným) vývojem, dochází v poslední době k zajímavému pokroku. Použití mnohavrstvých neuronových sítí pro „**hluboké učení**“ (Deep learning) [16, 17], přináší úspěch v rozpoznávání objektů, hlasu a ve strojových překladech. Umělé neuronové sítě vlastně používají principu lidského mozku. Mozek je podle dosavadních poznatků v zásadě sítí vzájemně propojených neuronů, které si mezi sebou předávají signály pomocí elektrických impulsů a ty nějakým způsobem transformují. Každý neuron může mít libovolný počet vstupů, ale vždy jen jeden výstup. Výsledná hodnota může být vstupem pro jiný neuron nebo může být jednou z výstupních hodnot celé sítě. Pro úspěšné využití mnohavrstvých neuronových sítí je potřeba použít rozsáhlého souboru učících dat a poskytnout dostatečný výkon pro zpracování, což můžou být i stovky CPU (počítačových procesorů) nebo GPU (grafických procesorů). Tyto náročné operace jsou často prováděny na speciálních, tomu vyhrazených zařízeních a jsou důležité pro učení sítí, samotná sít (po naučení) již může být implementována do běžných zařízení. Zjednodušeně řečeno, aplikace hlubokého učení nejsou programovány, ale jsou cvičeny na skutečných velkých datech, jak se v různých situacích chovat.

Hluboké učení posouvá analýzu textu směrem k „pochopení“ významu zkoumaného dokumentu. Asi nejnámější aplikací vyšší úrovně, s níž se již setkáváme každý den, je rozpoznávání obličejů lidí. Nejdále je v této oblasti Google a Facebook. Dalším příkladem je systém samořídícího auta. I ten samozřejmě rozlišuje různé objekty, i když asi ne do takových detailů. Zato pro něj bude jistě důležité, jakou rychlostí se pohybují a zda se nepřibližují. Samořídící prvky u vozidel začínají být běžnou skutečností (parkování, jízda po dálnici apod.).

Využití umělé inteligence, potažmo hlubokého učení, je možné i v průmyslové praxi. Právě rozpoznávání objektů z průmyslových 2D nebo 3D kamer v reálném čase je současnou aplikací. Ta může být použita pro rozpoznání širokého sortimentu zásob, výrobků, polotovarů, případně pro detekci člověka v okolí stroje, který se automaticky vyhne kontaktu s ním. Umělou inteligenci je možné použít také pro optimalizace všeho druhu, výrobního toku, konstrukcí, návrh výrobků, financí atd.

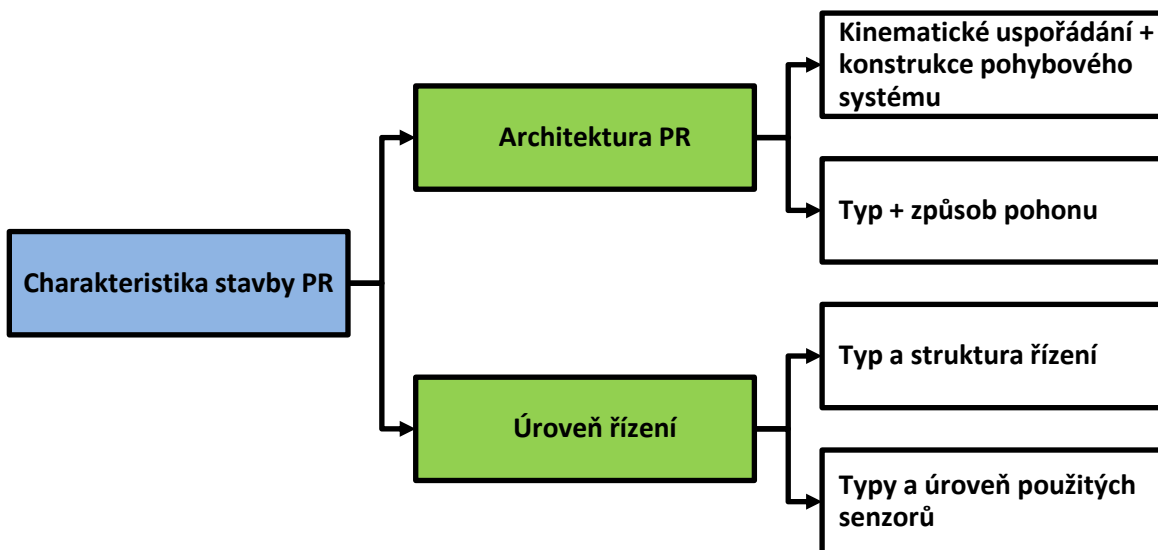
## 2 Roboty – rozdělení a trendy

Manipulátory a roboty jsou poměrně složitá mechanická zařízení tvořená většinou prostorovými mechanismy, jejichž struktura je značně rozmanitá v závislosti na charakteru manipulačních, technologických, popř. obslužných úkolů, které mají plnit. Obr. 2.1 ukazuje základní rozdělení robotických soustav [18].



Obr. 2.1 Základní rozdělení robotických soustav

Jak vyplývá z obecného schématu skladby robotu (Obr. 2.2), lze roboty charakterizovat kinematickým uspořádáním pohybového systému, typem a způsobem pohonu, tj. architekturou, typem strukturou a úrovní senzory (vnímání, kap. 6), což charakterizuje úroveň řízení.

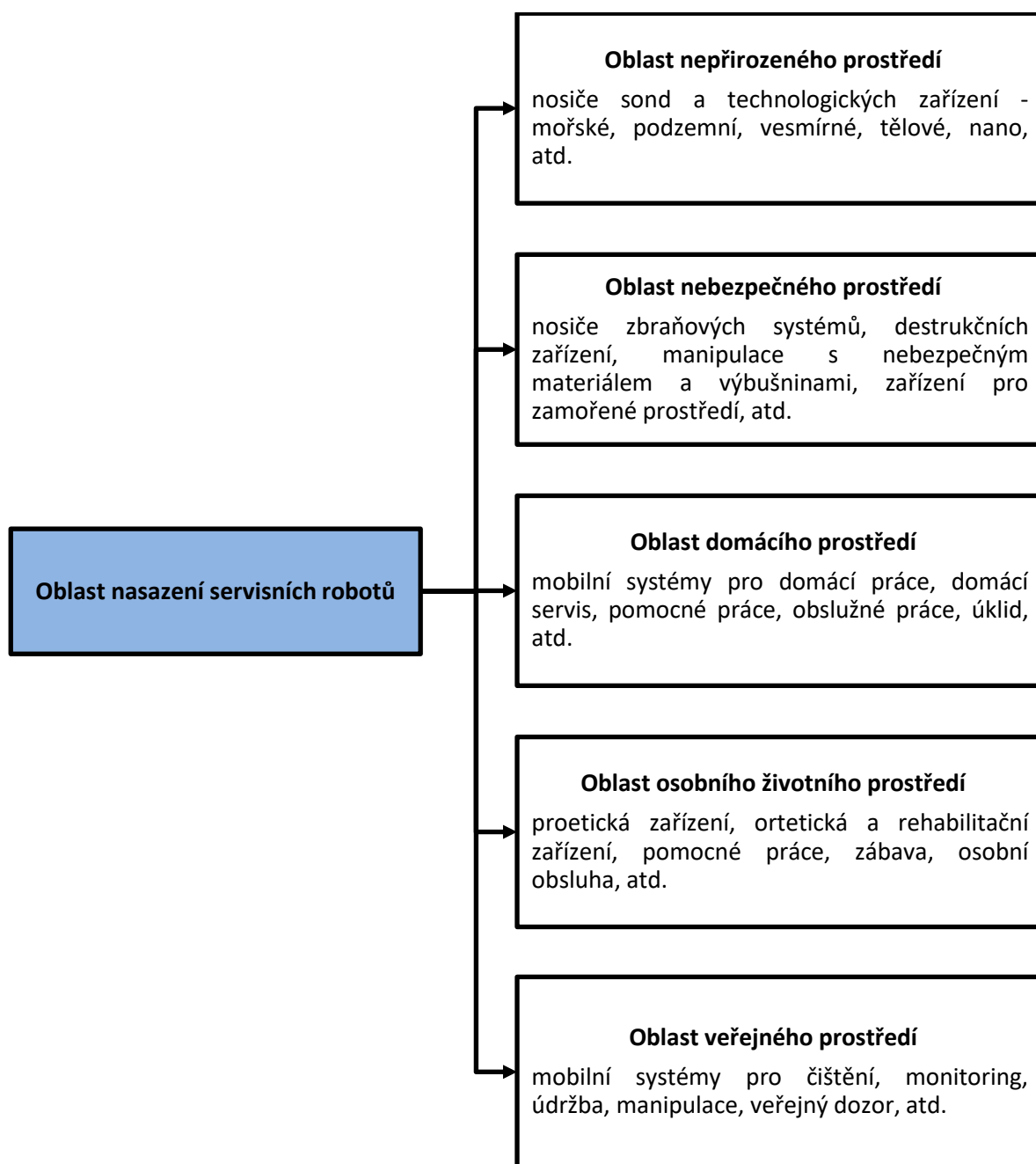


Obr. 2.2 Obecné schéma skladby robotu

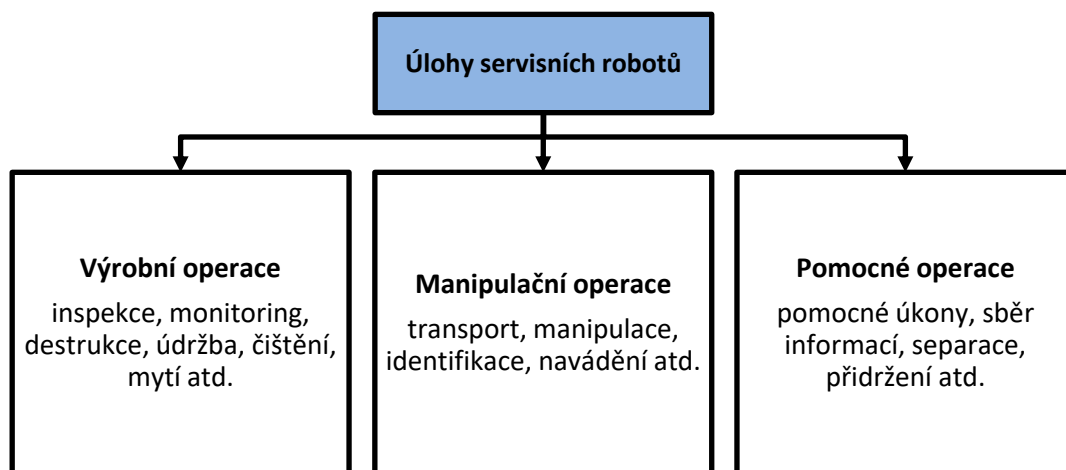
Základní atributy architektury PR jsou podle Obr. 2.2 patrné z vnějšího pohledu, přičemž tento kvalifikovaný pohled napovídá mnohé i o použitém způsobu a úrovni řízení.

Podle údajů Mezinárodní robotické federace (IFR, [19]) se na světě v roce 2019 prodalo 373 000 kusů PR (pokles o 12 % proti roku 2018). V tom samém roce bylo podle IFR v provozu 2 722 000 kusů PR, což byl nárůst o 13 % oproti předcházejícímu roku.

Zatímco PR jsou určeny do nasazení v průmyslové výrobě k plnění manipulačních i technologických úloh a jejich vývoj a zdokonalování probíhá intenzivně od 60. let 20. století (kap. 3 a 6), servisní roboty (SR) jsou fenoménem od první dekády 21. století [20] (kap. 7). Tyto roboty jsou určeny pro plnění servisních úloh v neprůmyslovém nasazení (Obr. 2.4, Obr. 2.3).



Obr. 2.3 Charakteristika oblastí nasazení servisních robotů



Obr. 2.4 Charakteristika úloh servisních robotů

Podle definice významného německého ústavu pro průmyslovou automatizaci Fraunhofer Institut IPA je servisní robot volně programovatelné mobilní zařízení, jež částečně nebo plně automaticky vykonává úkony, které nejsou určeny přímo k průmyslové výrobě produktů, nýbrž poskytují lidem a zařízením služby.

Podle údajů Mezinárodní robotické federace (IFR, [19]) se na světě v roce 2019 prodalo 23,4 miliony kusů SR (+34 % proti předchozímu roku). Z toho 23,2 mil. kusů pro domácí a osobní použití za 5,6 mld. \$ a 173 000 kusů pro profesionální použití za 11,2 mld. \$. Předpokládá se, že v roce 2023 bude prodáno a 55,3 milionů kusů pro domácí a osobní použití 537 000 kusů pro profesionální užití.



### 3 Průmyslové roboty a manipulátory

Tato rozsáhlá kapitola je rozdělena do tří částí, v první části jsou vysvětleny pojmy průmyslové roboty (PR) a manipulátory [22, 23], ve druhé jsou popsány elektrické pohony, které jsou s funkcí průmyslových robotů a manipulátorů úzce spojeny a ve třetí jsou popsány pneumotory, které jsou důležitými pohony především u efektorů a částí manipulátorů.

#### 3.1 Kinematická struktura mechanismů PR a manipulátorů

Základem stavby PR jsou mechanismy, tj. zařízení k přenosu pohybu a sil, k transformaci pohybu, k vedení a přemísťování objektů (nástrojů) po určitých drahách vyplývajících z funkce systému.

Mechanismy PR a manipulátorů jsou tvořeny soustavou pohyblivě spojených prvků – členů, z nichž jeden tvoří rám. Mechanismy PR jsou odvozeny z *otevřených prostorových kinematických řetězců* a vázány *prostorovými kinematickými dvojicemi*. Kinematický řetězec pak určuje kinematickou strukturu.

Vzájemná pohyblivost členů  $a$  vůči  $b$  tvořících kinematickou dvojici je určena počtem stupňů volnosti  $i$ . Počet stupňů volnosti kinematické dvojice je roven počtu nezávislých posuvů a rotací, které mohou členy dvojice vůči sobě navzájem vykonávat.

Kinematická dvojice, odebírající  $j$  stupňů volnosti se nazývá dvojicí  $j$ -té třídy a v prostoru platí

$$j = 6 - i \quad (3.1)$$

Celkový počet stupňů volnosti (DOF – Degree of freedom) prostorového kinematického řetězce (pohyblivost mechanismu) je určen vazbovou závislostí [24, 25]

$$i \geq 6 \cdot (n - 1) - \sum_{j=1}^5 j \cdot d_j, \quad (3.2)$$

kde  $i$  počet stupňů volnosti;

$n$  počet členů včetně rámu;

$d_j$  počet kinematických dvojic  $j$ -té třídy;

$j$  třída kinematické dvojice.

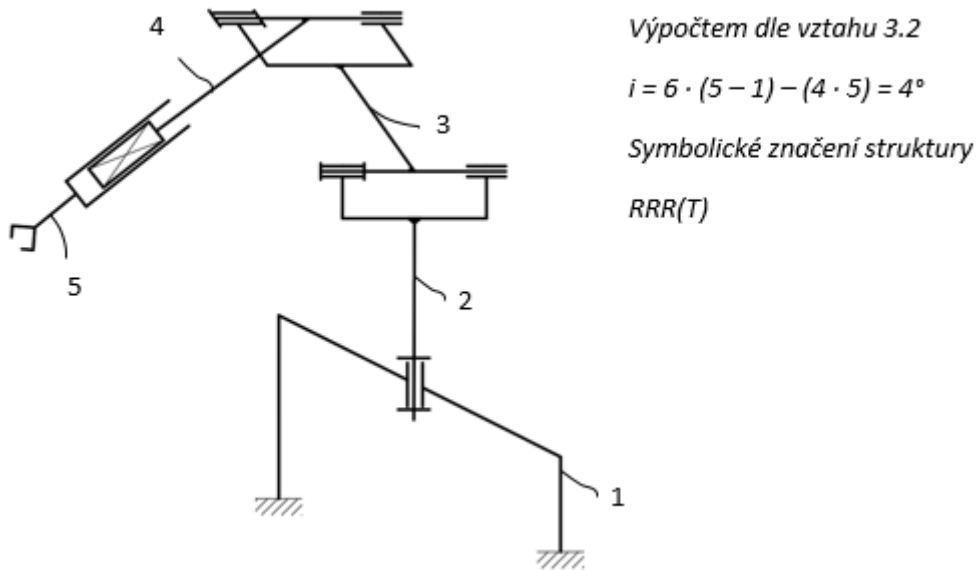
Obecně platí, že počet stupňů volnosti je roven počtu nezávislých pohybů, které může struktura vykonávat a pro každý nezávislý pohyb musí být soustava vybavena příslušným pohonem. Nejčastěji je technická realizace provedena pomocí rotačních resp. translačních pohybových jednotek s individuálním vnitřním pohonem, kdy každá jednotka má samostatný nezávislý pohon. Potom počet pohybových jednotek (pohonů) odpovídá počtu nezávislých souřadnic výsledné polohy koncového členu robotu a je jím určen počet stupňů volnosti.

Tab. 3.1 Přehled prostorových kinematických dvojic<sup>2</sup>

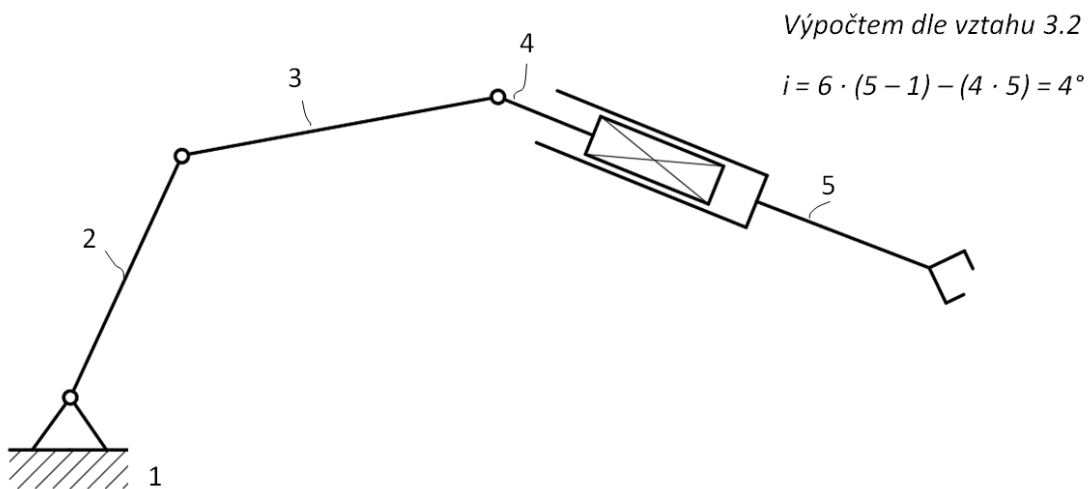
NÁZEV	SCHÉMA	POHYBLIVOST B:A => i	SYMBOL	TŘÍDA j = 6 - i
ROTAČNÍ		1°	R	5
POSUVNÁ		1°	T	5
ŠROUBOVÁ		1°	H	5
VALIVÁ		1°	V	5
VÁLCOVÁ		2°	C	4
SFÉRICKÁ		3°	S	3
ROVINNÁ		3°	F	3
VÁLEC NA ROVINĚ		4°	-	2
OBEČNÁ		5°	O	1

<sup>2</sup> V kinematických řetězcích manipulátorů a robotů převládají otevřené prostorové řetězce složené z kombinace rotačních (R) a posuvných (translačních, T) kinematických dvojic, které bývají umístěny ve zvláštní poloze (osy rotace, resp. translace jsou buď rovnoběžné, nebo vzájemně kolmé). Kinematické řetězce se běžně popisují symbolickým označením, přičemž symboly kinematických dvojic v řetězci se zapisují do řádku od rámu ke koncovému členu řetězce (např. RRT), někdy se užívá označení os (např. Rz Rx Ty).

Příklady určování počtů stupňů volnosti jsou uvedeny na obrázcích Obr. 3.1 a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**



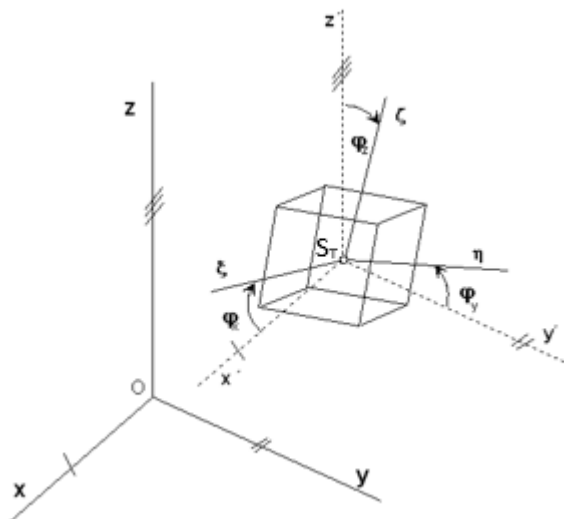
Obr. 3.1 Určení počtu stupňů volnosti kinematického řetězce



Obr. 3.2 Určení počtu stupňů volnosti kinematického řetězce

### 3.1.1 Členění kinematického řetězce

Poloha manipulovaného objektu je v prostoru obecně určena 6 souřadnicemi, tři souřadnice určují polohu těžiště  $S_T(x_s, y_s, z_s)$  a tři souřadnice určují natočení objektu kolem os  $x, y, z$  unášeného souřadného systému v těžišti objektu (obr. Obr. 3.3) o úhly  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ , které definují orientaci objektu v prostoru [26, 27, 28].



Obr. 3.3 Určení polohy tělesa v prostoru

V souladu s tím je kinematický řetězec robotu rozdělen na:

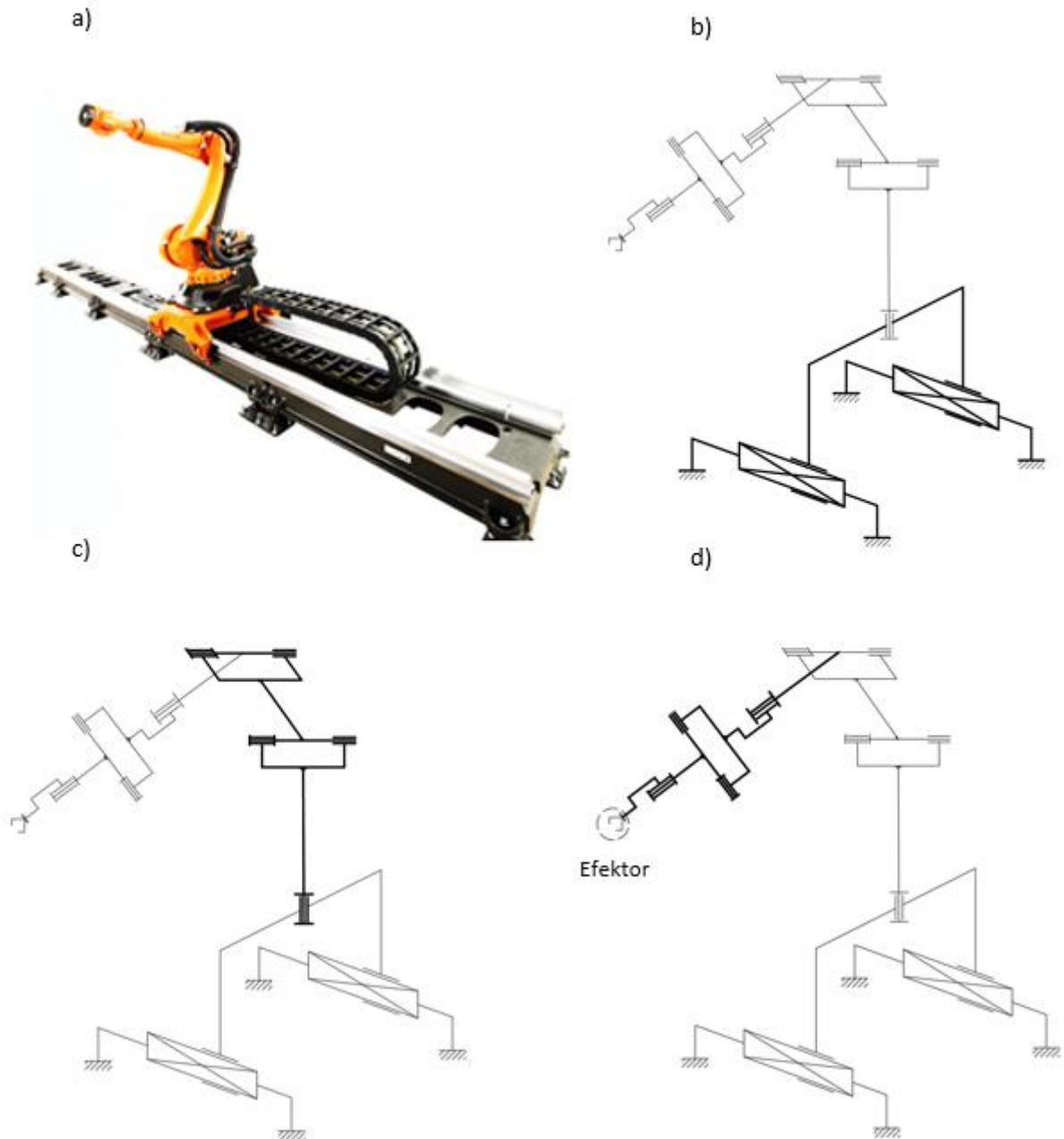
- polohovací ústrojí;
- orientační ústrojí;
- efektor;
- pojezdové ústrojí.

**Polohovací ústrojí** (*angl. robot arm – rameno robotu*) – Obr. 3.4 c, slouží k přemísťování objektů, resp. k jejich polohování v rovině nebo prostoru. Polohovací ústrojí je základem stavby PR a konstrukčně je řešeno nejčastěji kombinací rotačních a translačních pohybových jednotek s různou mírou strukturální integrace v souladu se zvolenou koncepcí konstrukčního řešení.

**Orientační ústrojí** (*angl. wrist – zápěstí*) – Obr. 3.4 d, umožňuje zachovat, popř. podle požadavků měnit orientaci objektu vůči pracovnímu prostředí (souřadnému systému rámu) a nejčastěji je realizováno kloubovými mechanismy s vysokou mírou konstrukční integrace. Tomuto ústrojí bývají přisuzovány další funkce, např. mikroposuvy, které nevedou přímo ke změně orientace, avšak jsou důležité z hlediska aplikačních požadavků na PR. Výjimečně, zejména u manipulátorů, může orientační ústrojí zcela chybět, časté je řešení s neúplným orientačním ústrojím s jedním nebo dvěma stupni volnosti.

**Efektory** (*angl. end effector*) jsou ústrojí, která slouží k uchopování a držení manipulovaného objektu, pak se nazývají **úchopné hlavice** (také **chapadla**), popřípadě **technologické hlavice**, které jsou tvořeny speciálními pracovními nástroji (stříkácí pistole, svařovací nástroje apod.) a slouží k realizaci technologických funkcí (Obr. 3.4 d). Více o efektech v samostatné kap. 4.

**Pojezdové ústrojí** – Obr. 3.4 b, je od samotného PR oddělená translační jednotka (často se zdvihem několika metrů), která slouží ke zvětšení pracovního prostoru robotu při zachování vysoké přesnosti polohování. Pojezdové ústrojí je buď umístěno v úrovni podlahy, nebo častěji jako portál nad úrovní pracovních míst, na kterém je robot zavěšen "hlavou dolů". Zatímco ostatní ústrojí jsou nedílnou součástí kinematického řetězce robotu, pojezdové ústrojí je funkčním doplňkem aplikovaným v případě nezbytnosti pro zvolené nasazení PR.



Obr. 3.4 Členění kinematického řetězce průmyslových robotů: a – robot s pojezdem; b – pojezd; c – polohovací ústrojí; d – orientační ústrojí a efektor

### 3.1.2 Kinematické (strukturální) uspořádání PR a manipulátorů

Strukturální uspořádání průmyslových robotů je velmi rozmanité a jejich kinematické řetězce obsahují především nejrůznější kombinace rotačních a translačních kinematických dvojic [27, 29]. Liší se jednak počtem stupňů volnosti, jednak typem kinematických dvojic a jejich vzájemnou variací.

Počet stupňů volnosti kinematického řetězce se obvykle pohybuje v rozmezí  $2^\circ - 8^\circ$ . Manipulátory mají obvykle  $2^\circ - 3^\circ$  volnosti (výjimečně více), PR mají obvykle  $4^\circ - 6^\circ$  (v případě pojezdu  $7^\circ$ ) volnosti. Větší počet stupňů volnosti významně snižuje polohovou tuhost koncového

členu a současně klesá přesnost polohování, proto je používán pouze výjimečně v případech vyžadujících složitou manipulaci v nepřístupných prostorech.

Struktura kinematického řetězce není náhodná a sleduje především splnění těchto podmínek [24]:

1. Požadované dráhy těžiště objektu (manipulační prostor);
2. Požadovaná přesnost polohování;
3. Požadovaná (anebo neměnná) orientace objektu vůči základnímu souřadnému systému;
4. Vhodná vazba kinematického řetězce na pohony pohybových jednotek;
5. Vhodnost konstrukčního provedení;
6. Vazba na jiná manipulační a pomocná (periferní) zařízení.

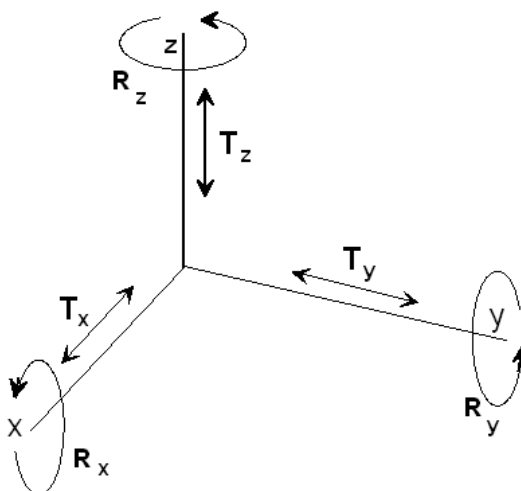
### 3.1.2.1 Požadovaná dráha těžiště objektu – struktura polohovacího ústrojí

Požadovaná dráha těžiště manipulovaného objektu je určena především strukturou polohovacího ústrojí. Je zřejmé, že k polohování po přímce a po kružnici by měl postačit 1° volnosti, v rovině 2° a v prostoru 3° volnosti.

Těžiště manipulovaného objektu se může pohybovat:

- po přímce;
- po kružnici;
- po křivce ležící v rovině, na válcové anebo kulové ploše;
- po obecné křivce.

Důležitá je vazba polohovacího ústrojí na základní souřadný systém, tj. vztah polohy pohybových os rotačních a translačních pohybových jednotek k osám základního souřadného systému  $O, x, y, z$  (Obr. 3.5).



Obr. 3.5 Vazba pohybů PR na osy základního souřadného systému

Velmi častý je případ, kdy pohybové osy a osy souřadného systému jsou totožné nebo rovnoběžné (popř. kolmé). Tuto vazbu na souřadný systém a označení pohybových os ukazuje názorně Obr. 3.5. Struktury kinematických řetězců lze pak popisovat symbolicky od rámu směrem ke koncovému členu. Například mechanismus PR podle Obr. 3.1 Určení počtu stupňů volnosti kinematického řetězce lze popsat takto:  $R_z, R_x, R_x, (T_y)$ .

Struktura pohybového řetězce a vztah k základnímu souřadnému systému ovlivňuje nutnou velikost změn potenciální energie jednotlivých členů mechanismu během vykonávání požadované dráhy. Je zřejmé, že změna prostorové orientace pohybových os významným způsobem ovlivňuje nároky na použité pohony a zejména ve stavbě účelových PR je třeba tento aspekt sledovat.

Přehled možných struktur polohovacího ústrojí pro realizaci uvedených polohovacích možností je přehledně shrnut do Tab. 3.2.

Tab. 3.2 Přehled struktur polohovacího ústrojí

Počet ° volnosti	Symbolický popis kinem. řetězce	Počet možných uspořádání	Dráha objektu
Pro 1°volnosti	T	3	Úsečka
	R	3	Kružnice, oblouk
Pro 2°volnosti	TT	6	Obecná rovinná křivka resp. křivka na válcové nebo sférické ploše
	RR, TR	9	
	RR	6	
Pro 3°volnosti	TTT	6	Obecná prostorová křivka
	RTT, TRT, TTR	18	
	RRT, TRR, RTR	27	
	RRR	6	

Počet možných uspořádání kinematického řetězce uvedený v Tab. 3.2 zahrnuje všechna teoreticky možná, za předpokladu, že translace ve směru jedné pohybové osy se může v řetězci vyskytovat pouze 1x a rotace kolem rovnoběžných os se vyskytuje nejvýše 2x.

Lze ukázat, že některé varianty uspořádání uvedené výše jsou rovnocenné a jejich rozlišování je pro praktické aplikace neúčelné.

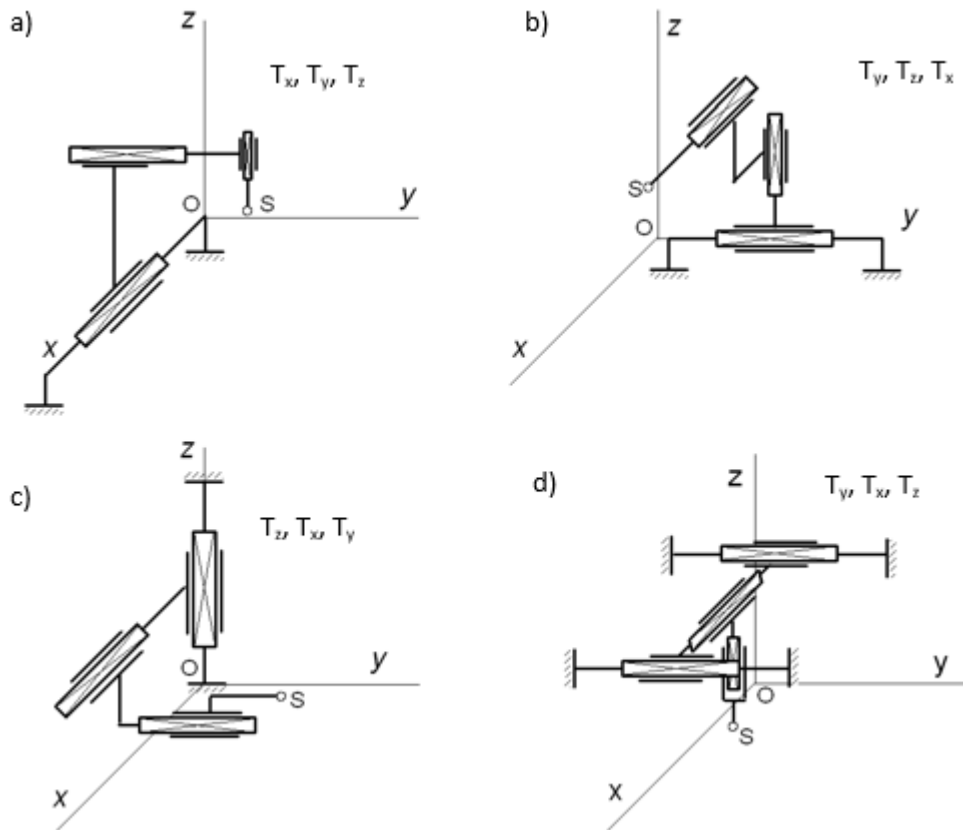
Například struktura TTT má za předpokladu, že nepřipustíme translaci podél rovnoběžných os tato možná uspořádání:

$$\begin{array}{ccc}
 T_x T_y T_z & T_y T_x T_z & T_z T_x T_y \\
 T_x T_z T_y & T_y T_z T_x & T_z T_y T_x
 \end{array}$$

Protože osy  $x, y$  jsou z hlediska změn potenciální energie při pohybu mechanismu rovnocenné, tj.  $x_y \equiv y_x$ , pak pro praktickou realizaci zbývají struktury

$$T_x T_y T_z \quad T_y T_z T_x \quad T_z T_x T_y ,$$

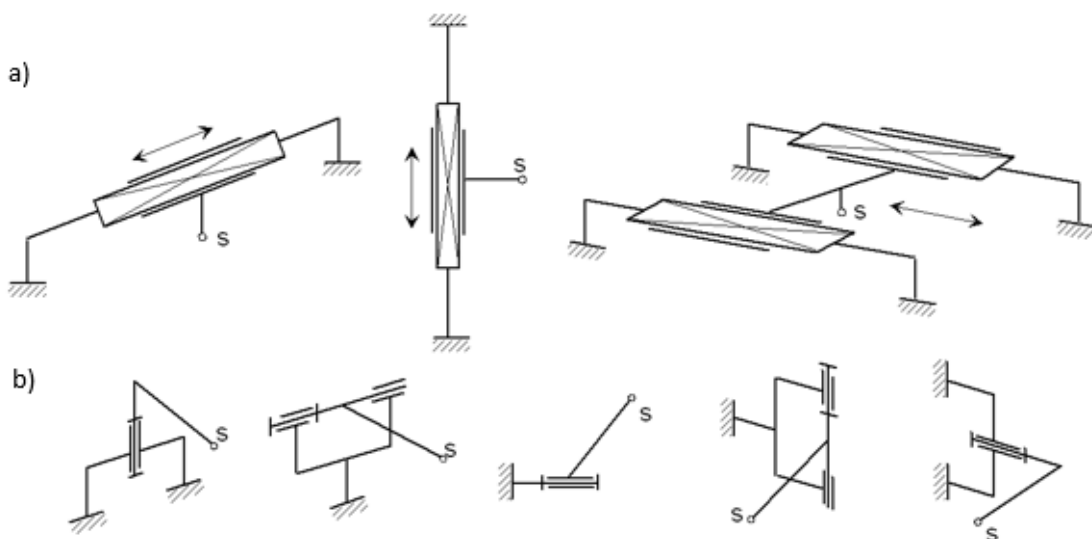
které jsou zakresleny v Obr. 3.6 a) – c).



Obr. 3.6 Možnosti realizace kinematického řetězce TTT

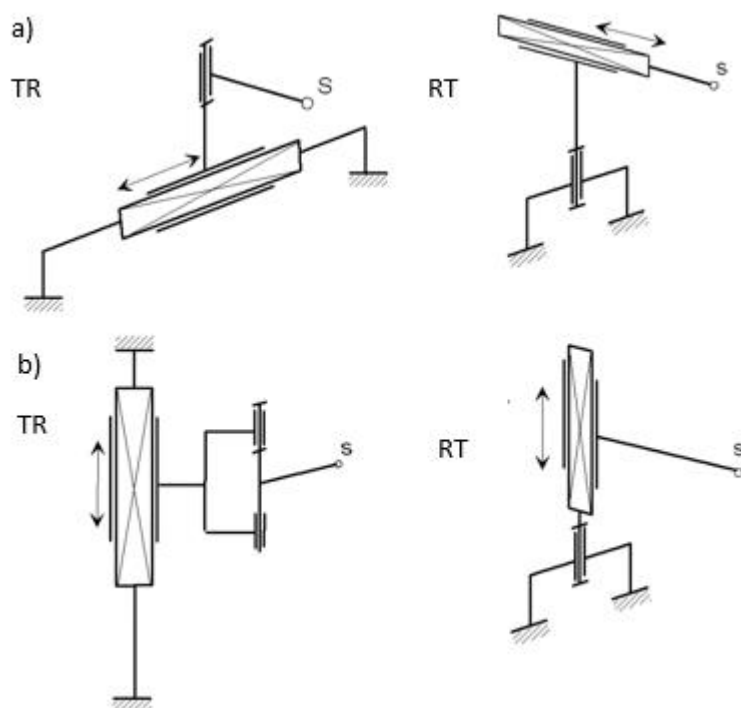
S ohledem na minimalizaci silového zatížení pohonů a minimalizaci prostorových nároků se dnes často využívají právě struktury  $T_x T_y T_z$  v portálovém zavěšeném uspořádání (Obr. 3.6 d).

V následujících obrázcích (Obr. 3.7 až Obr. 3.12) jsou ukázány příklady realizace struktur v souladu s Tab. 3.2.

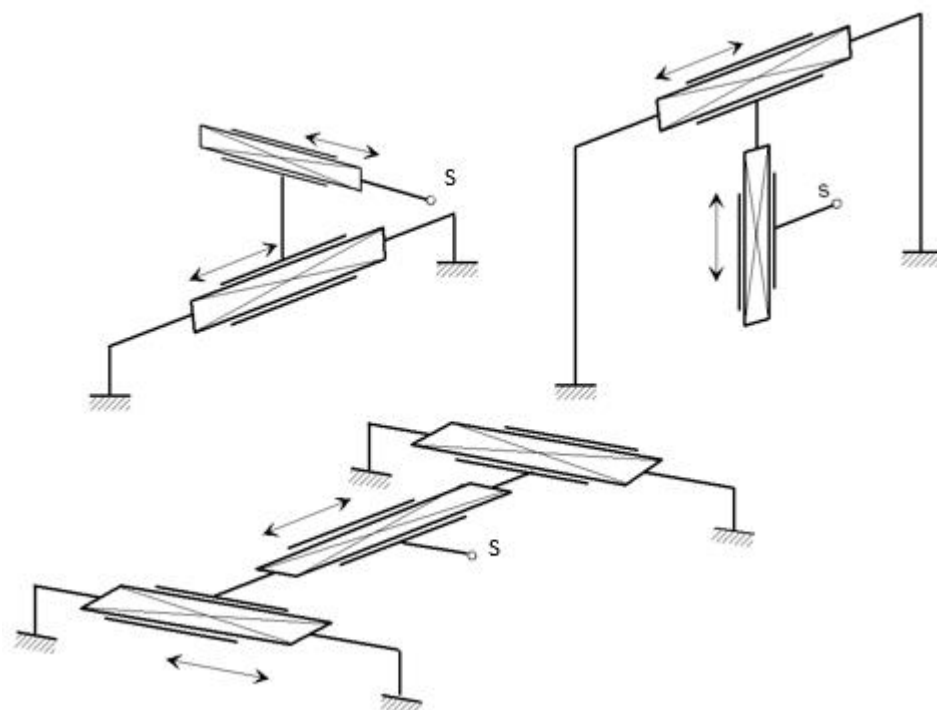


Obr. 3.7 Příklady kinematických struktur s  $1^\circ$  volnosti: a – realizace pohybu po přímce (pracovní prostor úsečka); b – pohyb po kružnici (pracovní prostor kružnice nebo oblouk)

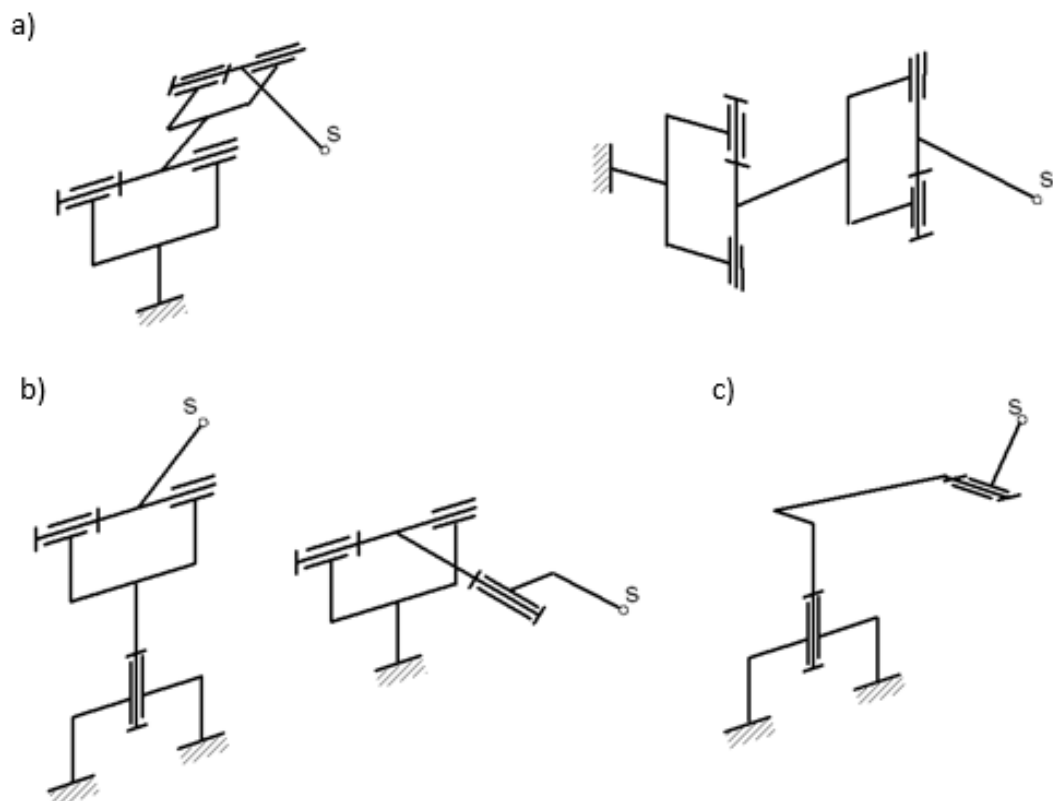




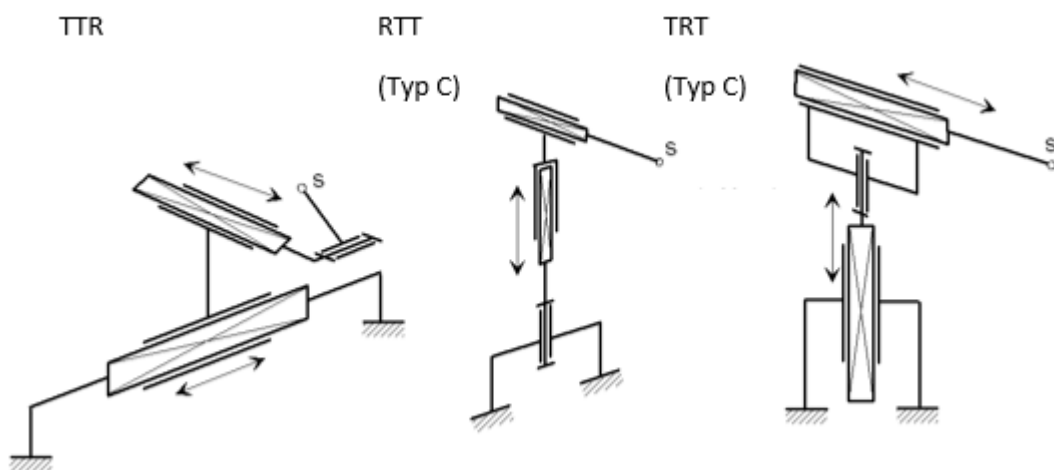
Obr. 3.8 Příklad nestejnorodých struktur se 2° volnosti: a – pracovní prostor část roviny; b – pracovní prostor na válcové ploše



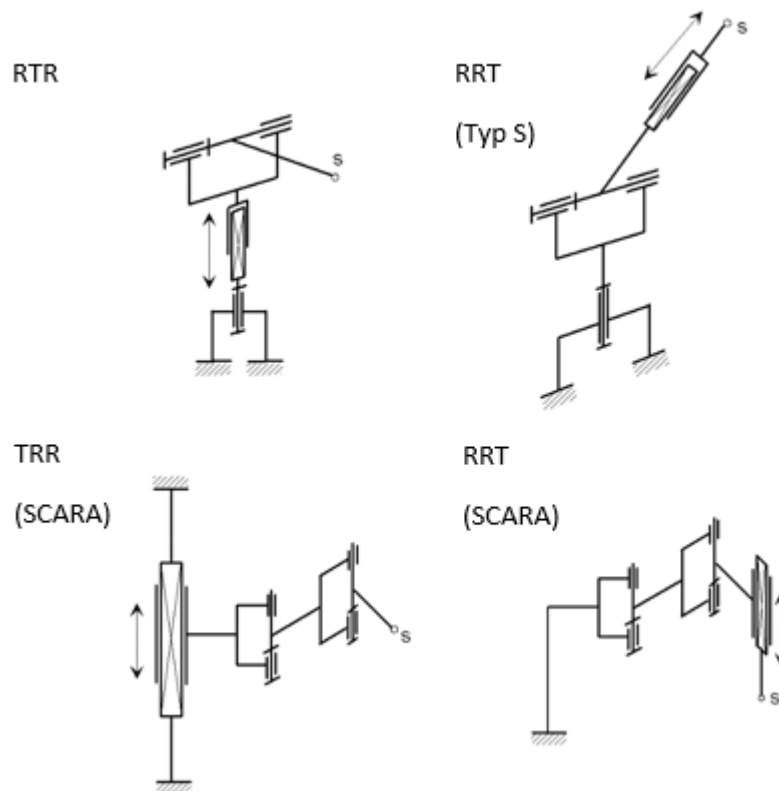
Obr. 3.9 Příklad stejných struktur se 2° volnosti s translačními kinematickými dvojicemi



Obr. 3.10 Příkladů stejnorodých struktur se dvěma rotačními jednotkami ( $2^\circ$  volnosti): a – dráha objektu v rovině; b – dráha objektu na sférické ploše; c – povrch anuloidu



Obr. 3.11 Příkladů struktur polohovacího ústrojí průmyslových robotů – kinematické řetězce se  $3^\circ$  volnosti



Obr. 3.12 Příkladů struktur polohovacího ústrojí průmyslových robotů – kinematické řetězce se 3° volnosti

Konstrukční řešení účelových robotů a manipulátorů vyžaduje v rámci úvodních úvah o koncepci zařízení velmi přesnou představu o požadovaném manipulačním prostoru a způsobu jeho zajištění kinematickým řetězcem polohovacího ústrojí. Je tedy nutné se zabývat úlohou zakreslení manipulačního prostoru pro zadaný kinematický řetězec a také obrácenou úlohou, umět pro zadaný pracovní prostor sestavit kinematický řetězec pro jeho obsluhu. Tři stupně volnosti polohovacího ústrojí umožňují uvažovat o dosažení polohy těžiště objektu, nikoliv jeho náležitou orientaci v prostoru, k tomu je nutné doplnit řetězec robotu o tzv. orientační ústrojí vhodné koncepce.

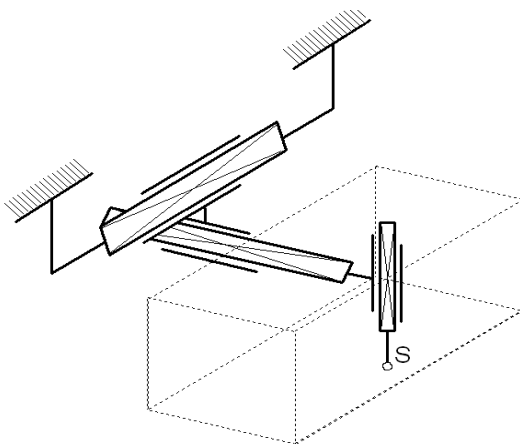
### 3.1.2.2 Základní koncepce kinematické struktury univerzálních PR

Z celé obrovské škály kinematických struktur je renomovanými výrobci univerzálních robotů přednostně využíváno 5 základních struktur kinematických řetězců polohovacího ústrojí PR, resp. šest se započítáním paralelní struktury:

1. typ kartézský,
2. typ cylindrický,
3. typ sférický,
4. typ angulární,
5. typ SCARA,
6. paralelní struktury robotů.

Tyto struktury mají určité výhody pro praktické aplikace. Následující klasifikace si všímá jejich vazby na souřadný systém [18, 25] a ukazuje pracovní prostor obsáhnutý v důsledku pohyblivosti podél jednotlivých os v rozsahu daném výrobcem robotu. V následném přehledu jsou uvedeny jejich nejvýznamnější charakteristiky:

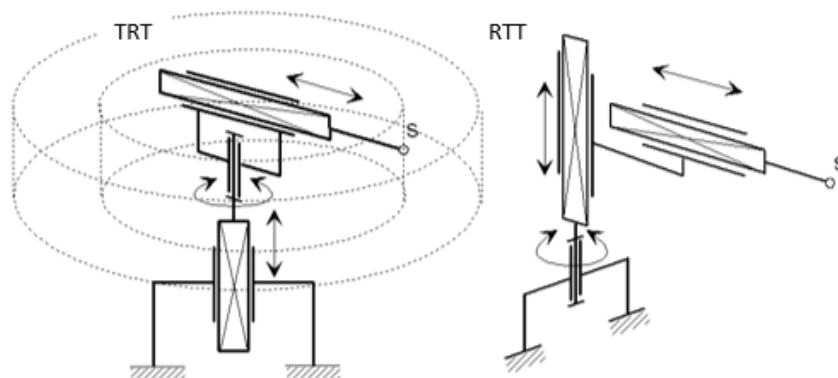
**1. Typ kartézský** (Obr. 3.13) má polohování odvozeno od kartézského souřadného systému a kinematický řetězec  $TTT$  je složený ze tří na sebe kolmých translačních jednotek. Pracovním prostorem je hranol. Jednotlivé pohybové jednotky jsou konstrukčně většinou složitější, větší a těžší ve srovnání s rotačními jednotkami. Výhodou je vysoká tuhost a přesnost polohování, která nezávisí na místě v pracovním prostoru. Struktura umožňuje konstrukční řešení pro velký pracovní prostor a je též výhodná pro stavebnicovou konstrukci.



Obr. 3.13 Polohovací ústrojí robotu kartézského typu

Trend: Podíl manipulátorů a robotů s touto koncepcí roste.

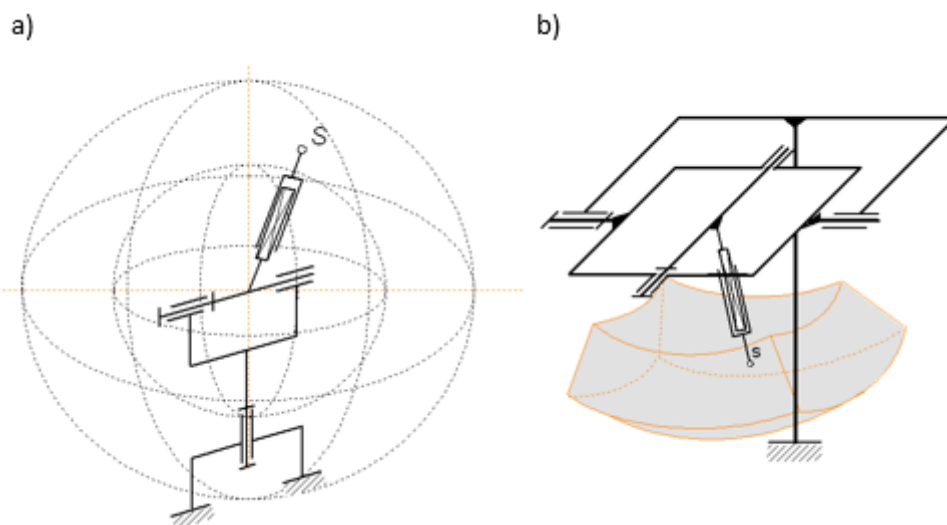
**2. Typ cylindrický** (válcový) má polohovací ústrojí (Obr. 3.14) tvořeno řetězcem TRT resp. RTT a obsahuje vertikální a horizontální translační jednotku a osa rotace rotační jednotky je svislá. Jednotky jsou nejčastěji s pneumatickými pohony a s PTP (point to point, sekvenčním) řízením. Pracovním prostorem je válcový prstenec. Řada manipulátorů a jednoduchých robotů je právě této koncepce. Z hlediska konstrukce je časté modulární řešení.



Obr. 3.14 Polohovací ústrojí robotu cylindrického typu

**Trend:** V souvislosti s ústupem hnízdového (pilotového) uspořádání robotizovaných technologických pracovišť a upřednostňováním lineárního layoutu pružných výrobních systémů podíl těchto robotů na celkové produkci spíše klesá.

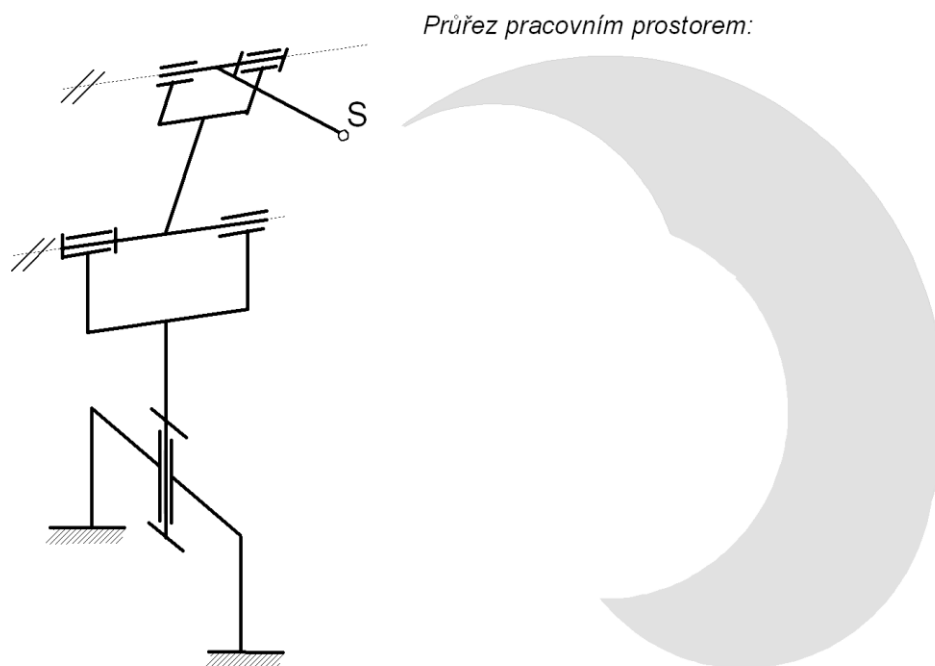
**3. Typ sférický (polární)** má polohovací ústrojí (Obr. 3.15) tvořeno kinematickým řetězcem RRT, přičemž obě rotační pohybové jednotky mají osy na sebe kolmé a translace se děje vždy ve směru kolmém na prostřední rotaci. Takto tvořený řetězec pak modeluje sférický souřadný systém. Tato struktura byla použita poprvé začátkem 70. let pro servořízené roboty firmy Unimate a postupně doznala značného rozšíření pro technologické aplikace v automobilovém průmyslu.



Obr. 3.15 Polohovací ústrojí robotu sférického typu: a – koncepce Unimation; b – koncepce ABB

**Trend:** Tato struktura je dnes takřka úplně nahrazena výhodnější strukturou angulární.

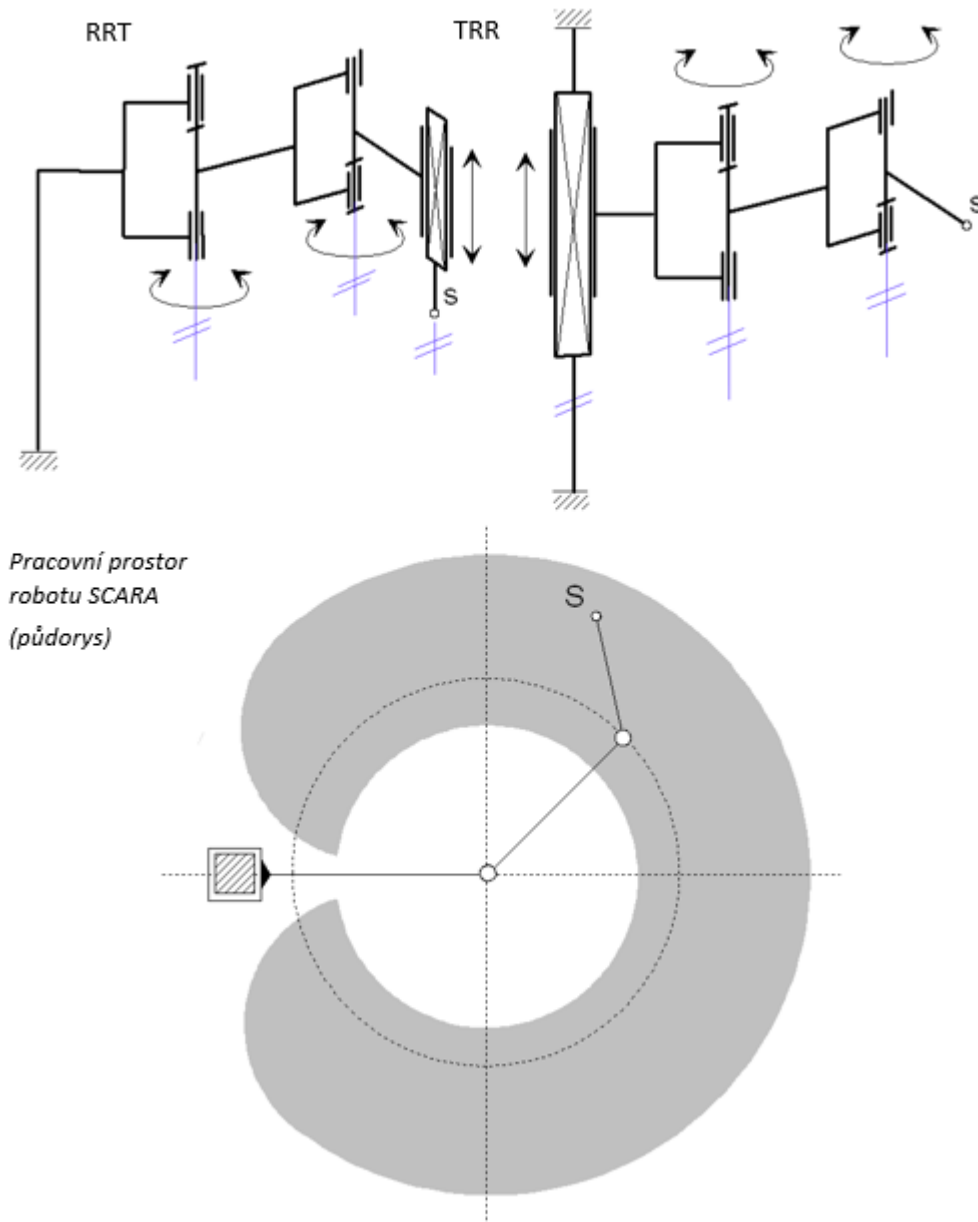
**4. Typ angulární (antropomorfní, multiúhlový, kloubový)** je tvořen polohovacím ústrojím ze tří rotačních jednotek RRR (Obr. 3.16), rotace kolem svislé osy a zbývající osy jsou vodorovné a rovnoběžné. Využívá složený souřadnicový systém, protože se orientace mění ve třech osách, je nutné úplné orientační ústrojí se 3° volnosti. Pracovní prostor má širokou variabilitu v závislosti na rozsahu pohyblivosti a rozměrech pohybových jednotek. Výhodou je anatomičnost a pracovní prostor dovoluje pracovat poblíž osy z, má velmi dobrou manévrovací schopnost (schopnost vyhýbat se překážkám) a vysoký koeficient obslužnosti v celém manipulačním prostoru. Je výhodný pro technologické aplikace, je jednoznačně aplikováno dráhové řízení a především elektrické servopohony.



Obr. 3.16 Polohovací ústrojí angulárního robotu

**Trend:** celkový podíl robotů tohoto typu na celkovém počtu vyráběných průmyslových robotů trvale roste a v současné době činí více než 2/3 aplikací.

**5. Typ SCARA** (z angl. System Compliance Assembly Robot Arm) má polohovací ústrojí (Obr. 3.17) speciálně vyvinuté pro aplikace v automatické montáži, které je tvořeno kinematickým řetězcem TRR, resp. RRT, přičemž všechny pohybové osy jsou svislé a vzájemně rovnoběžné. Tato pohybová struktura mění orientaci objektu pouze natočením kolem osy z a její plná kompenzace je možná připojením jediné rotační pohybové jednotky. Struktura je výhodná pro montážní i technologické účely s možností přesného polohování (běžná přesnost  $\pm 0,05$  mm) a značných rychlostí v horizontální rovině (běžně  $4 - 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Pohony jsou dnes výhradně tvořeny elektrickými BLDC servopohony a je zde aplikováno dráhové CNC řízení a obvykle je produkce orientována na nosnosti 5 až 10 kg.



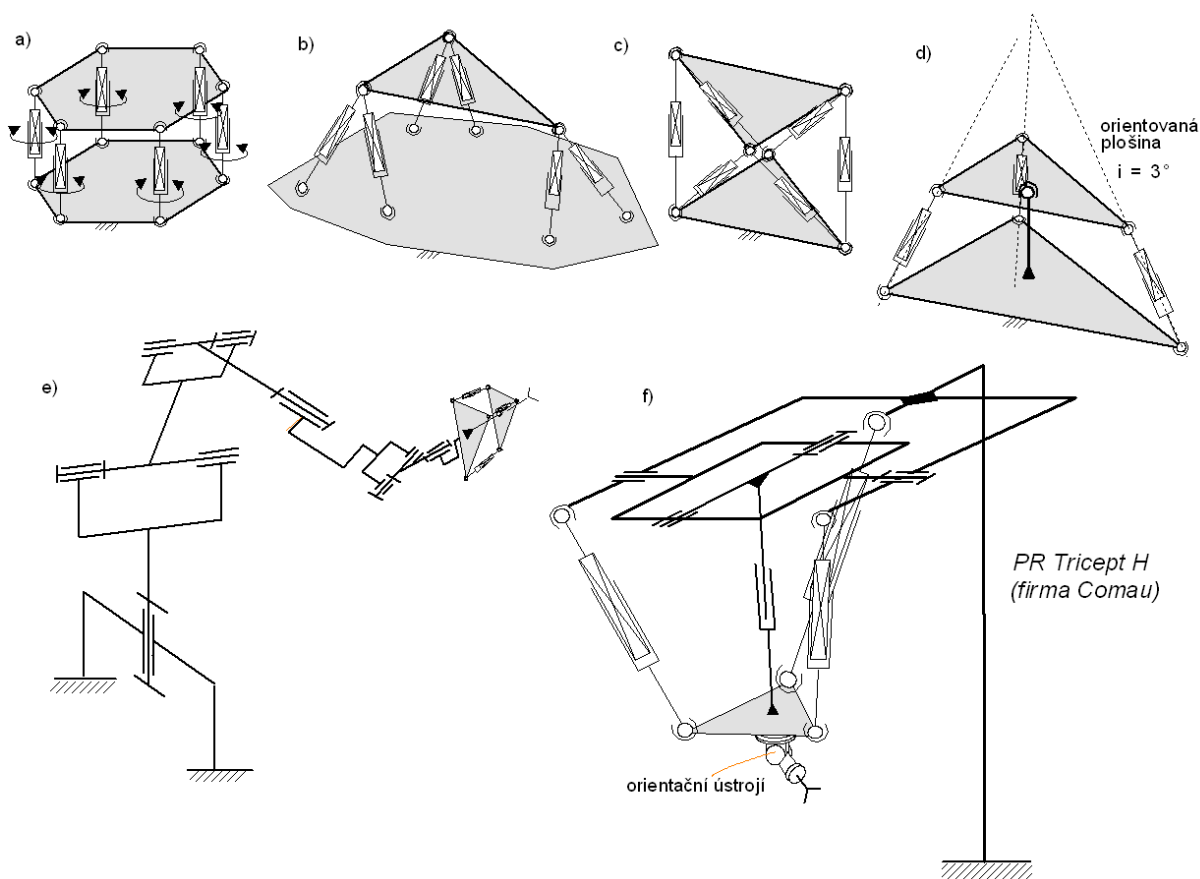
Obr. 3.17 Polohovací ústrojí robotu typu SCARA

**Trend:** V souladu s rozvojem montážních aplikací podíl v posledních 10 letech výrazně roste a dosahuje cca 15 – 20% podílu na trhu robotů.

## 6. Paralelní struktury robotů

V poslední době nalézají uplatnění tzv. paralelní struktury kinematických řetězců, které vzniknou obecně připojením výstupních členů soustavy na rám prostřednictvím několika klasických sériových řetězců. V praxi se pak přednostně uplatňují různé variace Stewartovy plošiny [30, 31], v současnosti nejčastěji v hexapodním uspořádání (z lat. Hexapod = šestinožec). Toto uspořádání obsahující posuvnou kinematickou dvojici a připojené na rám pomocí sférických kinematických dvojic

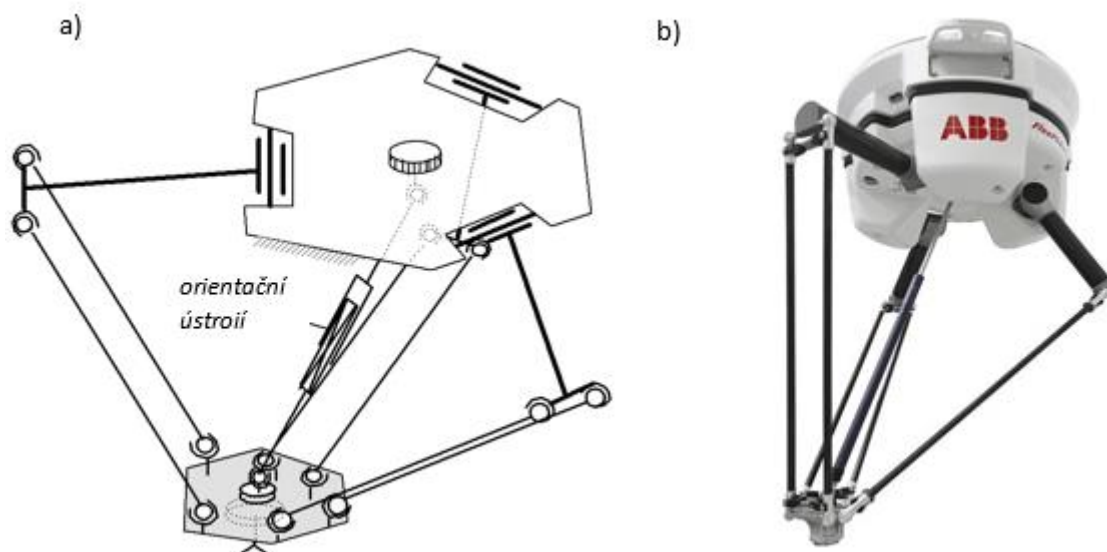
dává plošině 6° volnosti (výpočet  $i = 6 \cdot (14 - 1) - 5 \cdot 6 - 3 \cdot 12 = 12^\circ$  a po odečtení 6 nadbytečných rotací  $i_{SK} = 6^\circ$ ). Připojením plošiny na rám pomocí sférického uložení odebereme struktuře 3° volnosti a dostáváme tzv. orientovanou plošinu (Obr. 3.18 d, e), která má výhodné aplikační vlastnosti v systémech pasivní i aktivní kompenzace chyb prostorové orientace a s výhodou nalézá uplatnění také v realizaci automatické montáže. Variace struktur b) a c) jsou současným trendem v novém koncepčním řešení obráběcích center (firmy Geodetics a Intersoll).



Obr. 3.18 Princip aplikace paralelních kinematických struktur: a – princip Stewartovy plošiny; b, c – výhodnější varianty; d – orientovaná plošina; e, f – příklady aplikace u PR

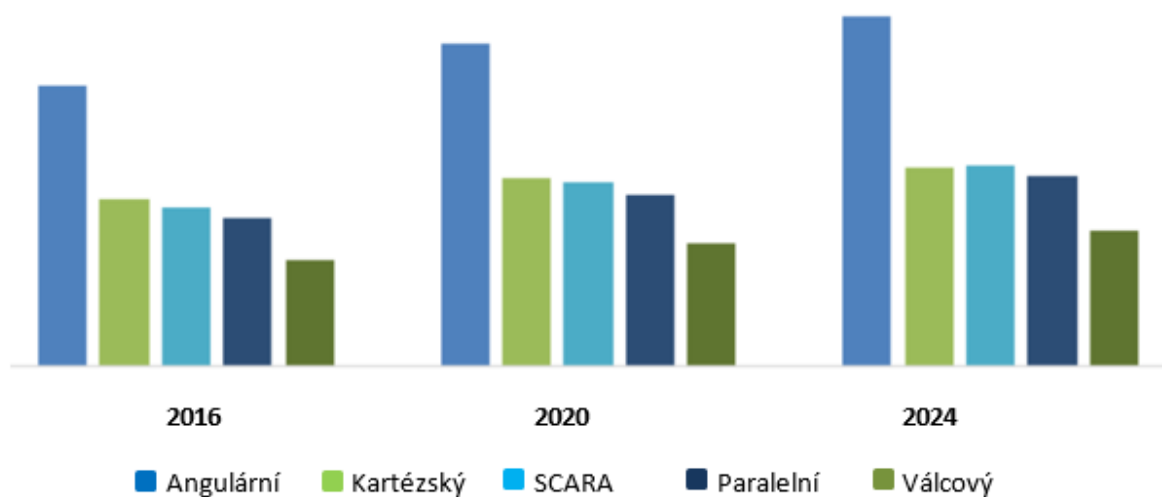
Paralelní struktura podle Obr. 3.18 f s částečně paralelním uspořádáním (v polohovacím ústrojí soustavové skupiny tvořené teleskopy s pohybovými šrouby a BLDC servopohony, orientační ústrojí je klasické koncepce) je prvním reprezentantem této progresivní koncepce v oblasti PR (firma Comau). Další častou strukturou aplikovanou pro jednoduchou rychlou manipulaci je tzv. DELTA robot (U.S. patent 4976582), dnes je uvedená koncepce (Obr. 3.19) aplikována řadou firem.





Obr. 3.19 Princip realizace DELTA robotu: a – schéma DELTA robotu; b – ukázkové provedení Flex Picker (firma ABB)

Uvedené základní koncepce jsou aplikovány výrobci a dodavateli univerzálních robotů, ale i zde je patrný vývoj v rozšiřování nabídky modifikovaných struktur pro vybranou třídu aplikací, popř. k zlepšení technických parametrů dodávaných zařízení. Poměr v počtech nasazených robotů jednotlivých typů je patrný z Obr. 3.20.



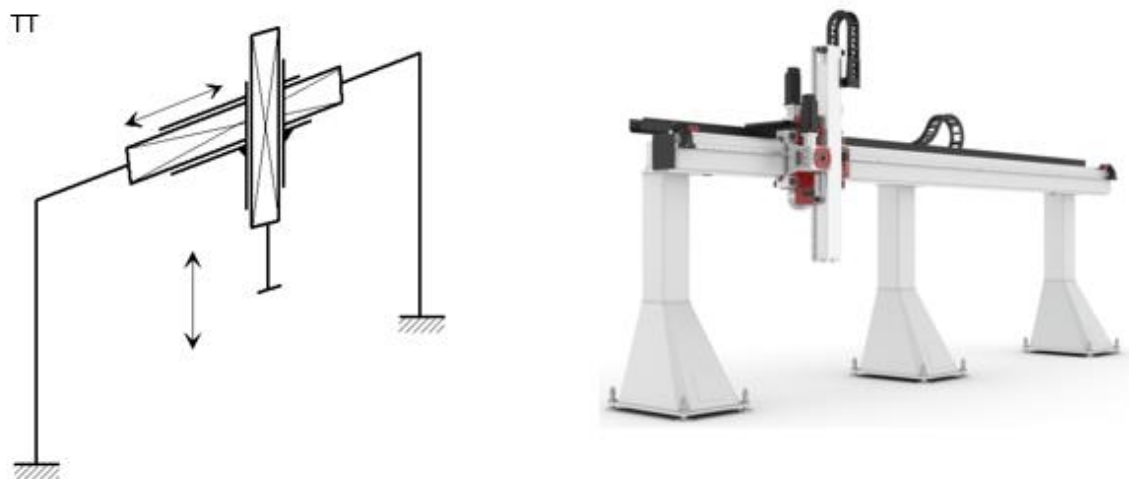
Obr. 3.20 Přehled počtu nasazených robotů jednotlivých typů

Koncepce strukturálního uspořádání kinematického řetězce účelových manipulátorů bývá ve větší míře podřízena konkrétní aplikaci. V současné době jsou též široce aplikovány modulární manipulátory, které mají širokou variabilitu v koncepci kinematického řetězce a v konstrukčním provedení jednotlivých pohybových jednotek.

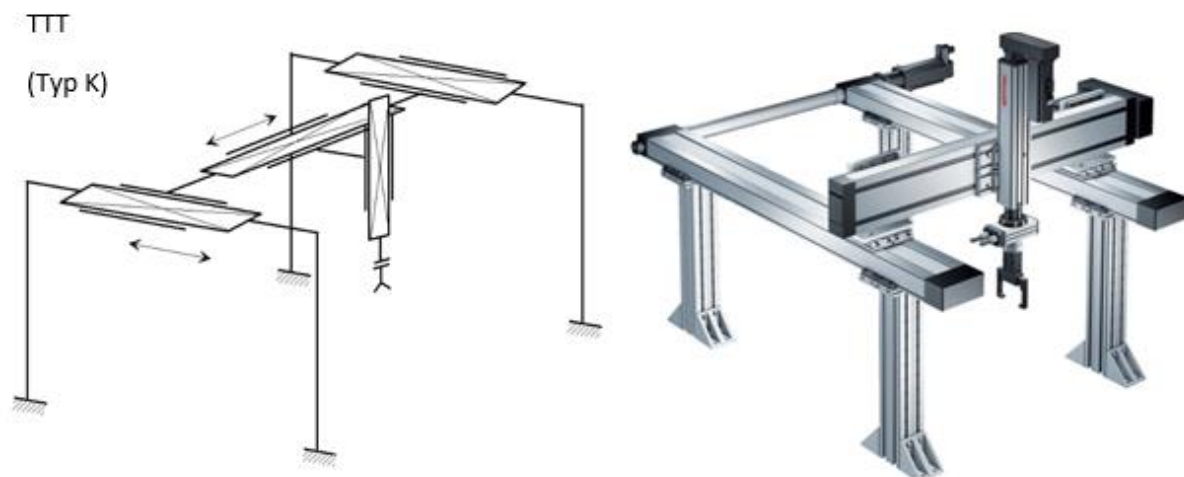
Cílem této kapitoly bylo ukázat souvislost mezi kinematickým řetězcem robotů, jejich vlastnostmi, aplikačními možnostmi a vhodností pro použití příslušného typu pohonu. Je požadována orientace v této problematice a schopnost na první pohled umět rozpoznat základní typy struktury průmyslových robotů. Příklady jsou uvedeny v následující kapitole.

### 3.1.2.3 Příklady robotů a jejich strukturálních schémat

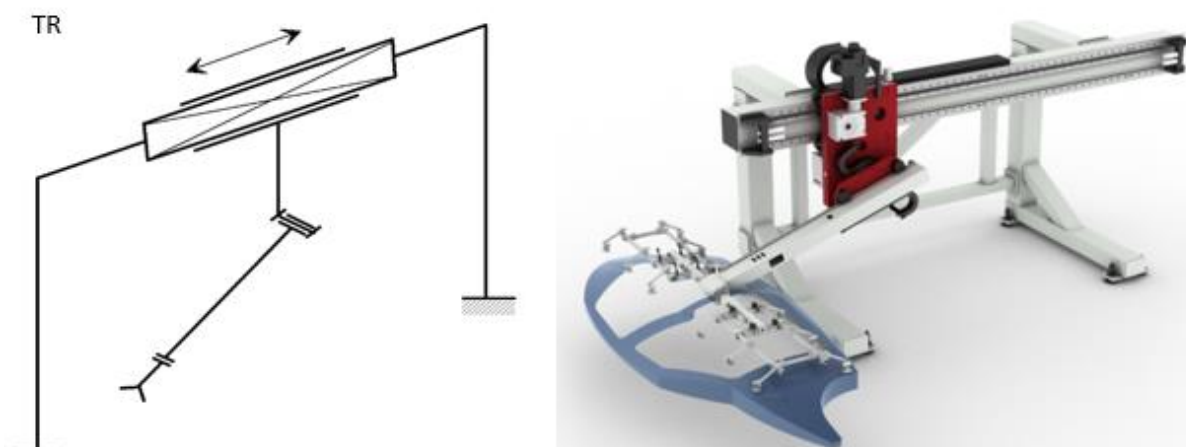
Příklady provedení robotů a jejich strukturálních schémat jsou uvedeny na Obr. 3.21 až Obr. 3.27.



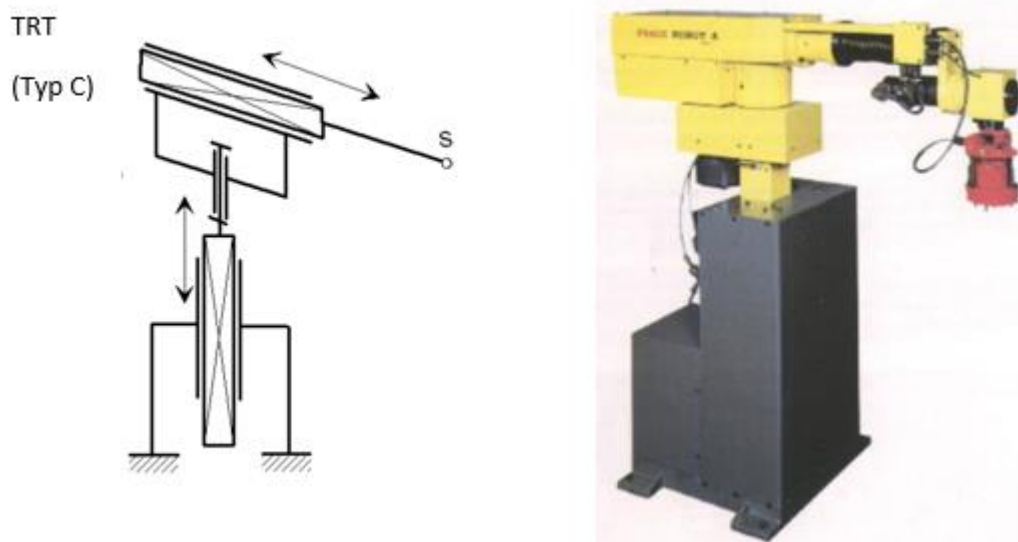
Obr. 3.21 Struktura a provedení robotů s 2° volnosti a kinematickým řetězcem TT



Obr. 3.22 Struktura a provedení robotů s 3° volnosti a kinematickým řetězcem TTT

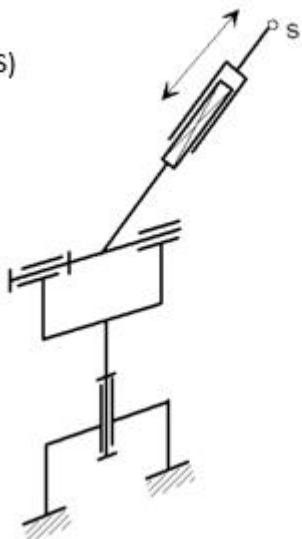


Obr. 3.23 Struktura a provedení robotů s 2° volnosti a kinematickým řetězcem TR



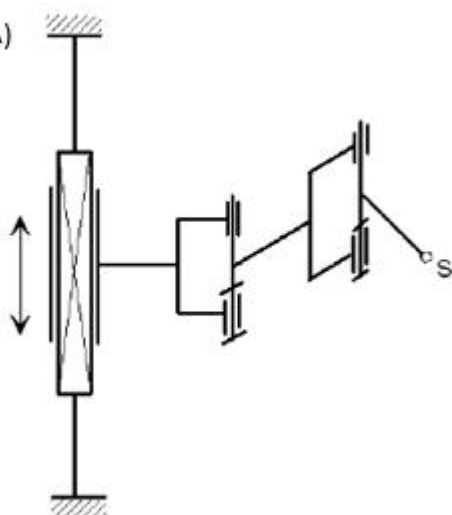
Obr. 3.24 Struktura a provedení robotů s 3° volnosti a kinematickým řetězcem TRT

RRT  
(Typ S)



Obr. 3.25 Struktura a provedení robotů s 3° volnosti a kinematickým řetězcem RRT

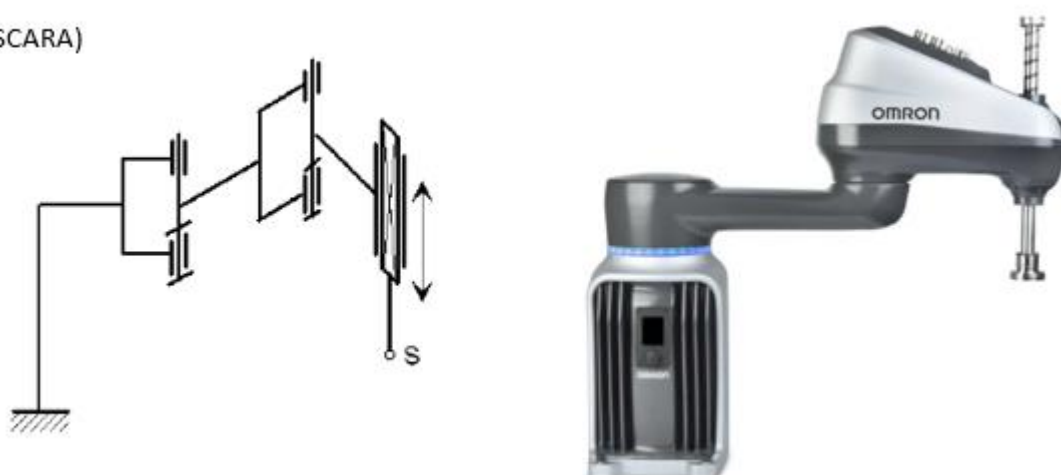
TRR  
(SCARA)



Obr. 3.26 Struktura a provedení robotů s 3° volnosti a kinematickým řetězcem TRR

RRT

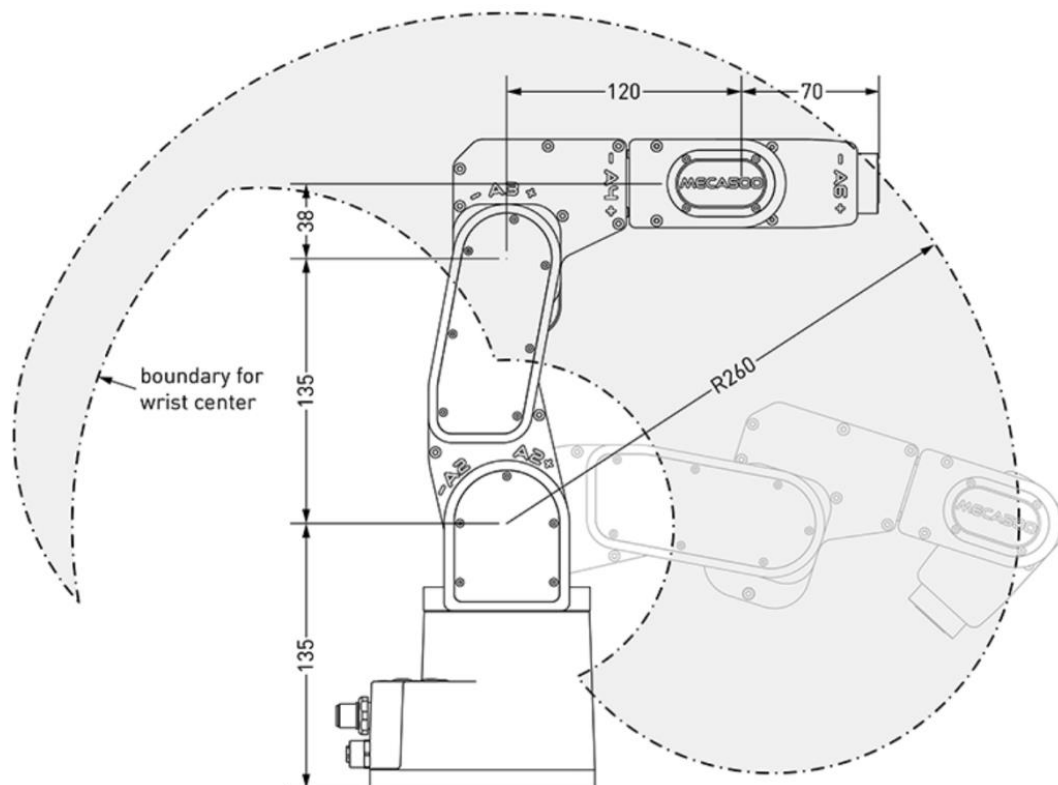
(SCARA)



Obr. 3.27 Struktura a provedení robotů s 3° volnosti a kinematickým řetězcem RRT

### 3.1.3 Manipulační prostor a manipulační možnosti

Základní popis manipulačních možností je dán pracovním prostorem, který charakterizuje objem, v kterém lze plnit manipulační a technologické úkoly [32]. Pracovní (manipulační, pohybový) prostor PR je prostor v nepohyblivém souřadném systému, který robot obsáhne svým koncovým členem podle definice výrobce, Obr. 3.28. Tento prostor se poněkud zvětší připojením efektoru (chapa) a uchopeným objektem, pracovní (pohybový) prostor s efektozem a objektem (Obr. 3.29).



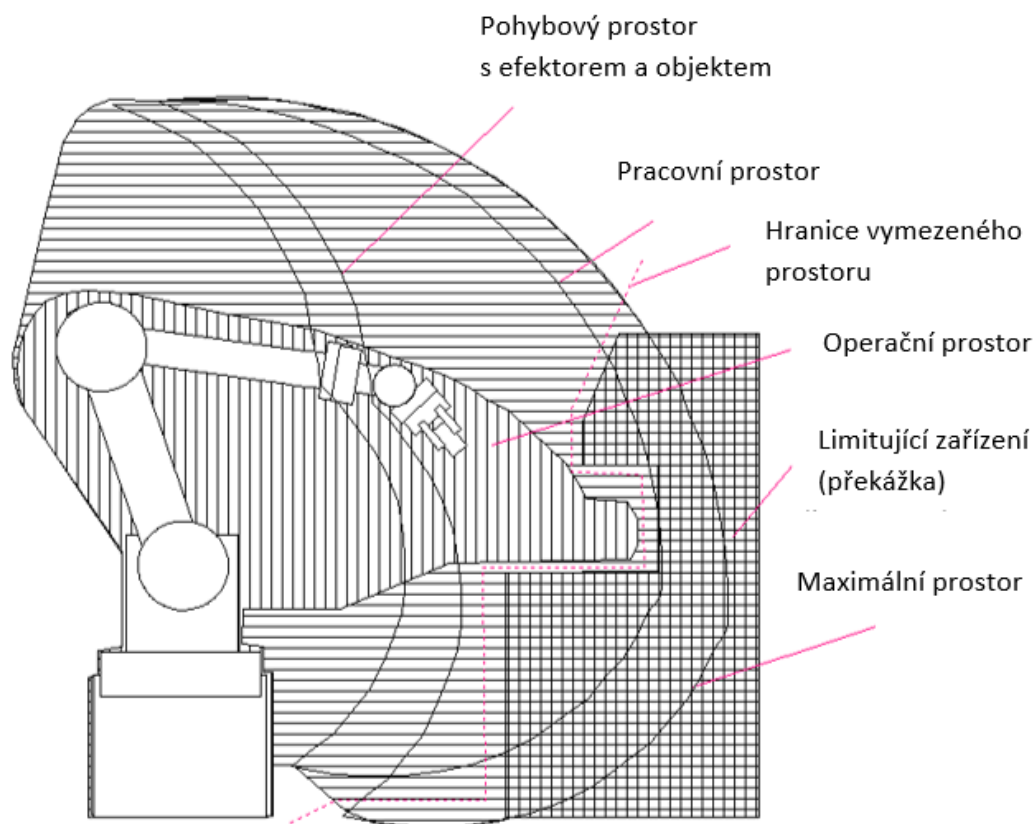
Obr. 3.28 Příklad: řez pracovním prostorem robotu angulárního/antropomorfního typu

Samotný PR svou stavbou a pohybové části robotu aktivně zasahující mimo tento prostor mohou způsobovat kolizi s dalšími zařízeními v rámci robotizovaného technologického pracoviště (RTP) – kolizní prostor.

Maximální prostor je pak sjednocením pracovního (pohybového) prostoru s efektem a objektem a kolizního prostoru.

V rámci RTP je pak nutné tento prostor redukovat s ohledem na limitující zařízení, které tvoří překážky v maximálním prostoru tak, aby nedošlo ke kolizi – vymezený prostor.

Operační prostor je pak ta část vymezeného prostoru skutečně využívaná pro danou manipulační nebo technologickou úlohu při provozu PR.

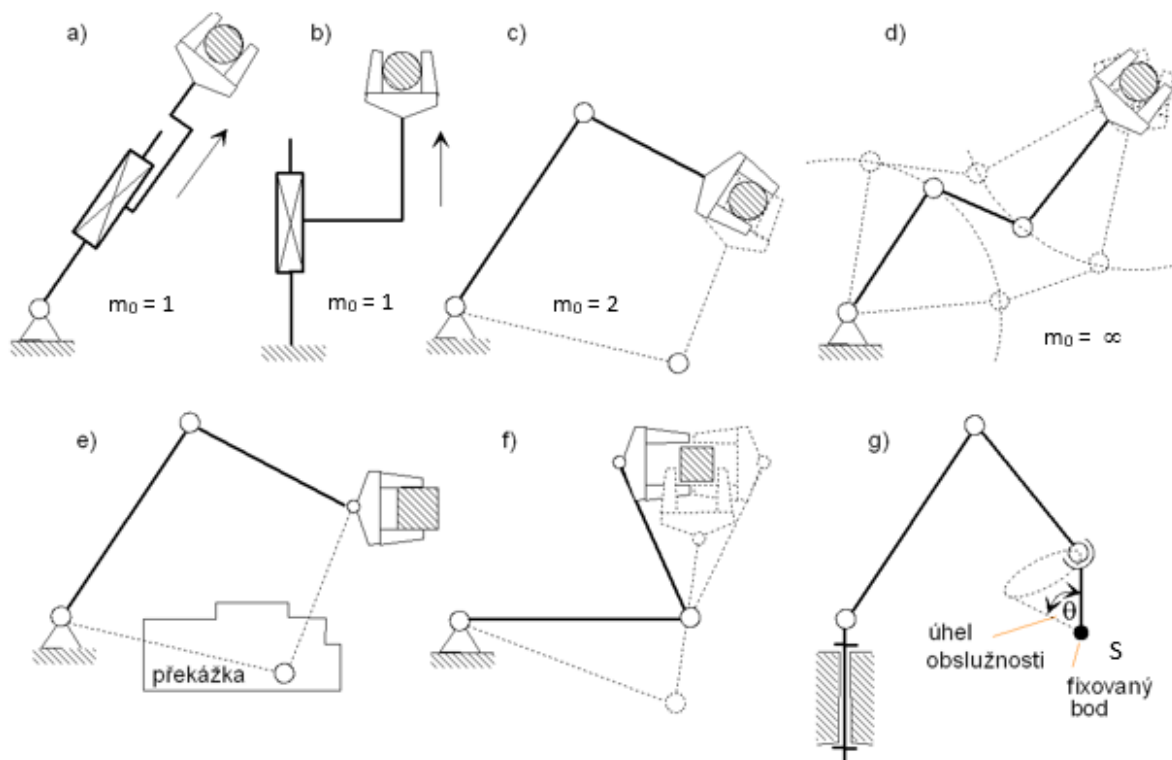


Obr. 3.29 Definice pracovních prostorů PR

Vzhledem k tomu, že definovaný pracovní prostor není z hlediska manipulačních možností rovnocenný, je nutné provést jeho podrobnější popis. Manipulační možnosti PR lze hodnotit:

- schopností "obcházet překážky" – tzv. manévrovací schopnost (Obr. 3.30 e);
- schopností uchopovat objekt z různých směrů (lze popsat četností dosažitelnosti, úhlem, resp. koeficientem obslužnosti).

Četnost dosažitelnosti  $m_0$  je dána počtem konfigurací polohy, kterými lze dosáhnout zvoleného bodu a je podmíněna jednak zvolenou strukturou kinematického řetězce, jednak souřadnicemi zvoleného bodu v pracovním prostoru. Obecně lze říci, že vnitřek pracovního prostoru má lepší předpoklady pro vyšší četnost dosažitelnosti než okraje. Zatímco u jednoduchých manipulátorů jsou s nižším počtem stupňů volnosti manipulační možnosti omezené, u robotů s úplným orientačním ústrojím a 4° až 6° volnosti se četnost obsluhy zvyšuje (Obr. 3.30 a – d).



Obr. 3.30 Charakteristiky obslužnosti: a až d – četnost obslužnosti; e – schopnost obcházet překážky – manévrovatelnost; f – uchopování objektů z různých směrů; g – úhel obslužnosti

Pro zhodnocení manipulačních schopností PR se často využívá metoda objemových studií, kdy se pracovní prostor rozdělí vhodnými řezy na elementární objemy a uvnitř nich je kontrolována obslužnost. Vhodným postupem je sestrojení kartogramu obsluhovaných ploch (řezy s konstantní vzdáleností rovnoběžnými rovinami kolmo na souřadné osy a sestrojenými plochami s konstantní četností dosažitelnosti), jinou možností je kvantifikace obslužnosti pomocí tzv. úhlu obslužnosti anebo koeficientu obslužnosti.

Úhel obslužnosti  $\theta$  je prostorový úhel, který opisuje osa efektoru při pohybu kolem nehybného bodu M (Obr. 3.30 g).

Koeficient obslužnosti  $K$  je relativní číselné vyjádření obslužnosti, které dovoluje výstižně porovnání různých míst pracovního prostoru PR.

$$K = \theta / 4\pi \quad (3.3)$$

Uvedené charakteristiky závisí na kinematické struktuře, rozsahu pohyblivosti jednotlivých kinematických dvojic, konstrukčních parametrech PR a tím na poloze bodu M v pracovním prostoru.

Zhodnocením v jednotlivých elementárních objemech lze obdržet "mapu" obslužnosti pracovního prostoru a dle ní volit umístění pracovních operací v nejuhodnější zóně obsluhy, kde  $\bar{K}_\ominus \Rightarrow \{\max\}$ .

### 3.1.4 Požadovaná přesnost polohování

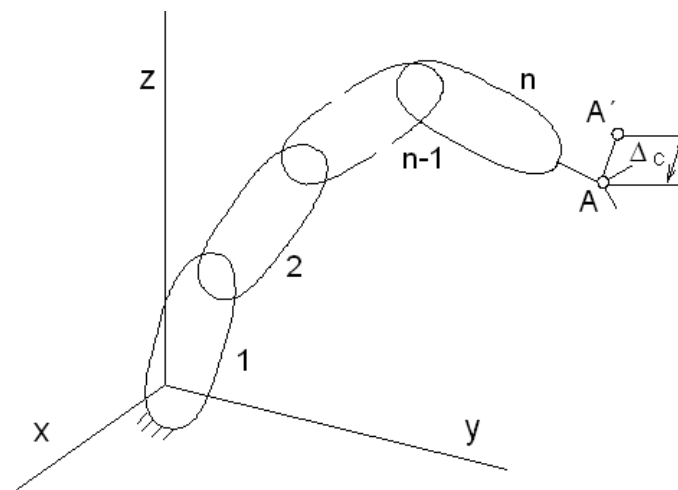
Přesnost polohování PR a M je ovlivněna řadou vlivů, zejména závisí na:

- strukturální konfiguraci kinematického řetězce;
- mechanické stavbě;
- druhu a uspořádání pohonu;
- způsobu a vlastnostech řízení.

Celková chyba polohování (Obr. 3.31) je určena odchylkou skutečné (bod  $\underline{A}'$ ) a žádané (bod  $\underline{A}$ ) polohy zvoleného (nejčastěji koncového) bodu při polohování objektu [33]

$$\Delta_c = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (3.4)$$

Její velikost je obecně závislá na rozměrových tolerancích a úchytkách tvaru a polohy jednotlivých prvků mechanické stavby PR/M a skutečnými vůlemi v transformačních blocích (převodech) pohonů a v uložení (kinematických dvojicích), přičemž právě tyto vůle jsou pro velikost polohové chyby většinou rozhodující.



Obr. 3.31 Přesnost polohování průmyslového robotu

Opakovatelná přesnost nastavení požadované polohy se pohybuje u nejpřesnějších (montážních) robotů v setinách milimetru (v rozmezí  $\pm 0,01$  až  $\pm 0,03$  mm). Běžné hodnoty přesností u manipulačních a technologických robotů jsou řádově v desetinách mm, u robotů pro povrchové úpravy a u manipulátorů lze vystačit s přesnostmi 0,5 až 1,0 mm.

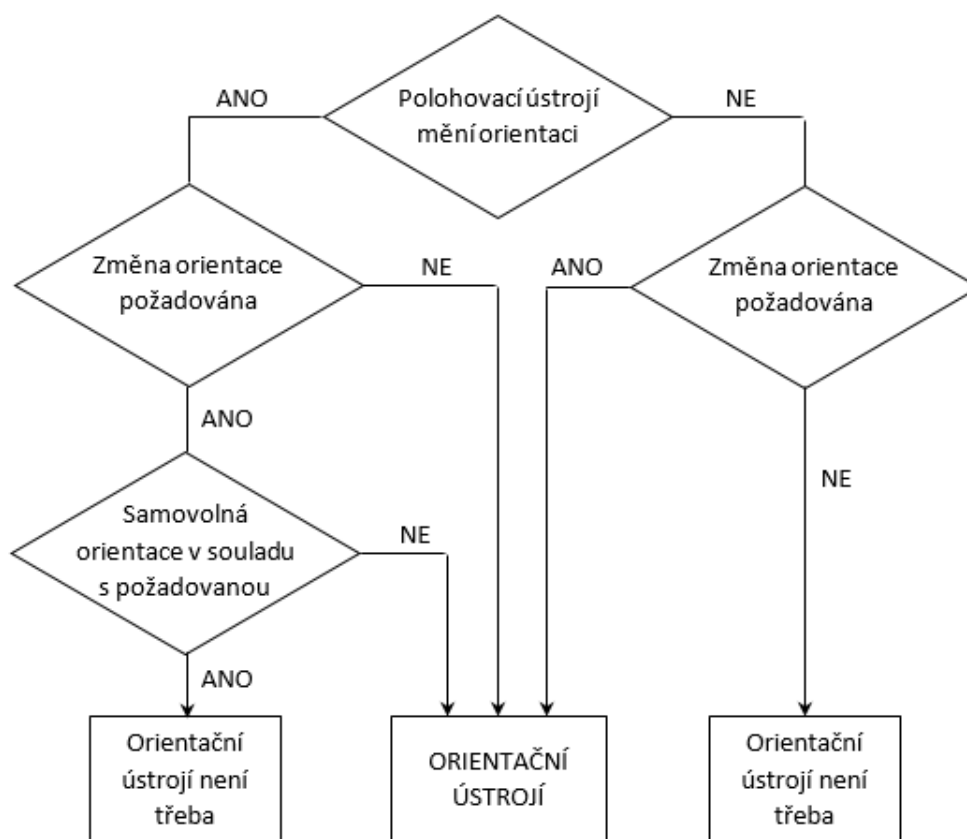
### 3.1.5 Orientace objektu

Nároky na orientaci objektu v prostoru jsou dány příslušným aplikačním nasazením PR [34], např. při manipulaci vazbou na výrobní stroje a periferní prostředky, při technologickém nasazení

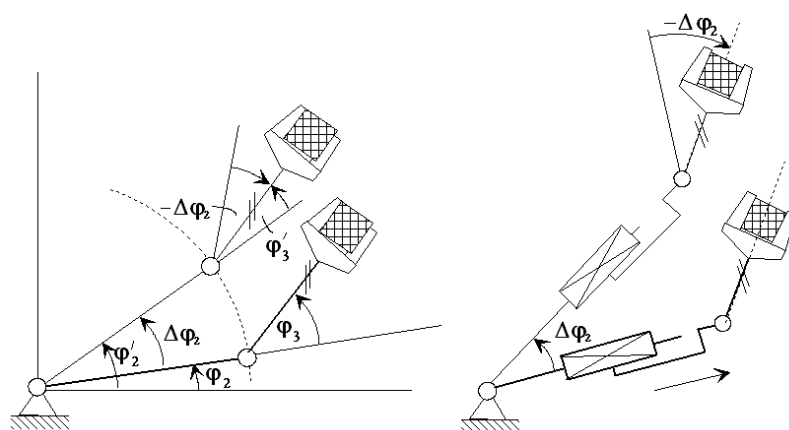


jsou požadavky na orientaci technologické výstupní hlavice podmíněny realizovanou technologií a uspořádáním robotizovaného technologického pracoviště, obdobně při montáži jsou vysoké nároky na orientaci objektů dány druhem a vlastnostmi spojovaných párů a vnitřním uspořádáním montážní buňky.

Náležitou orientaci objektu vůči nehybnému souřadnému systému zajišťuje v kinematickém řetězci PR tzv. *orientační ústrojí*. Každá změna polohy těžiště objektu, která je prováděna polohovacím ústrojím s rotačními kinematickými jednotkami, vede ke změně orientace objektu v prostoru. Má-li vést orientační ústrojí ke změně orientace objektu, resp. zachovat výchozí orientaci, je nutnost a rozsah pohyblivosti orientačního ústrojí podmíněn vlastnostmi polohovacího ústrojí (Obr. 3.32).

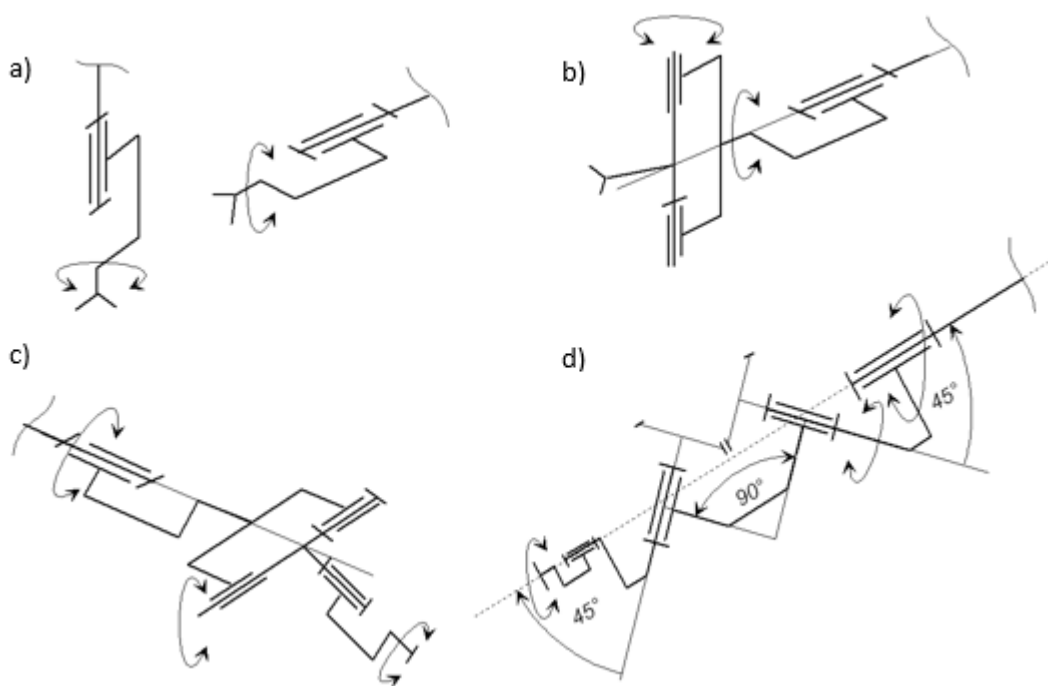


Obr. 3.32 Přehled požadavků realizace orientačního ústrojí



Obr. 3.33 Příklady kompenzace samovolné změny orientace

Jestliže má orientační ústrojí plně kompenzovat samovolnou změnu orientace, musí obsahovat stejný počet rotačních kinematických dvojic, které jsou obsaženy v polohovacím ústrojí. Kompenzační úhel natočení orientační rotační jednotky je pro tento případ stejně velký jako úhel natočení příslušné rotační pohybové jednotky polohovacího ústrojí, avšak v opačném smyslu (Obr. 3.33).



Obr. 3.34 Kinematické struktury orientačního ústrojí: a – 1° volnosti; b – 2° volnosti; c – 3° volnosti, osy rotačních jednotek kolmé; d – 3° volnosti, osy rotačních jednotek speciální konstrukce

Podle specifických požadavků dané aplikace může být orientační ústrojí částečné, úplné (příklady na Obr. 3.34) anebo rozšířené, tj. takové, které kromě tří rotačních kinematických dvojic

obsahuje navíc také posuvové jednotky pro realizaci mikroposuvů. Tyto rozšiřující jednotky mohou být komponovány jako rozšíření efektoru (podrobněji [35]).

### 3.2 Přehled pneumatických pohonů pro automatizační techniku

Využití stlačeného vzduchu má své pevné místo v použití pro pohony, řízení a regulaci [36, 37, 38]. Stlačený vzduch je stále více používán a je neodmyslitelnou součástí řady manipulátorů a dalších mechanismů.

**Obecně se pneumatické pohony používají tam, kde stačí malé až střední síly a je třeba rychlý pohyb s vysokou frekvencí.** Lineární pohyby malých pneumatických válců nebo úchopných hlavice mají malé momenty setrvačnosti a proto umožňují rychlé reakce mechanismů. Stlačený vzduch má mnohostranné využití. Často se využívá v konstrukci a stavbě přípravků, balících, výrobních strojů a linek ve většině průmyslových odvětví, např. textilním, strojírenském, dřezpracujícím, potravinářském průmyslu atd. [39]. Jedná se tak o využití jako pohonů a o využití při manipulaci s materiálem, kde lze využít uchopovací hlavice nebo vakuové přísavky vhodné k uchopení výrobku různých materiálů a tvarů.

Pneumatické pohony využívají energii stlačeného vzduchu. Vzduch o atmosférickém tlaku je nasáván kompresorem, kde je následně stlačován na požadovaný tlak. Na výstupu z kompresoru bývá zpravidla regulační člen, který zajišťuje požadované nastavení tlaku v rozvodu. Poté je stlačený vzduch distribuován potrubním rozvodem až k odběrným místům, kde je dále regulován. Pneumatické pohony jsou z velké části používány pro lineární, otočný nebo kyvný pohyb.

Základní vztah pro pneumatické pohony je výpočet fyzikální veličiny tlaku:

$$p = \frac{F}{S_p} \quad (3.5)$$

kde  $p$  je tlak [Pa],  $F$  je síla [N] a  $S_p$  je plocha [m<sup>2</sup>]. Používanými jednotkami tlaku je také bar (1 bar = 0,1 MPa). Pneumatické rozvody v průmyslové praxi používají nejčastěji tlaku 0,6 MPa (6 bar).

Vlastnosti stlačeného vzduchu jsou:

- **Dostupnost**, stlačený vzduch je ve většině podniků k dispozici. Pojízdne kompresory umožňují jeho využití mimo provozovny a výroby.
- **Skladování**, velké objemy stlačeného vzduchu lze bez problémů skladovat.
- **Jednoduchá konstrukce**, pneumatické prvky mají jednoduchou konstrukci a lze z nich sestavit jednoduché řídicí obvody pro automatizaci strojů a zařízení.
- **Řízení proudu a tlaku**, rychlost pneumatického motoru lze jednoduše nastavit přestavením jehly škrticího ventilu, sílu přestavením regulátoru tlaku vzduchu.
- **Trvanlivost při malých nárocích na údržbu**, pneumatické motory a řídicí systémy prakticky odolávají prostředí provozu a atmosférickým vlivům. Předpokladem je provoz s čistým stlačeným vzduchem, zbaveným před spotřebičem mechanických nečistot, vlhkosti a oleje.
- **Bez negativních vlivů na životní prostředí**, provoz pneumatických pohonů je čistý a při správném ošetření vyfukovaného vzduchu lze splnit příslušné normy pro provoz v čistém prostředí.

- **Bezpečnost**, pneumatické pohony se při provozu nezahřívají, a proto je možno je bez obav použít i ve výbušném prostředí. Při přetížení se pneumatické motory zastaví a mohou v tomto stavu setrvat neomezenou dobu, aniž by došlo k jejich poškození.
- **Velké zrychlení**, velké zrychlení umožňuje velká rozpínavost stlačeného vzduchu a malá hmotnost pohybujících se částí pneumatických motorů [39].

Výhody pneumatických obvodů jsou:

- možnost rozvodu na delší vzdálenosti,
- nepotřebuje odpadové větve rozvodu,
- možnost rychlých pohybů,
- snadná regulace.

Nevýhody pneumatických obvodů jsou:

- omezená síla,
- problematické dosažení pomalých, plynulých pohybů,
- nepřesné zastavování v mezipolohách [39],
- stlačitelnost vzduchu.

Tato kapitola je věnována základům pneumatických obvodů a jejich specifik v průmyslové praxi. Pro vysvětlení a pochopení zapojení pneumatických pohonů a návrh pneumatických obvodů je třeba nejprve zmínit základní značky a jejich význam pro funkci a správnou činnost pneumatického obvodu.

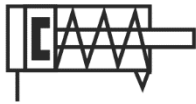
### 3.2.1 Přehled základních pneumatických značek

Součástí obvodu, využívajícího stlačený vzduch, jsou pneumatické válce, kyvné pohony, úchopné hlavice a pneumatické motory, které převádí energii stlačeného vzduchu na energii mechanickou, která je využívána k dopravě materiálu, jeho opracování, zajištění jeho polohy atd. K ovládní a řízení těchto pohonů jsou třeba další pneumatické prvky. Jednotky pro úpravu vzduchu, které stlačený vzduch filtrují a zbavují nečistot, regulují jeho tlak, případně jej přimazávají doporučeným olejem. Ventily řídí směr toku proudu vzduchu a tím i směr pohybu pneumatických pohonů a škrtkovými ventily rychlost proudění vzduchu a tím i rychlost pohybu pneumatických pohonů [39, 40].

Pneumatické značky jsou definovány a popsány v normě ISO 1219. V následující části jsou uvedeny přehledně základní značky a vysvětlen jejich význam (Obr. 3.35 až Obr. 3.40).<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Každá šipka na schematické značce znamená, že prvek má možnost seřizování!

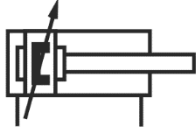


Pneumatické válce jednočinné (návrat do výchozí polohy pružinou) s magnetickým kroužkem pro ovládání snímačů krajních poloh

Dvočinné pneumatické válce:



– obyčejný s jednostrannou pístnicí a magnetickým kroužkem pro ovládání snímačů krajních poloh



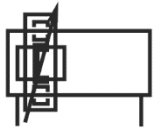
– s ručně nastavitelným oboustranným tlumením krajních poloh a magnetickým kroužkem pro ovládání snímačů krajních poloh



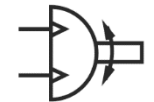
– s automaticky řízenou intenzitou vnitřního tlumení krajních poloh a magnetickým kroužkem pro ovládání snímačů krajních poloh



Pneumatický lineární pohon (bez pístnice) s tlumením krajních poloh

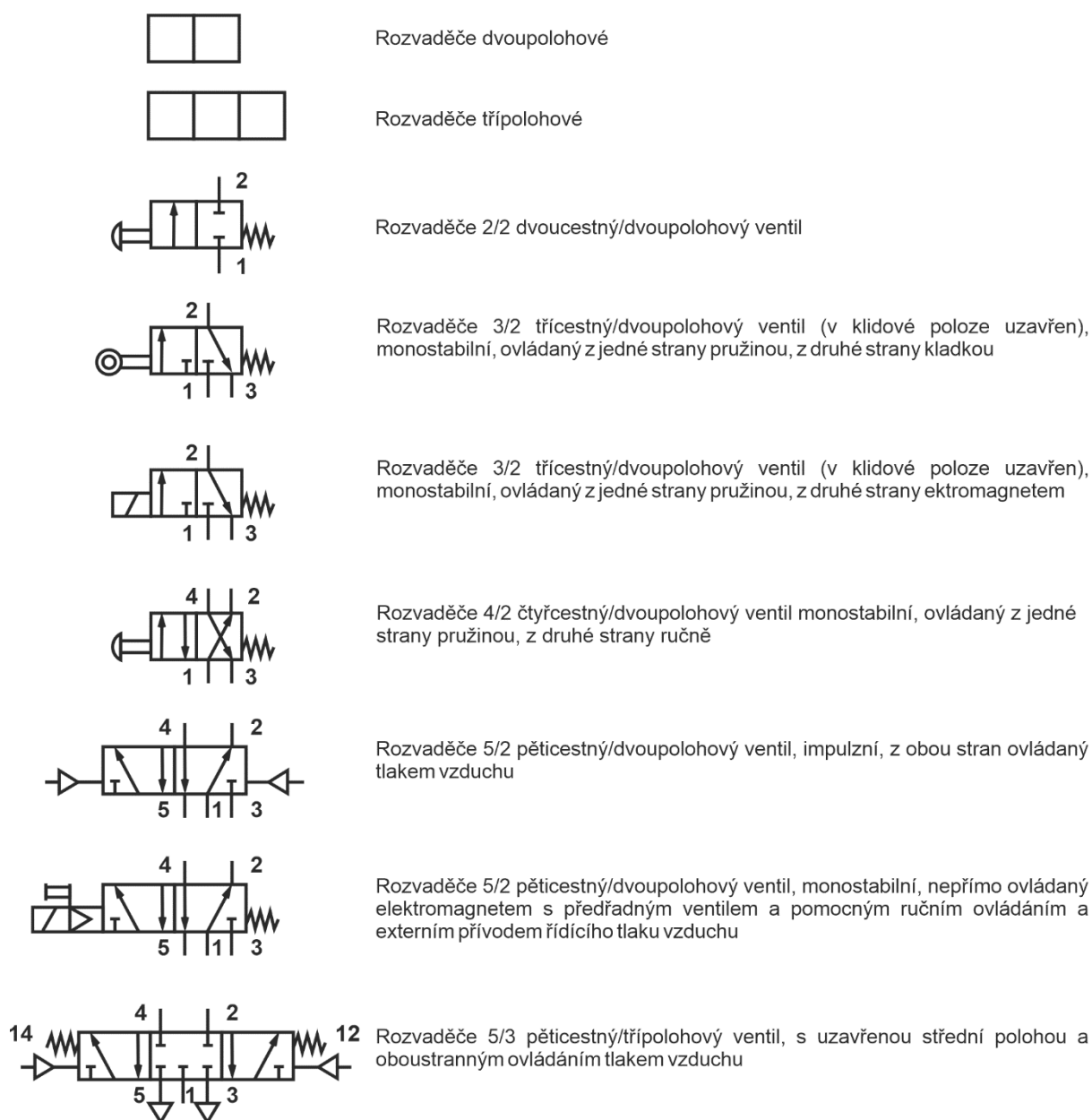


Bezpečnostní válec s magnetickou spojkou a nastavitelným vnitřním tlumením krajních poloh



Pneumotor rotační (kývavý)

Obr. 3.35 Základní značky pneumotorů



Obr. 3.36 Základní značky rozvaděčů



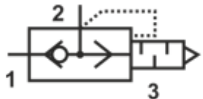
Jednosměrný ventil



Škrticí ventil



Kombinace jednosměrný a škrticí ventil – škrzení v jednom směru

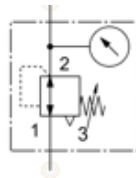


Rychloodvětrávací ventil

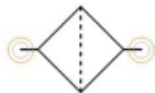
Obr. 3.37 Prvky pro řízení rychlosti



Zdroj tlaku  
(všeobecně)



Redukční ventil třicestný s  
manometrem



Filtr

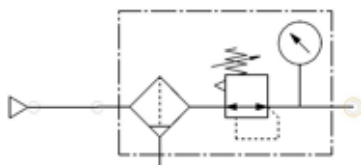


Maznice vzduchu

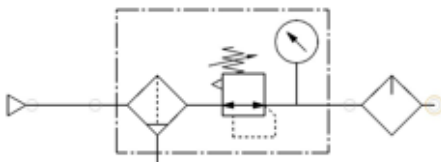


Filtr + odlučovač vody

Obr. 3.38 Prvky úpravy tlakového vzduchu



Jednotka úpravy vzduchu bez přimazávání

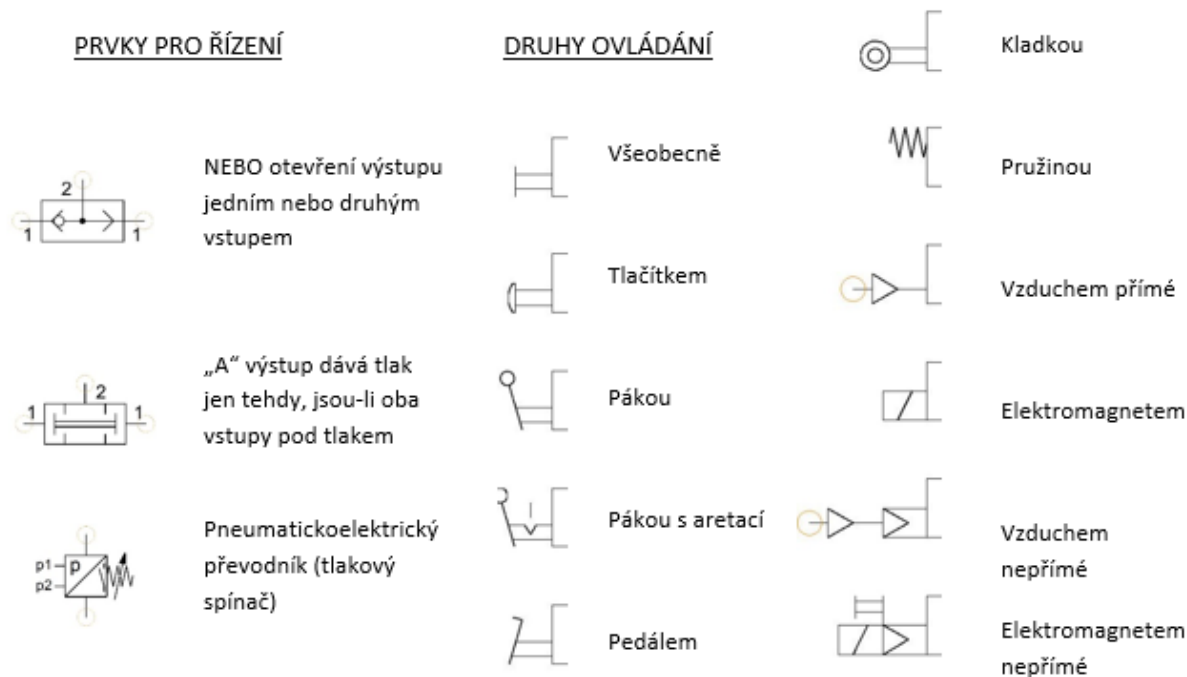


Jednotka úpravy vzduchu s maznicí (s  
možností odebírání nemazaného vzduchu)



Jednotka úpravy vzduchu (zjednodušeně)

Obr. 3.39 Jednotky úpravy vzduchu



Obr. 3.40 Prvky pro řízení a druhy ovládání

### 3.2.2 Členění pneumatického obvodu

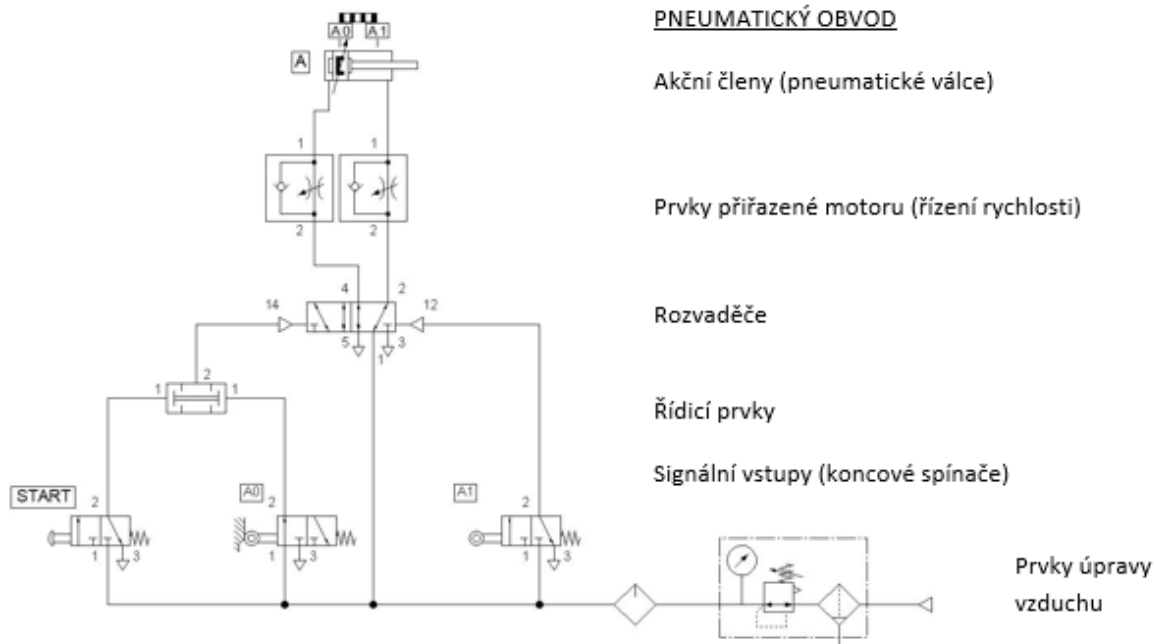
Členění pneumatického obvodu je zobrazeno na Obr. 3.41. Nakreslený pneumatický obvod má strukturu členěnou podle určitých vrstev tak, že úplně nahoře jsou nakresleny akční členy (pneumatické válce), u kterých je označena poloha signálních prvků, pod nimi prvky přiřazené pneumotorům, nejčastěji prvky pro řízení rychlosti, níže pak rozvaděče a pod nimi řídicí prvky ovládání, signální prvky (tlačítka, koncové spínače apod.) a úplně dole je přívod tlakového vzduchu a jednotka úpravy vzduchu.

Při kreslení schéma pneumatického obvodu je třeba dodržet následující zásady:

- schémata pneumatických obvodů lze kreslit bez ohledu na prostorové uspořádání prvků v reálu,
- pneumatické válce a ventily pro jejich ovládání kreslit vždy ve vodorovné poloze,
- vedení vzduchu vést pokud možno přímo a bez křížení,
- prvky na výkresu řadit zdola nahoru ve směru toku řídicích signálů a toku energie,
- prvky řadit zleva doprava podle časového sledu průběhu jejich funkce.

Všechny prvky ve schématu se kreslí v poloze, která odpovídá stroji v klidu, připravenému ke spuštění. Přitom se předpokládá, že pneumatické obvody jsou kresleny s tlakem vzduchu a elektrické obvody jsou kresleny bez proudu [39, 41].





**PNEUMATICKÝ OBVOD**

Akční členy (pneumatické válce)

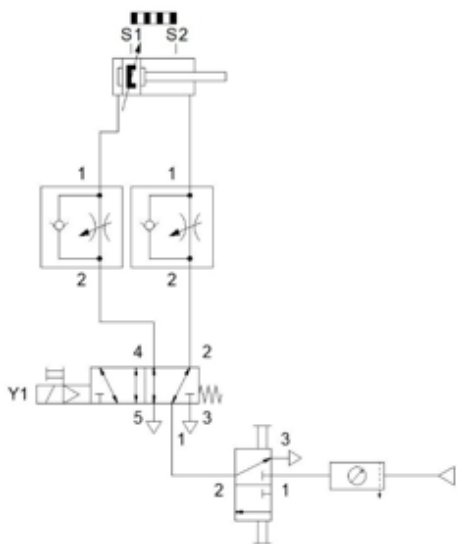
Prvky přiřazené motoru (řízení rychlosti)

Rozvaděče

Řídící prvky

Signální vstupy (koncové spínače)

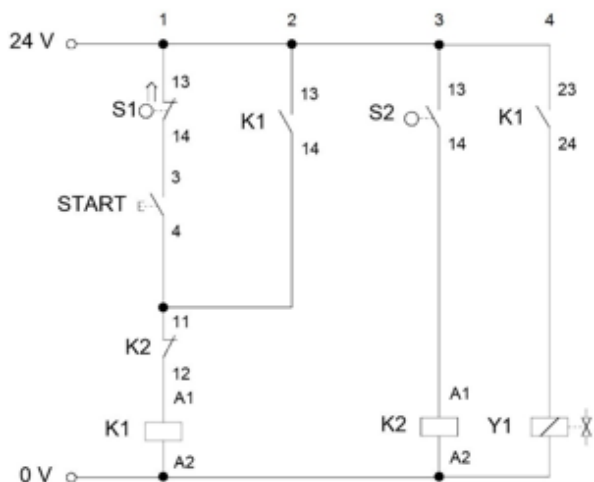
Prvky úpravy vzduchu



**ELEKTROPNEUMATICKÝ OBVOD**

a) Pneumatický výkonový obvod

b) Elektrický ovládací obvod (reléový)



Kontakty vstupních prvků

Kontakty řídicí logiky

Elektromagnety

Obr. 3.41 Příklad schematického členění pneumotoru, ryze pneumatický a elektropneumatický obvod

Pneumatické obvody, které mají elektrické ovládání, jsou v pneumatickém schématu jednodušší, protože výkres elektrického řídicího obvodu se kreslí zvlášť. Do pneumatického obvodu jsou zakresleny v tom případě pouze umístění a označení snímačů.

Každý prvek na stroji má být označen shodně s označením na výkrese (nálepkou, štítkem apod.) a každý pneumatický prvek má od výrobce nálepku se schematickou značkou, která má být shodná s označením na výkrese. Toto značení usnadňuje orientaci, pochopení funkce a opravy provozních poruch.

### 3.2.3 Základní přehled pneumotorů

Přehled rozdělení pneumotorů je na Obr. 3.42. Přímočaré pneumotory jsou na Obr. 3.43 a rotační pneumotory na Obr. 3.44.

Přímočaré motory jsou děleny na jednočinné a dvojčinné. U jednočinného přímočarého pneumotoru lze přiváděným médiem dosáhnout pohybu výstupního členu pouze v jednom směru. Jde o nejjednodušší typy pneumotorů, které jak už z názvu vyplývá, mohou vykonávat práci pouze v jednom směru. Zpětný pohyb je zajištěn působením jiné síly než pracovním médiem. Obvykle je to tlačná pružina umístěná ve válci pneumotoru (může ale být i jiná síla působící z vnějšku). Síla musí být dostatečně velká, aby v požadovaném čase přesunula píst do výchozí polohy (pro usnadnění přesunu jsou montovány do systému *rychlodvzdušňovací ventily*). Délka zdvihu je omezena délkou pružiny.

U dvojčinného přímočarého pneumotoru lze přiváděným médiem dosáhnout pohybu výstupního členu v obou směrech. Dvojčinné motory mohou být ovládány tlakovým vzduchem z obou stran, tedy vykonávají práci jak při dopředním, tak i při zpětném pohybu. Délka zdvihu je zde omezena pevností ve vzpěru.

Pneumotory rotační – tento typ pneumatických motorů přeměňuje energii stlačeného vzduchu na mechanickou energii rotačního pohybu. V zásadě rozeznáváme rotační pneumotory:

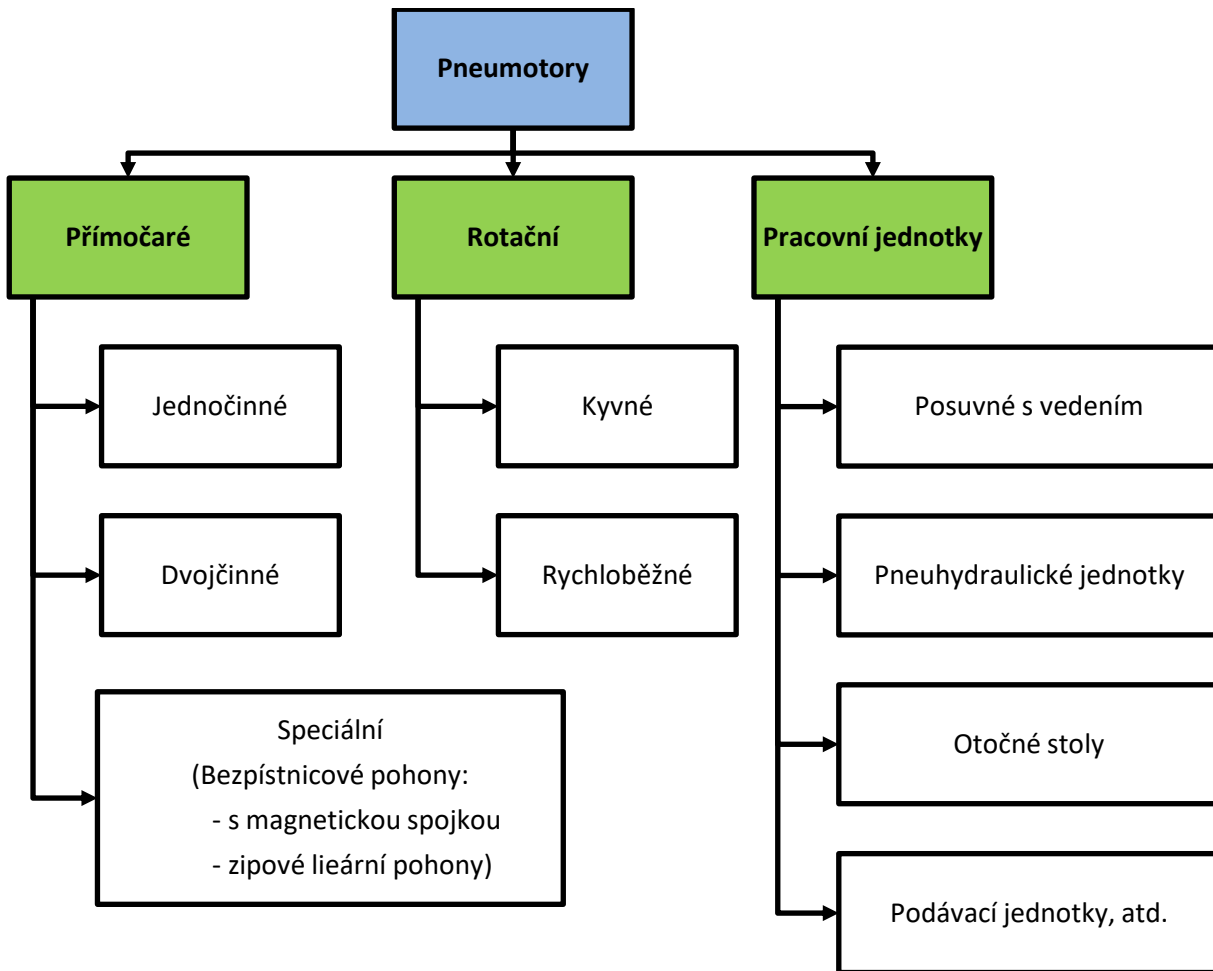
- Rotační rychloběžné – pneumotory s neomezeným úhlem, například lamelové.
- Rotační kyvné – motory s omezeným úhlem, např. pístové motory s výstupním rotačním pohybem nebo lamelové s jednou lamelou, s dvojitou lamelou.

Pneumatické válce a lineární pohony jsou často vybaveny vnitřním tlumením krajních poloh (Festo válce s označením PPV) a mají na pístu magnetický kroužek pro bezdotykové ovládání snímačů (označení A). Snímače se umísťují buď na lištu anebo u nejmodernějších válců do drážek tělesa válce, tím je umožněno snadné a přesné nastavování polohy snímačů, které jsou zároveň chráněny proti poškození. Sepnutá poloha snímače je vždy signalizována LED diodou, což umožňuje pohodlné seřizování. Při použití snímačů je třeba mít na paměti tyto důležité body:

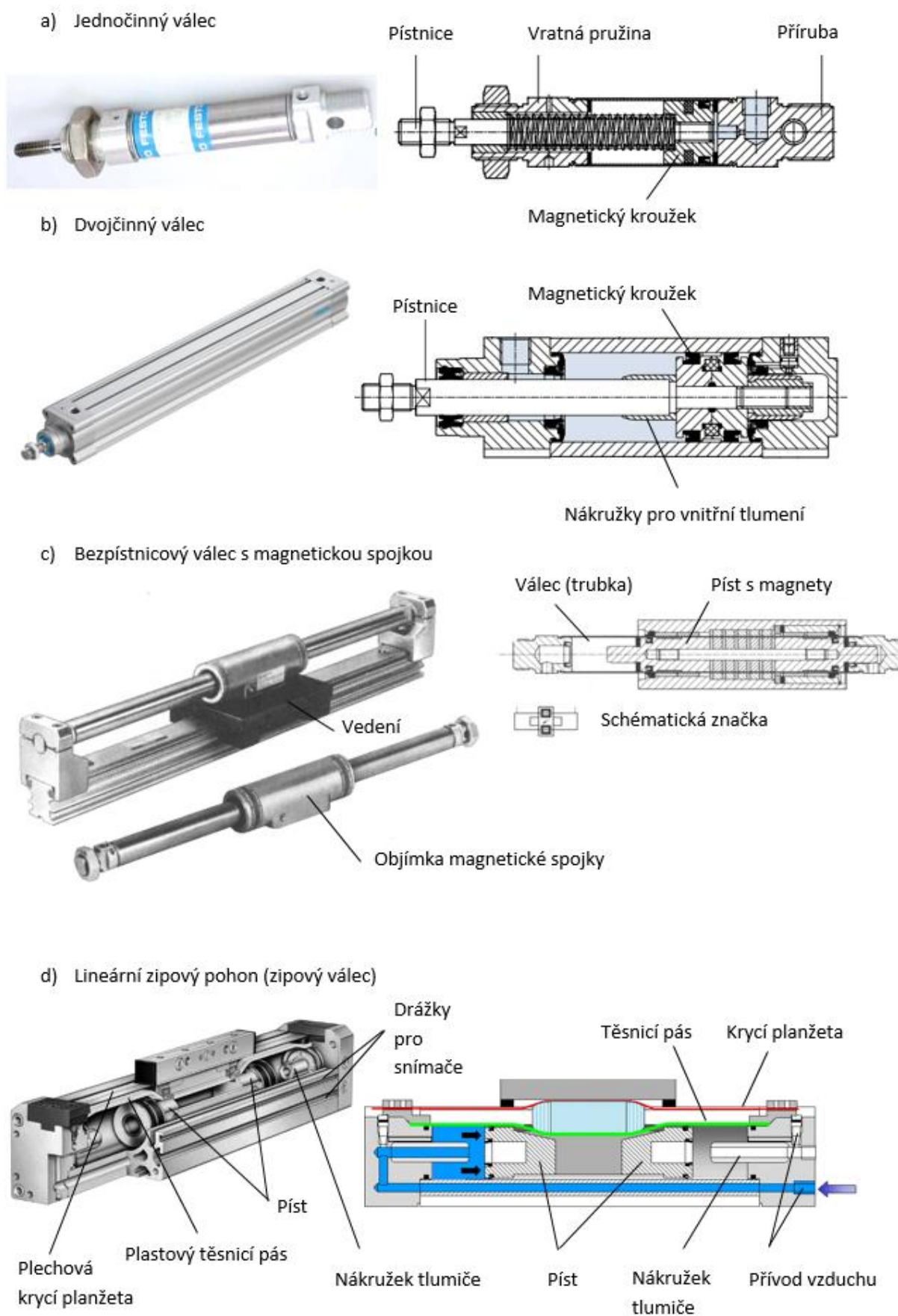
- 1) Příklad označení válce: DNU-32-300-PPV-A (průměr 32 mm, zdvih 300 mm s vnitřním tlumením a snímáním koncových poloh).
- 2) Snímač není doraz a je nutné jej chránit proti mechanickému poškození!
- 3) Koncové spínače (pneumatické i elektrické) vyžadují pevné a správné nastavení polohy.
- 4) Chybné nastavení polohy spínače může vést k jeho poškození anebo zničení (opět spínač není doraz) a nedostatečné sepnutí může vést k chybným signálům do řízení a zablokování chodu

stroje!

- 5) Vnitřní tlumení válce musí být správně seřízeno, jinak jsou rázy v krajních polohách a snižuje se životnost válce a celého zařízení!

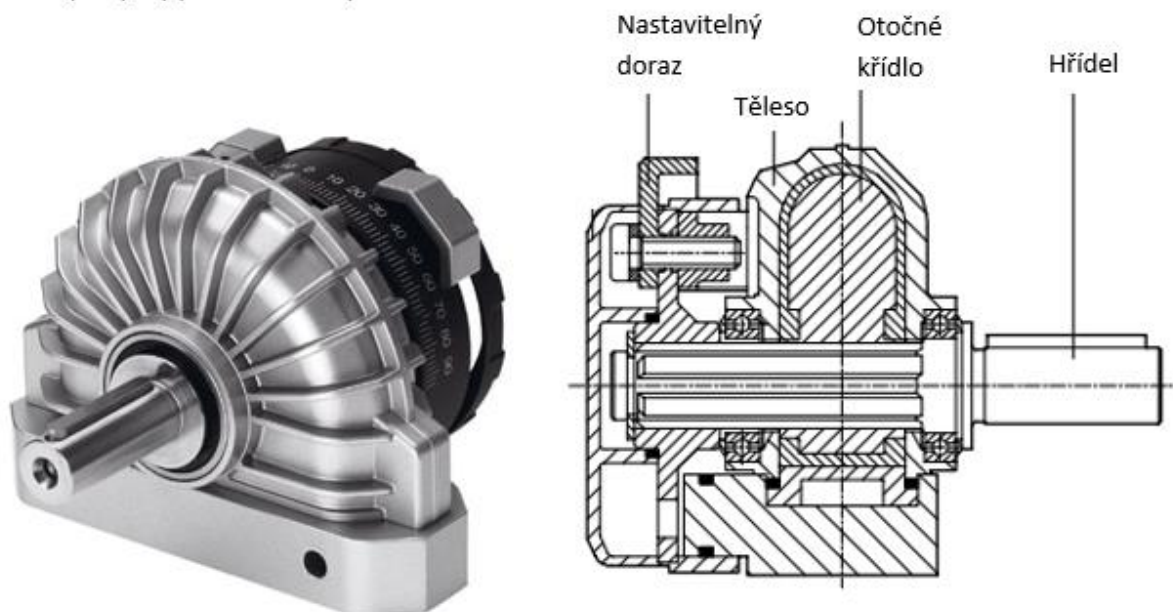


Obr. 3.42 Rozdělení pneumotorů

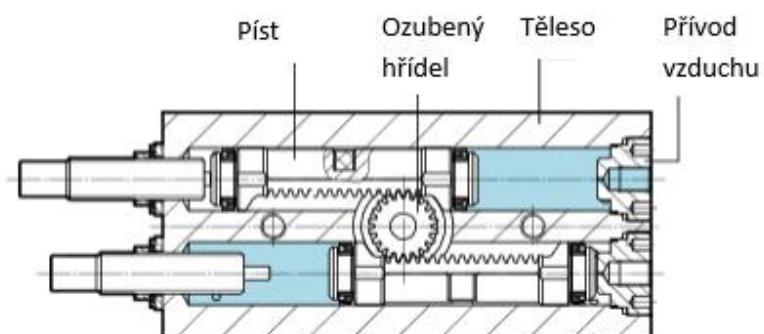


Obr. 3.43 Příklady provedení přímočarých pneumotorů a jejich řezů

a) Kyvný pohon s otočným křídlem



b) Kyvný pohon se dvěma písty (s hřebenem a pastorkem)

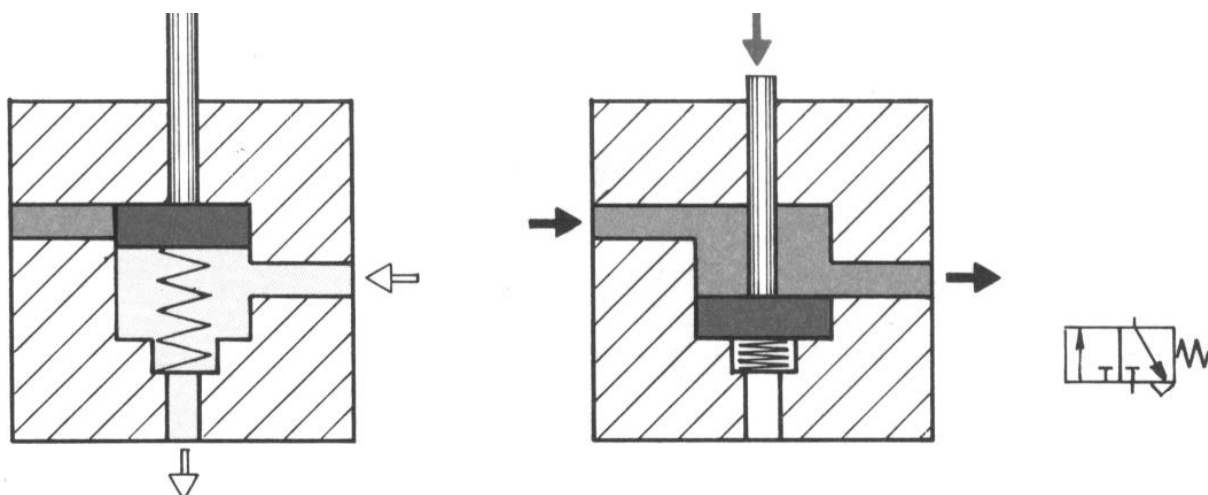


Obr. 3.44 Příklad provedení kyvných pneumotorů a jejich řezů

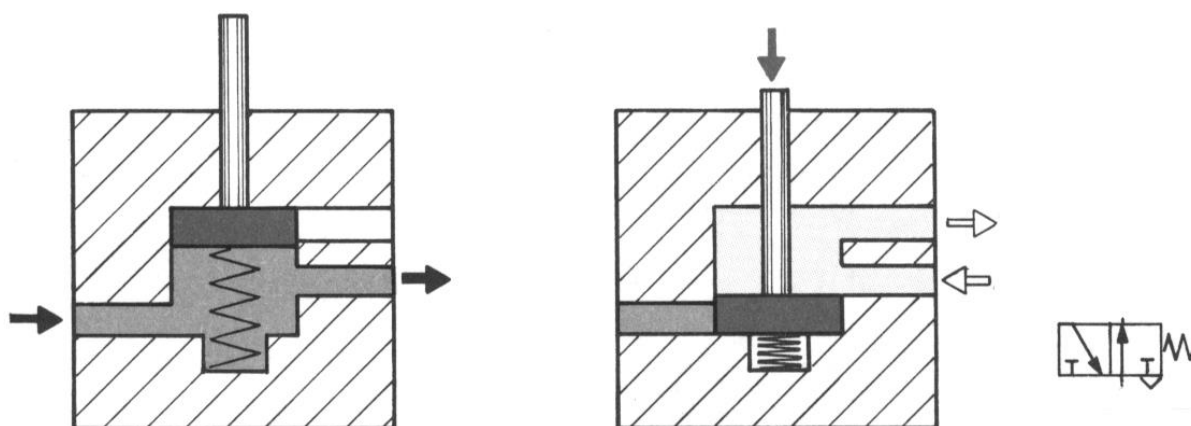
### 3.2.4 Rozvaděče a ventily

Jsou prvky v pneumatickém obvodu pro řízení toku vzduchu v pneumatickém obvodu. Počet pracovních otvorů dává počet cest a většinou se používají dvoupolohové rozvaděče – princip uveden na Obr. 3.45 až Obr. 3.48. Rozdělení rozvaděčů je na Obr. 3.49.

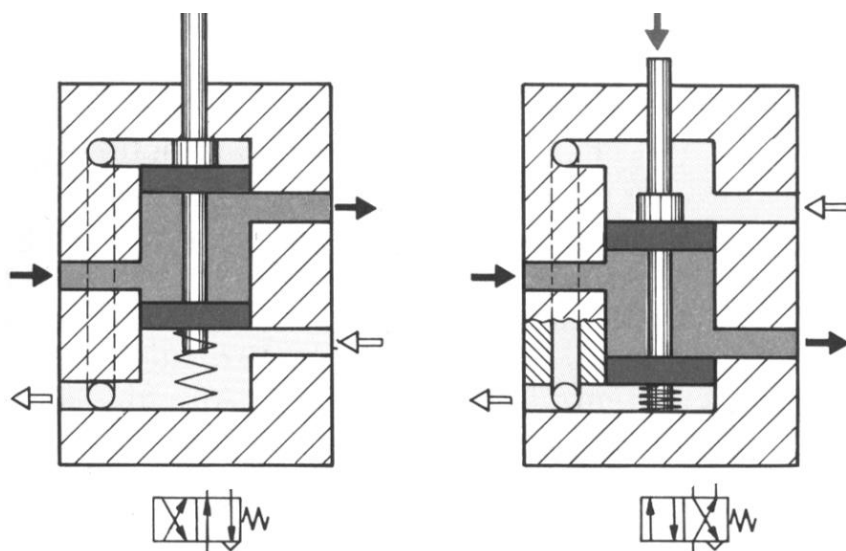
V pneumatických i elektropneumatických obvodech jsou používány základní typy ventilů, **impulzní** – se dvěma ovládacími signály, které mají vnitřní mechanickou paměť a **monostabilní** – s jedním ovládacím vstupem a pružinou, které drží přestavené jen po dobu působení signálu.



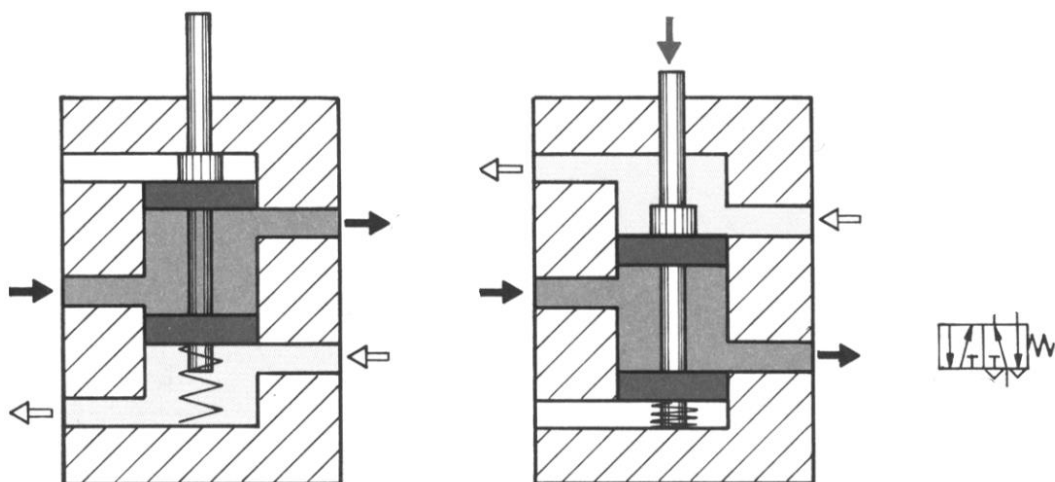
Obr. 3.45 Princip funkce 3/2 rozvaděče neprůtočného v klidové poloze



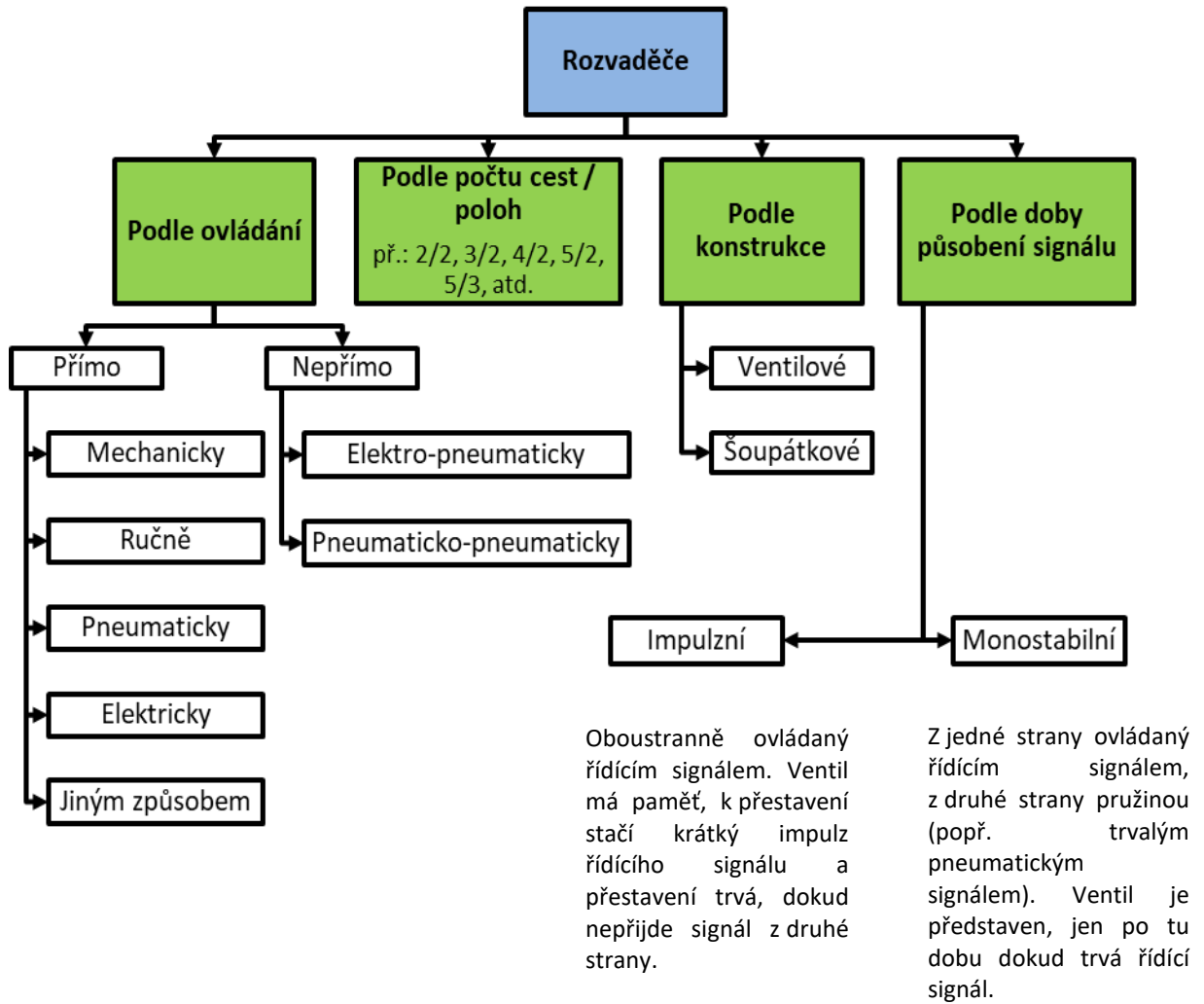
Obr. 3.46 Princip funkce 3/2 rozvaděče průtočného v klidové poloze



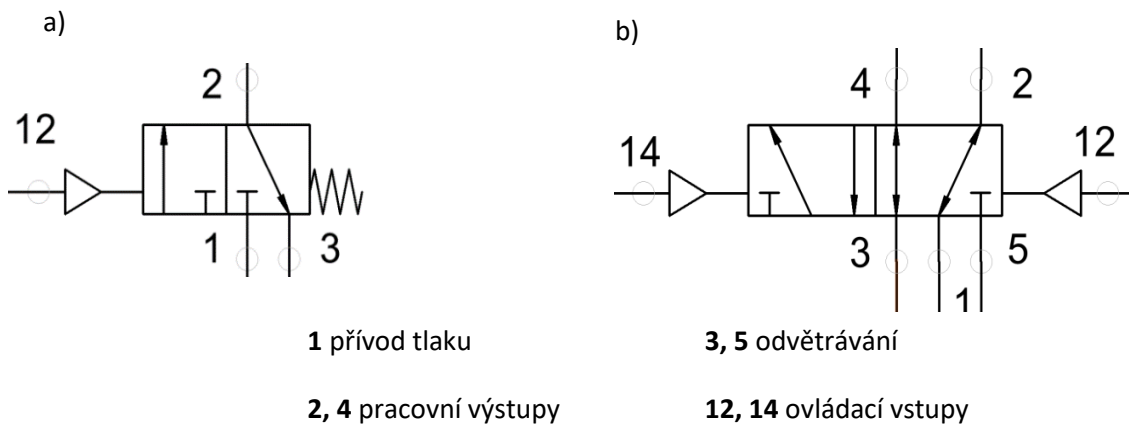
Obr. 3.47 Princip funkce 4/2 rozvaděče (dvě varianty zapojení)



Obr. 3.48 Princip funkce 5/2 rozvaděče



Zkrácené označení přívodů čísla podle ISO 5599/II



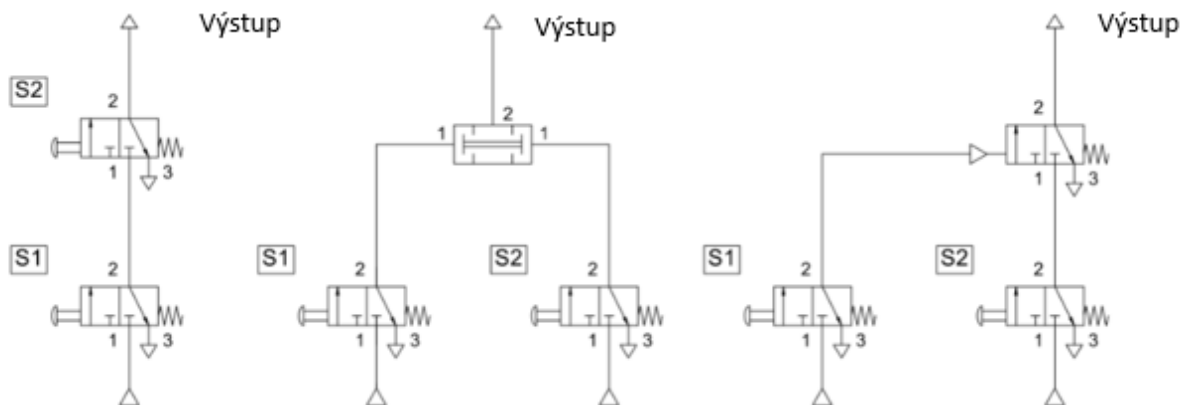
Obr. 3.49 Rozdělení rozvaděčů a zkrácené označení: a – 3/2 monostabilní rozvaděč (v klidové poloze uzavřen); b – 5/2 impulzní rozvaděč (s pneumatickým ovládním)



### 3.2.5 Základní logické funkce pro řízení pneumatických obvodů

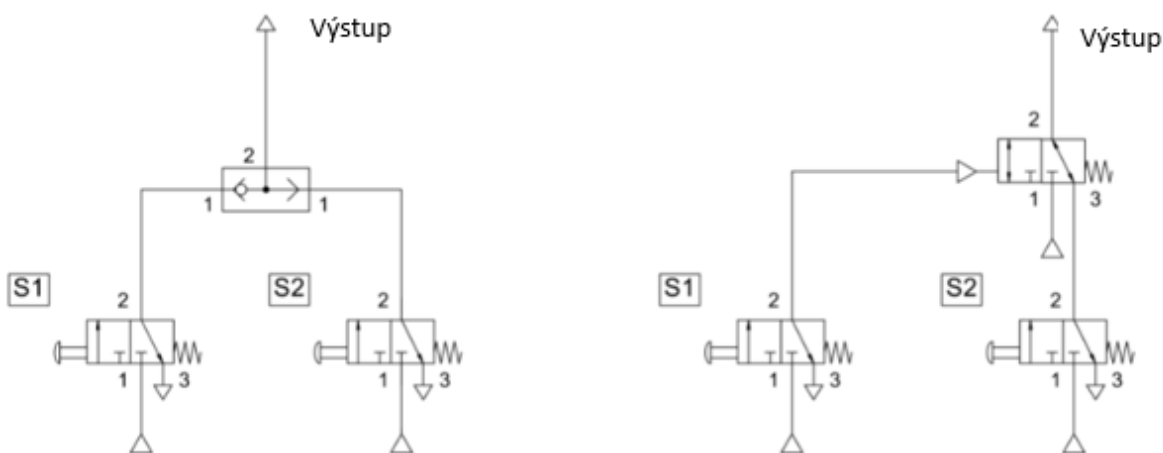
V této části je uvedena pneumatická realizace základních logických funkcí aplikovaných často pro řízení pneumatických obvodů (Obr. 3.50 až Obr. 3.52). Základní logické funkce v pneumatických obvodech jsou: AND (konjunkce), OR (disjunkce) a NON (negace).

Funkce **AND** má tři možné způsoby obvodového zapojení, Obr. 3.50. Tedy výstupní signál existuje jen tehdy, pokud jsou signály na obou vstupech:



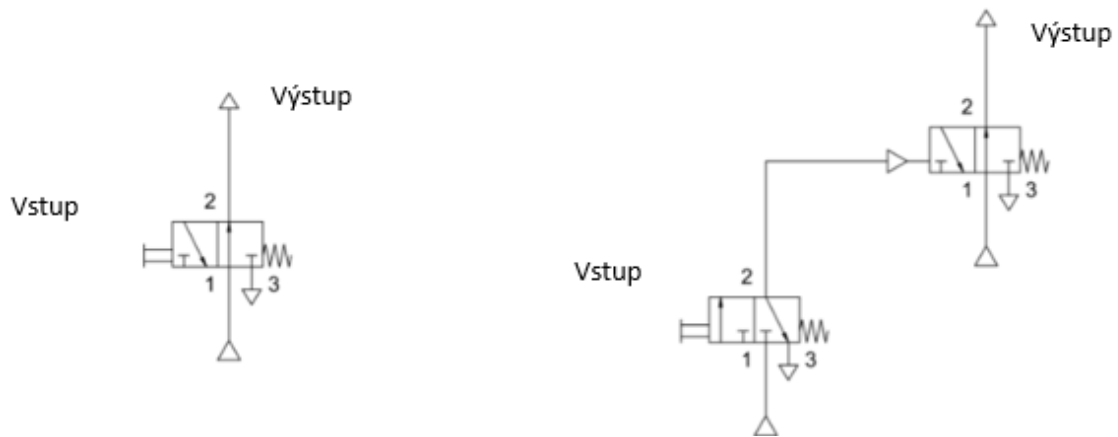
Obr. 3.50 Tři možnosti zapojení logické funkce AND (konjunkce) pneumatického obvodu

Funkce **OR** má dvě možná řešení, Obr. 3.51. Tedy výstupní signál existuje, pokud je alespoň jeden ze dvou vstupů sepnut.



Obr. 3.51 Dvě možnosti zapojení logické funkce OR (disjunkce) pneumatického obvodu

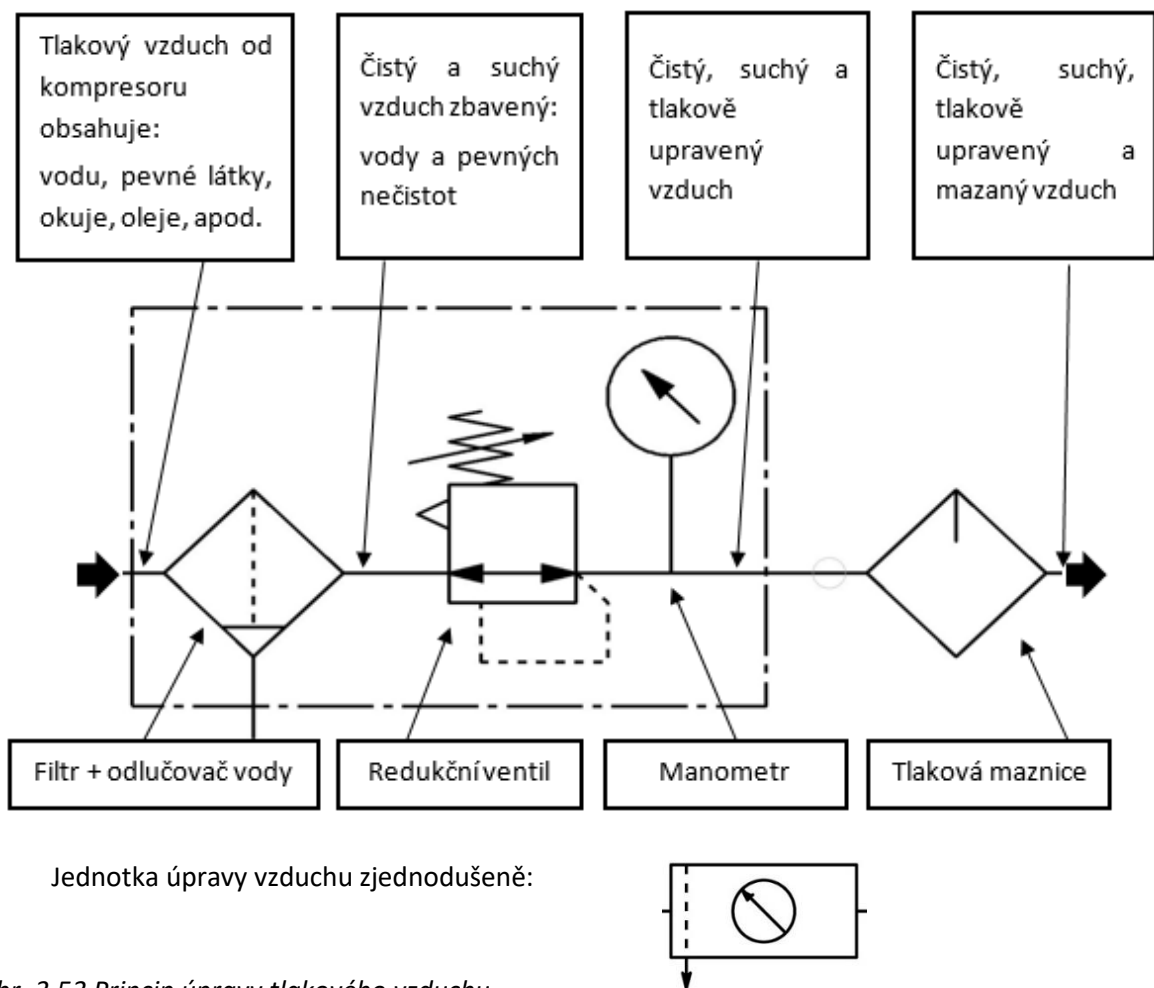
Funkce **NON** má dvě možná řešení, Obr. 3.52. Tedy když je vstup není výstup a naopak.



Obr. 3.52 Dvě možnosti zapojení logické funkce NON (negace) pneumatického obvodu

### 3.2.6 Postup úpravy a užití tlakového vzduchu

Vhodně volený postup přípravy vzduchu je předpokladem správné funkce a životnosti prvků obvodu, Obr. 3.53.



Obr. 3.53 Princip úpravy tlakového vzduchu

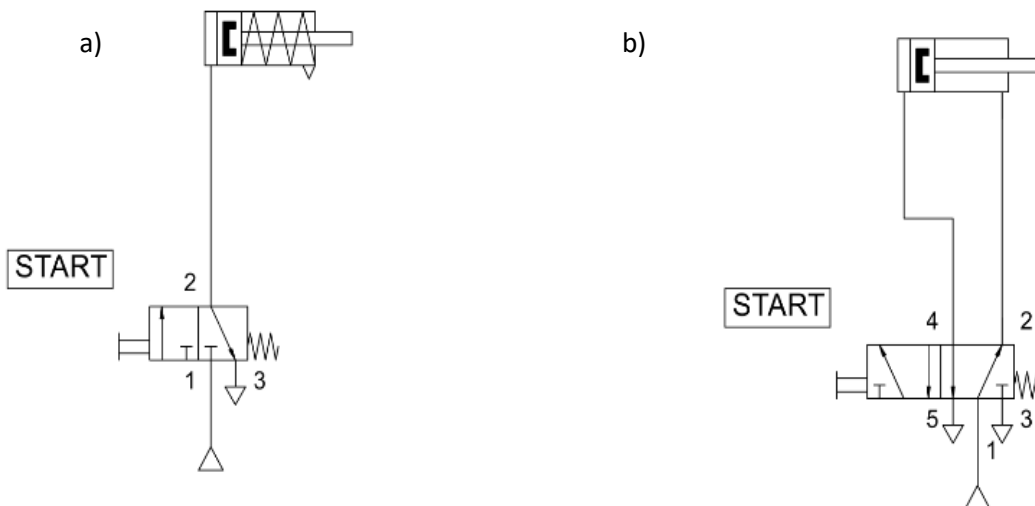
V moderních pneumatických obvodech se většinou mazání vzduchu nepoužívá, protože jsou aplikovány pneumatické válce s trvalou tukovou náplní. Pokud se v obvodu jednou začne mazat, není možné mazání opustit, neboť trvalé tukové náplně (speciální vazelína) se olejem rozpustí a vyplaví a pak je mazání už nezbytné – přerušení mazání by vedlo k rychlému opotřebení těsnících prvků na pístech válců. Správné nastavení intenzity mazání je důležité pro správnou funkci pneumatického obvodu – přílišné mazání může vést k poruchám.

Velmi důležitá je těsnost celého pneumatického obvodu, neboť netěsnosti vedou k velkým ztrátám drahého tlakového vzduchu a navíc mohou způsobovat poruchy.

**Příklad:** Otvorem o průměru 1 mm uteče při tlaku 7 bar cca 4 m<sup>3</sup> vzduchu za 1 hodinu. Při ceně 0,50 Kč na 1 m<sup>3</sup> to znamená ztrátu  $4 \times 24 \times 0,50 = 48$  Kč za den třísměnného provozu.

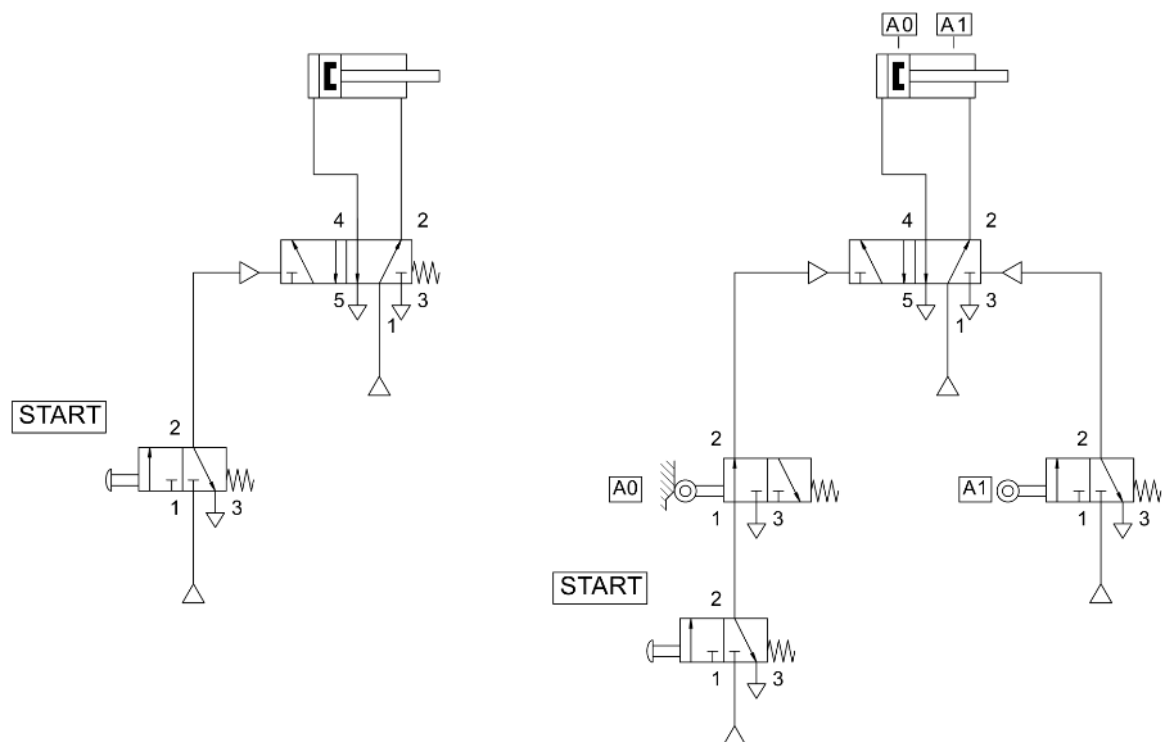
### 3.2.7 Základní schémata zapojení

Schéma pneumatického obvodu s přímým zapojením jednočinného a dvojčinného pneumotoru je na Obr. 3.54.



Obr. 3.54 Schéma zapojení jednočinného a dvojčinného pneumotoru

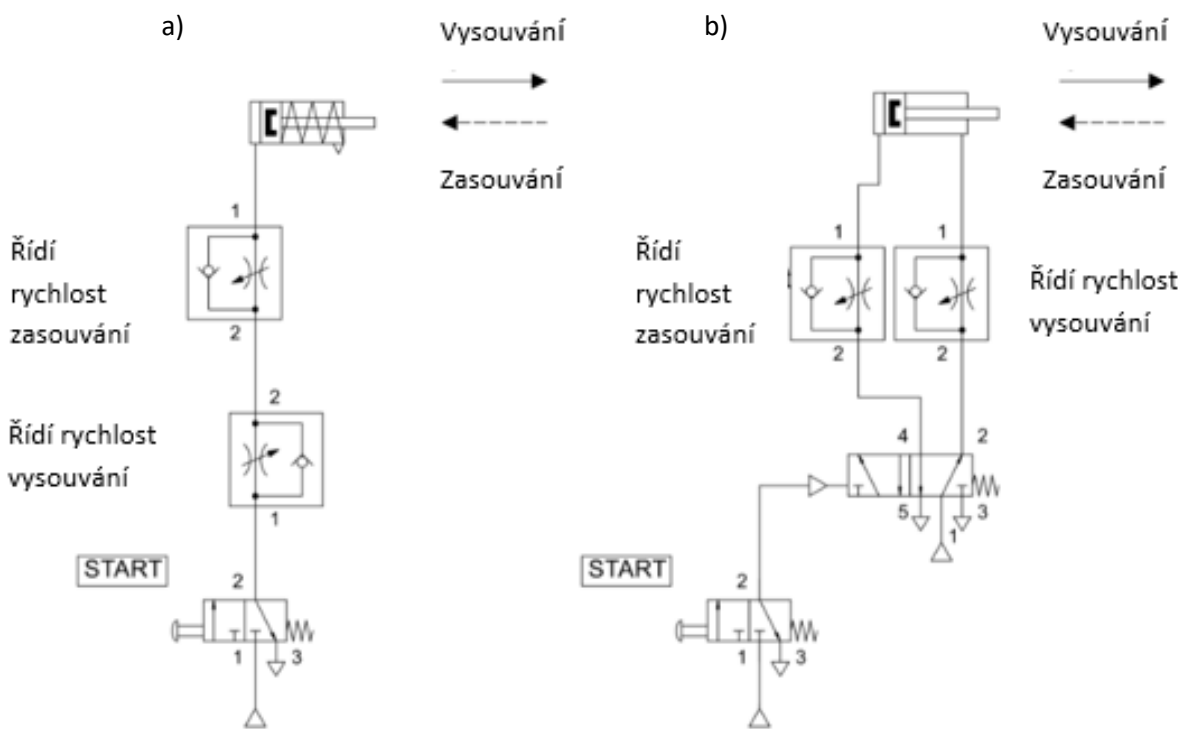
Nepřímé ovládání dvojčinného pneumotoru je zobrazeno na Obr. 3.55. V prvním případě, při použití monostabilního ventilu, pokud se drží tlačítko START, je píst válce vysunut. Ve druhém případě, při použití impulzního ventilu, krátkým stisknutím tlačítka START se píst válce vysouvá a po dosažení vysunuté pozice se automaticky zasune. Obě polohy jsou signalizovány koncovými spínači.



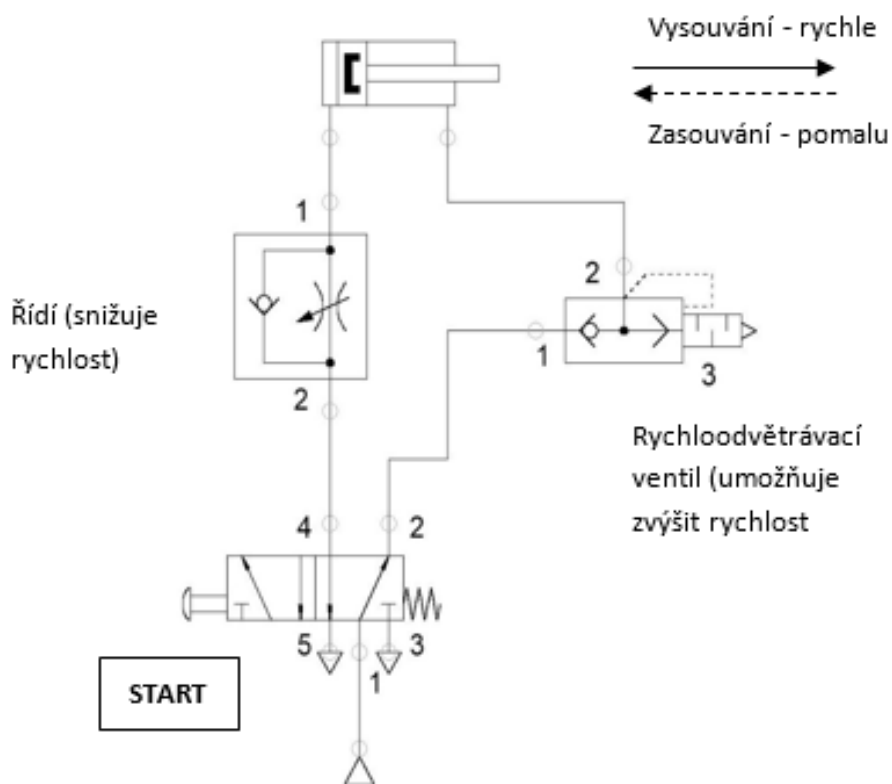
Obr. 3.55 Nepřímé ovládání dvojčinného pneumotoru: a – monostabilním rozvaděčem, b – impulzním rozvaděčem

Nastavování (seřizování) rychlosti pneumotoru lze provádět dvěma základními způsoby:

- a) Snižování rychlosti škrcením (nejčastěji na výtoku), Obr. 3.56.
- b) Zvyšování rychlosti aplikací rychloodvětrávacího ventilu, Obr. 3.57.



Obr. 3.56 Použití jednosměrných škrticích ventilů pro regulaci rychlosti



Obr. 3.57 Použití rychloodvětrávacího ventilu

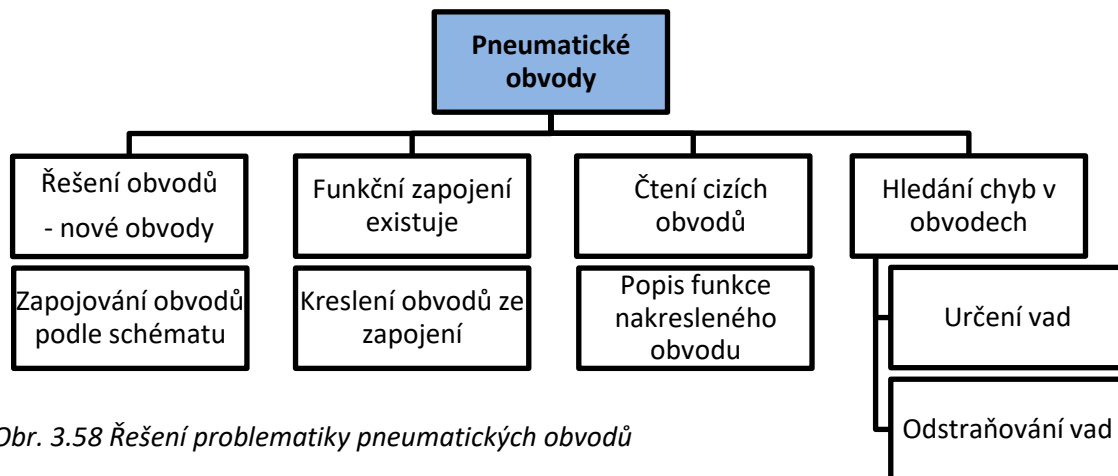
Rychlost pneumotoru závisí především na:

- 1) Použitím pracovním tlaku (nastavení redukčního ventilu) – vyšší tlak, větší rychlost.
- 2) Tlaku v protitlakém prostoru, čím menší je tento tlak, tím vyšší rychlost a naopak. Můžeme tlak v protitlakém prostoru zvýšit škrcením nebo snížit rychloodvětráním.
- 3) Rychlost závisí na velikosti prvků (jmenovitém průtoku) a na délce a průměru hadic. Čím jsou prvky větší, hadice většího průměru a kratší délky, tím je možné dosáhnout vyšší rychlosti pohybu.

### 3.2.8 Pneumatické obvody

Tato kapitola poskytuje podklady pro cvičení předmětu Automatizace a robotizace ve strojírenství. Cílem cvičení je (Obr. 3.58):

- 1) Kreslení jednoduchých pneumatických obvodů pro zadanou funkci.
- 2) Čtení obvodů – popis funkce nakresleného obvodu.
- 3) Nakreslení jednoduchého obvodu podle zapojení.
- 4) Zapojení jednoduchého obvodu podle schématu a seřízení parametrů (na výukových standech).
- 5) Hledání chyb v pneumatických a elektropneumatických obvodech.



Obr. 3.58 Řešení problematiky pneumatických obvodů

#### 3.2.8.1 Kreslení jednoduchých pneumatických obvodů pro zadanou funkci

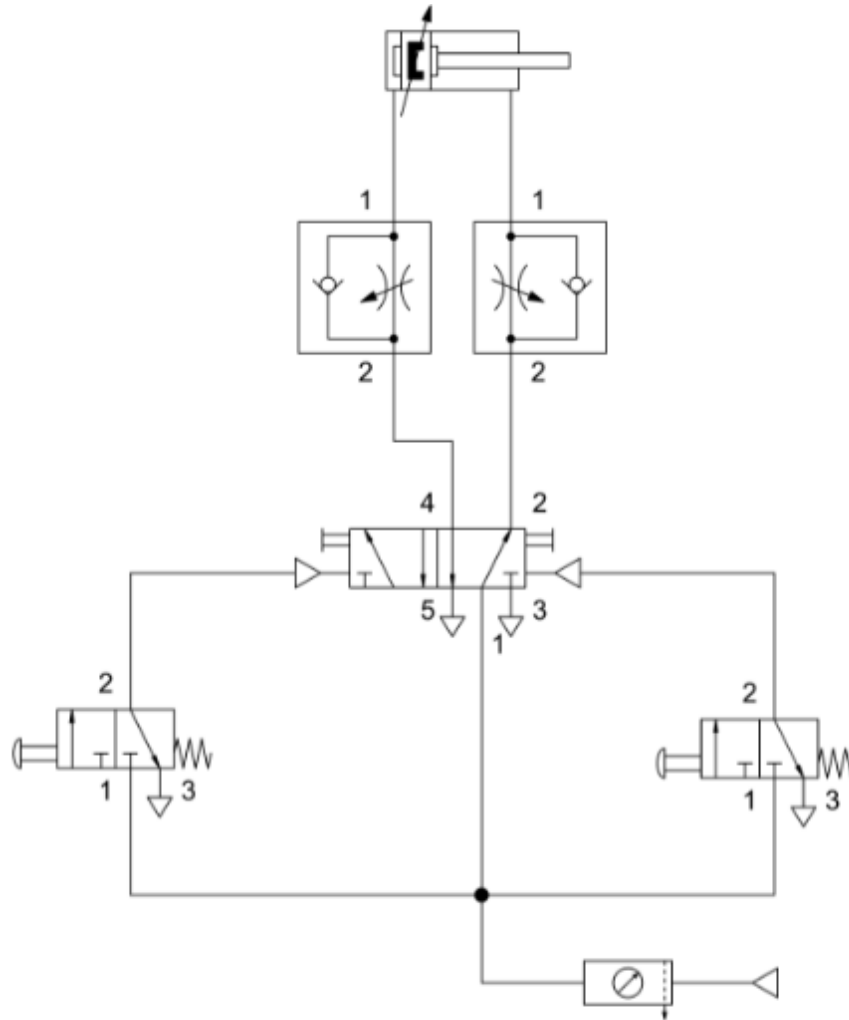
Vysvětlení základní koncepce zapojení pneumatických obvodů s impulzními a monostabilními rozvaděči je uvedeno na příkladech, dále jsou uvedeny příklady na obvodovou realizaci pneumatických časových členů a jejich funkci.

Pokud chceme v případě monostabilních ventilů (většinou s jedním ovládacím vstupem a pružinou) učinit dobu přestavení nezávislou na době působení ovládacího signálu, je nutné vytvořit paměť pomocí speciálního obvodového zapojení, které může být pneumatické anebo elektrické (viz další příklady). Funkce bude ukázána na praktickém zapojení.

**Příklad 1:** Návrh pneumatického obvodu, který zajistí vysunutí a zasunutí dvojčinného pneumotoru s ručně nastavitelným oboustranným tlumením krajních poloh a magnetickým kroužkem. Zasunutí a vysunutí pneumotoru bude ovládáno samostatnými tlačítky (jedno tlačítko pro vysunutí – Vpřed a

druhé pro zasunutí – Zpět). Rychlost zasunutí a vysunutí bude nezávisle ovládaná (snížena) jednosměrnými škrticími ventily na výstupu. Píst pneumotoru zůstane v jedné poloze i po konci ovládání.

K řešení této úlohy je možné využít impulzního ventilu pro zapamatování signálu mechanicky (přímo ve ventilu). Použití impulzního ventilu plní bezpečnostní funkci, protože v případě poruchy v obvodu, kdy se přeruší řídicí signál, zachová ventil svou polohu. Schéma pneumatického obvodu je na Obr. 3.59.



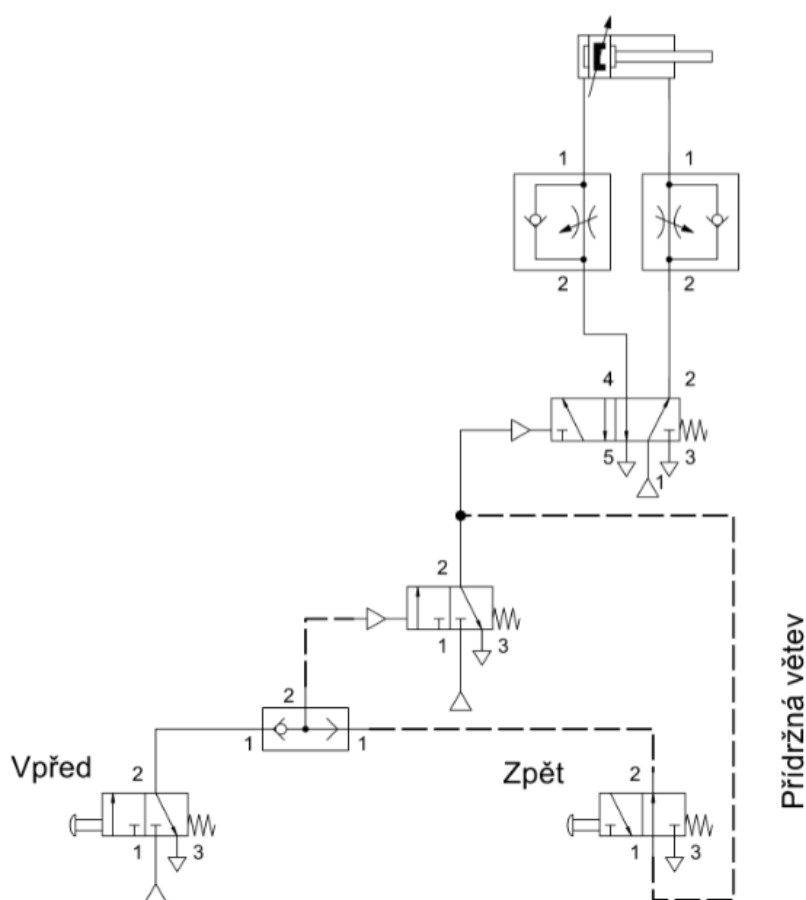
Obr. 3.59 Schéma pneumatického obvodu s impulzním ventilem, zapamatování signálu mechanicky (přímo ve ventilu)

**Příklad 2:** Pro tutéž úlohu bude realizováno tzv. **samodržné zapojení**, které umožňuje při použití **monostabilního ventilu** realizovat zapamatování signálu pneumatickým obvodem. Tedy: Nakreslete pneumatický obvod, který zajistí po krátkém stisknutí startovacího tlačítka Vpřed vysunutí dvojčinného válce a poté při krátkém stisknutí tlačítka Zpět dojde k zasunutí válce.

Pokud je pro ovládání použit tzv. **samodržný obvod**, pak při takovém zapojení postačí krátké stisknutí tlačítka Vpřed a dojde k vysunutí válce a tlačítkem Zpět dojde k jeho zasunutí. Přídržná větev způsobí, že přestavení 3/2 ventilu trvá i po skončení signálu od tlačítka Vpřed a také stejnou dobu je držen 5/2 rozvaděč. Elektrická podoba tohoto řídicího obvodu je velmi často používána!

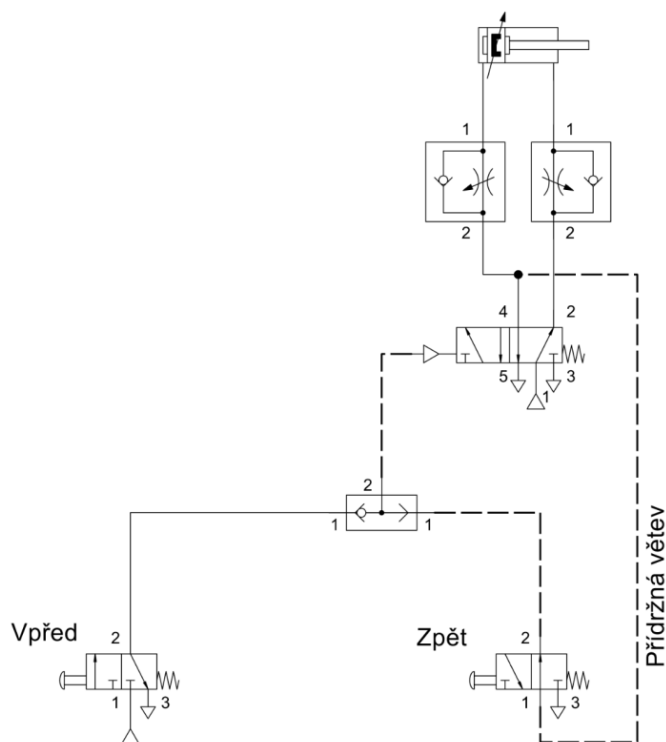
Řešení jsou možná dvě:

- Základní zapojení (Obr. 3.60).
- Úsporné zapojení (Obr. 3.61)



Obr. 3.60 Schéma pneumatického samodržného obvodu s použitím monostabilního ventilu – základní zapojení





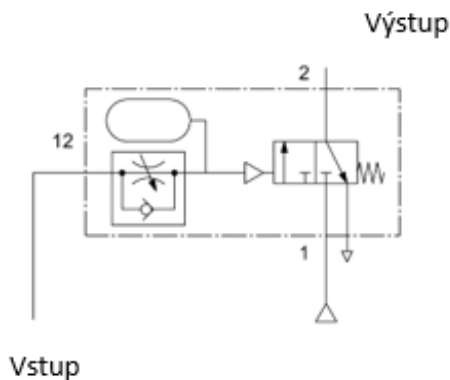
Obr. 3.61 Schéma pneumatického samodržného obvodu s použitím monostabilního ventilu – úsporné zapojení

### 3.2.8.2 Pneumatické časové členy

V této části jsou ukázány základní pneumatické časové členy, které se často používají v pneumatickém řízení. Mohou být sestaveny z jednotlivých prvků (3/2 ventil + jednosměrný a škrtkový ventil + nádobka – lze nahradit vhodnou délkou hadice) anebo mohou být použity speciální časové ventily.

#### A. Zpoždění náběhu signálu

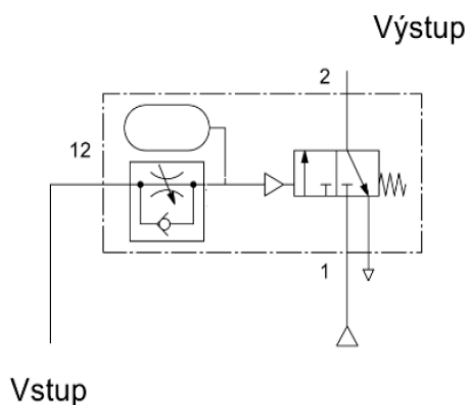
Při sepnutí signálu na vstupu se výstupní signál objeví s nastaveným časovým zpožděním, při vypnutí vstupu se současně zavře výstup, Obr. 3.62.



Obr. 3.62 Schéma provedení pneumatického časového členu – zpoždění náběhu signálu

### B. Zpoždění konce signálu (sestupné hrany)

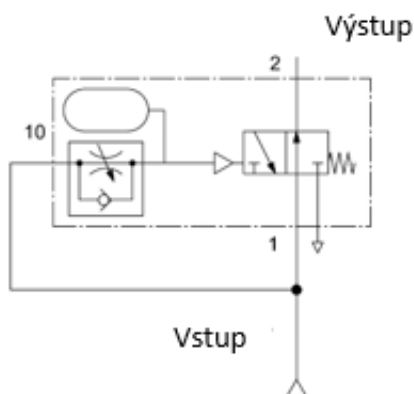
Přivedením tlaku do vstupu se na výstupu objeví signál okamžitě, po odpojení vstupu signál na výstupu setrvá nastavený čas a teprve poté (se zpožděním) zmizí, Obr. 3.63.



Obr. 3.63 Schéma provedení pneumatického časového členu – zpoždění konce signálu

### C. Zkrácení signálu

Při tomto zapojení může vstupní signál trvat libovolně dlouho a výstupní signál je zkrácen na dobu  $t$ , pak zmizí, Obr. 3.64.



Obr. 3.64 Schéma provedení pneumatického časového členu – zkrácení signálu

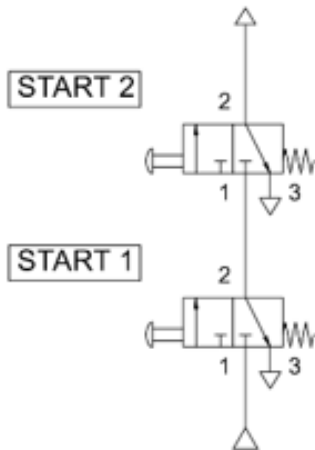
#### 3.2.8.3 Bezpečnostní START

Bezpečnostní start je dvouruční START s dalšími podmínkami. Následně jsou uvedeny dva přístupy.

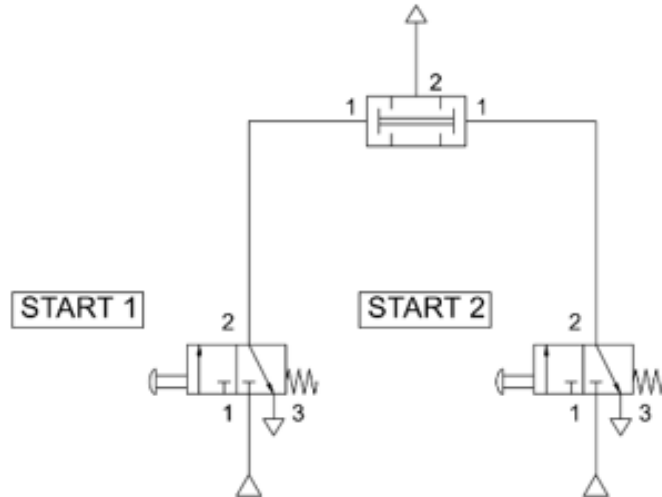
### A. Základní zapojení

Základní zapojení je sice nejlevnější, ale má nedostatek v tom, že nezaručí bezpečnost, když obsluha násilně zablokuje spuštěnou polohu jednoho z tlačítek, Obr. 3.65.

Startovací signál do obvodu



Startovací signál do obvodu

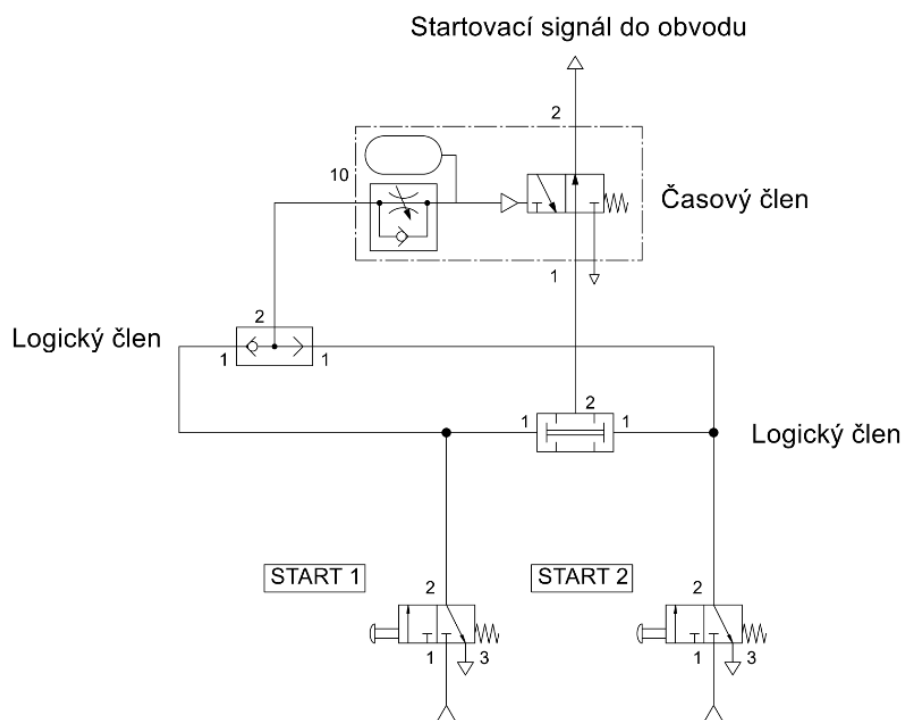


Obr. 3.65 Schéma pneumatického obvodu pro bezpečnostní start – základní provedení

### B. Zlepšené zapojení

Odstraňuje chybu předchozího zapojení použitím časového členu (Obr. 3.66) a plní tuto funkci:

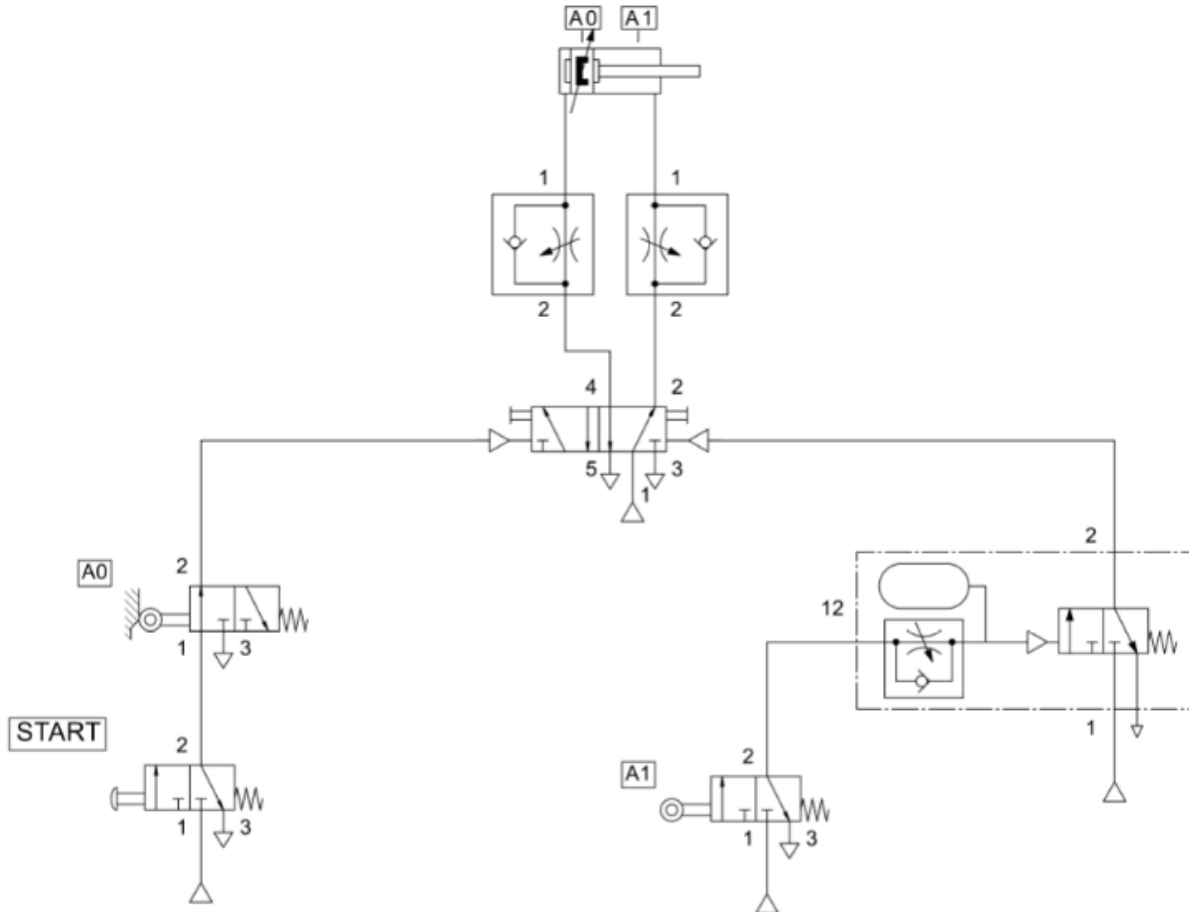
- Pokud jsou obě tlačítka stisknuta zároveň (v době kratší než např. 0,5 s) projde startovací signál na výstup a dojde k odstartování pracovního cyklu.
- Když není splněna podmínka pro současné stisknutí obou start tlačítek, pak startovací tlačítko, které je stisknuto jako první, dává signál a přes člen OR (NEBO) proudí vzduch přes škrtící ventil do nádoby s nastaveným zpožděním se potom ventil přestaví a uzavře výstup. Pozdější stisknutí druhého startovacího tlačítka způsobí sice signál na vstupu do ventilu, ale ten je již uzavřen. Nový start je možný až po opětovném uvolnění a následném stlačení obou startovacích tlačítek.



Obr. 3.66 Schéma pneumatického obvodu pro bezpečnostní start – zlepšené provedení

### 3.2.8.4 Další příklady pneumatických obvodů

**Příklad 4:** Nakreslete pneumatický obvod, který zajistí po krátkém stisknutí tlačítka START vysunutí dvojčinného válce. Poté zůstane válec vysunut 3 s a následně se má automaticky zasunout. Obě polohy jsou signalizovány kladičkovými ventily. Schéma pneumatického obvodu je na Obr. 3.67.

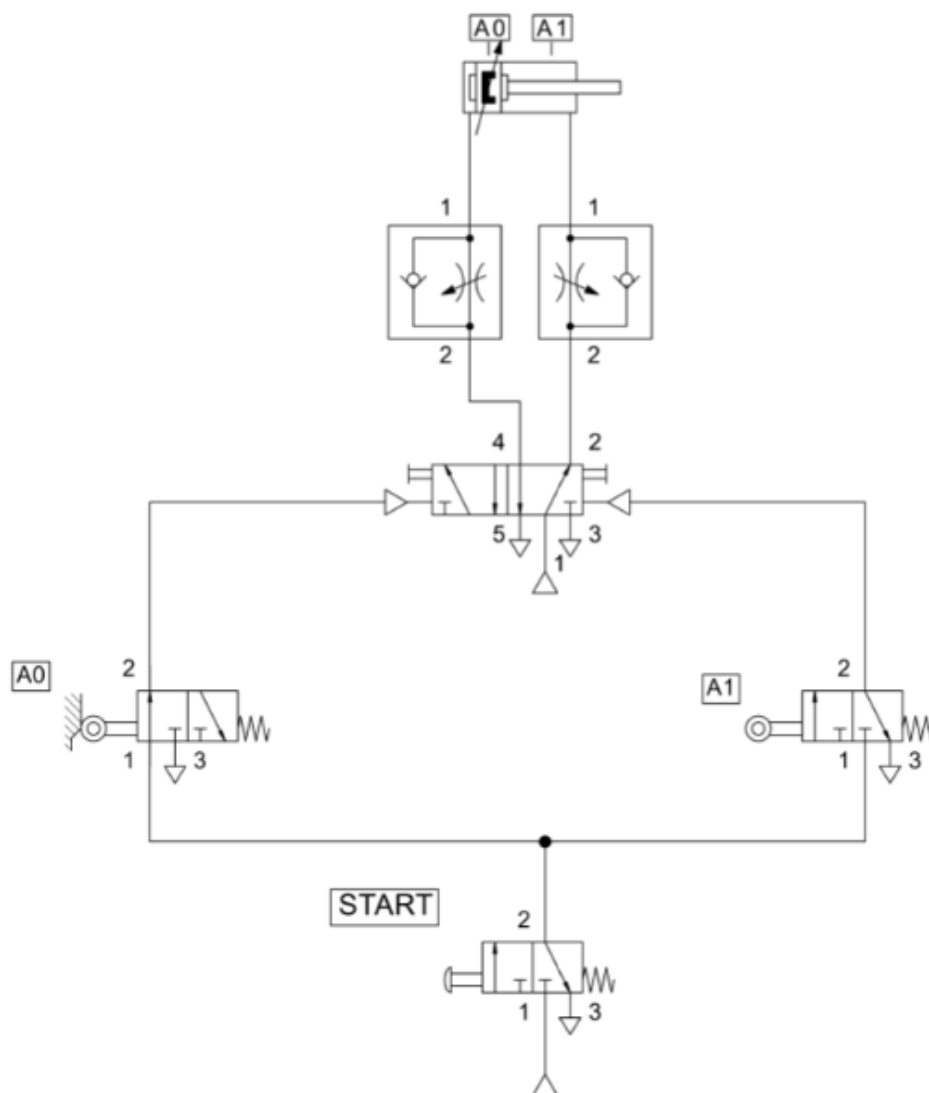


Obr. 3.67 Schéma pneumatického obvodu s časovým členem – zpoždění náběhu signálu

#### Úkoly:

- 1) Úlohu zapojte a zkontrolujte funkčnost zapojení.
- 2) Seřídte rychlost válce – rychlé vysunutí a pomalé zasunutí.
- 3) Seřídte tlumení v krajních polohách.
- 4) Nastavte správně dobu výdrže ve vysunuté poloze.
- 5) Připojte do obvodu prvky pro dvouruční START.

**Příklad 5:** Nakreslete obvod, který zajistí po krátkém stlačení tlačítka START vysunutí válce, pokud byl v okamžiku startu zasunut a zasunutí válce, pokud byl při startu vysunut. Obě polohy válce jsou kontrolovány koncovými spínači (kladičkovými ventily), rozvaděč je 5/2 impulzní ventil, Obr. 3.68.

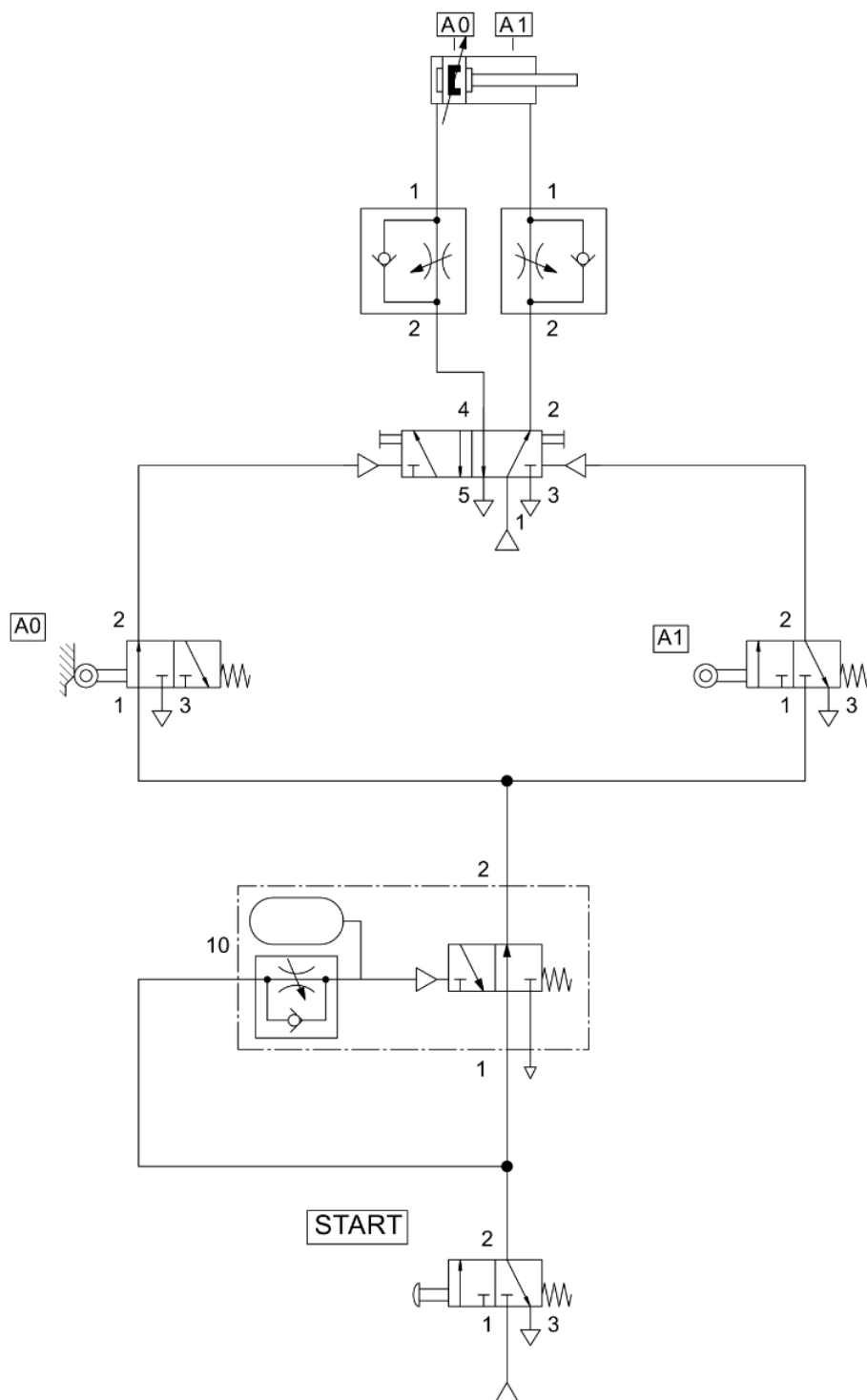


Obr. 3.68 Schéma pneumatického obvodu, který zajistí po krátkém stlačení tlačítka START vysunutí válce, pokud byl v okamžiku startu zasunut a zasunutí válce, pokud byl při startu vysunut

Úkoly:

- 1) Úlohu zapojte a zkontrolujte funkčnost zapojení.
- 2) Seřídte rychlost válce – pomalé vysunutí a pomalé zasunutí.
- 3) Seřídte škrtící ventily na větší rychlost válce a zkontrolujte funkčnost zapojení.
- 4) Vyzkoušejte funkci obvodu pro případ delšího držení startovacího tlačítka.

**Příklad 6:** (Zlepšená funkčnost pneuobvodu z příkladu 5): Nevýhodou zapojení podle příkladu 5 je zejména pro rychlé pohyby válce a delší držení tlačítka START spojení několika pohybů, tj. po vysunutí bude okamžitě následovat zasunutí při jednom stisknutí. Tomu lze zabránit použitím prvku pro zkrácení signálu, který je zapojen v sérii se startovacím tlačítkem, Obr. 3.69.



Obr. 3.69 Schéma pneumatického obvodu z předchozího příkladu, rozšířené o časový člen – zkrácení signálu

### 3.2.9 Hledání chyb v pneumatických obvodech

Nejprve je nutné poznamenat, že nejlepším návodem pro bezporuchový provoz je předcházení příčinám poruch a tedy systematická preventivní údržba:

- 1) Kvalitní rozvod vzduchu, bez ztrát a kolísání tlaku, je základním předpokladem bezporuchového provozu pneumatického zařízení.
- 2) Pravidelná údržba jednotky úpravy vzduchu, tj. pravidelné odkalování, kontrola, výměny, popř. promytí filtrů, kontrola a správné nastavení tlaku na redukčním ventilu, a pokud je použita, pak správné nastavení tlakové maznice.
- 3) Kontrola těsnosti všech prvků, vedení, šroubení a podobně, preventivní odstraňování netěsností.
- 4) Kontrola správného nastavení a upevnění všech snímačů:
  - kontrola upevnění a nastavení mechanických narážek na koncové spínače, upevnění a nastavení polohy snímačů,  
POZOR – snímač není doraz, špatné nastavení může vést k poškození anebo zničení snímače!
  - upevnění a správná poloha magneticky ovládaných snímačů na pneumatorech (pomocí prosvětlovací LED diody),
  - upevnění a předepsaná vůle oproti clonce u indukčních snímačů,
  - čistota a správné nastavení polohy optosnímačů,  
POZOR – reflexní optosnímače mění měřicí dosah podle kvality povrchu a barvy snímaného materiálu!
  - správné upevnění a ochrana přívodů k elektrickým snímačům,
  - atd.

Velmi obtížně zjistitelné poruchy vznikají v důsledku neodborného zásahu obsluhy, popř. dalších neoprávněných osob.

Při zjištění závady je nutné vědět, v jaké fázi pracovního cyklu závada vznikla a postupovat cílevědomě a v postupných krocích (nelze provádět více úprav současně bez prověření jejich účinku na systém).

Je nutné oddělit postup:

- a) rozpoznání (identifikace) místa příčiny poruchy:
  - v pneumatickém výkonovém obvodu,
  - v řídicím obvodu,
- b) určení prvku komponenty, který je příčinou závady,
- c) odstranění závady:
  - seřízením parametrů prvku způsobujícího poruchu,
  - výměnou vadného prvku,
  - změnou parametrů nastavených na řídicím systému.



### 3.3 Elektrické pohony strojů a zařízení

Elektrické pohony se staly výrazným prostředkem k efektivní automatizaci výroby a jejich význam v posledním období výrazně roste a speciální elektropohony postupně vytlačují a nahrazují původně aplikované tekutinové motory (pneumatické a hydraulické pohony).

Obecně lze běžné používání elektropohonů v průmyslových aplikacích zjednodušeně vymezit takto:

- a) elektropohony s asynchronními motory,
- b) elektropohony se stejnosměrnými motory (DC pohony),
- c) elektropohony s bezkartáčovými motory (BLDC motory, Brushless servopohony),
- d) elektropohony s krokovými motory,
- e) elektropohony s lineárními motory.

Postupně jsou zde podrobněji rozebrány jednotlivé typy elektropohonů a zdůrazněny ty jejich vlastnosti, které jsou určující z hlediska jejich efektivní použitelnosti.

#### 3.3.1 Elektropohony s asynchronními motory

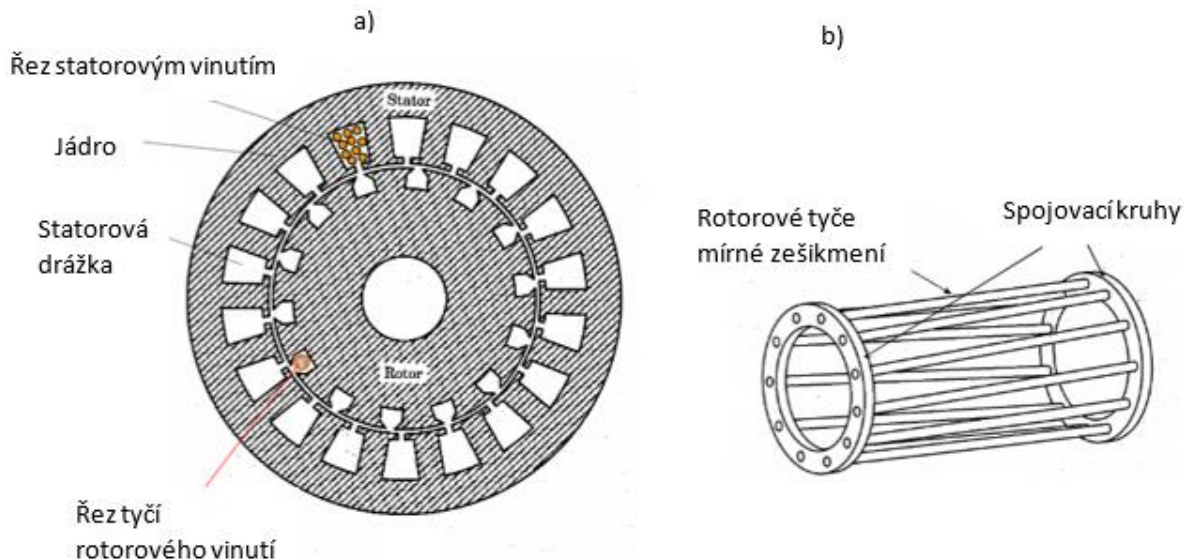
Elektropohony s asynchronními motory s kotvou nakrátko lze považovat za nejjednodušší a nejrozšířenější typ pohonů ve strojírenství. Je přirozenou snahou využívat tyto jednoduché, spolehlivé a cenově přístupné motory v pohonech výrobních strojů, ale také v pohonech dopravníků, zdvihacích zařízení, pomocných zařízení a periferií robotizovaných technologických pracovišť apod. Motor nemá části podléhající opotřebení a jeho životnost je určena trvanlivostí použitých ložisek (10 000 až 50 000 provozních hodin).

Pro menší výkony (přibližně do 1kW) se užívají často jednofázové motory s pomocnou fází a kondenzátorem, pro široký rozsah výkonů, už od 80 W se užívají asynchronní motory trojfázové, nejčastěji v provedení s kotvou nakrátko. Konstrukčně je asynchronní motor s kotvou nakrátko ukázán na Obr. 3.70.

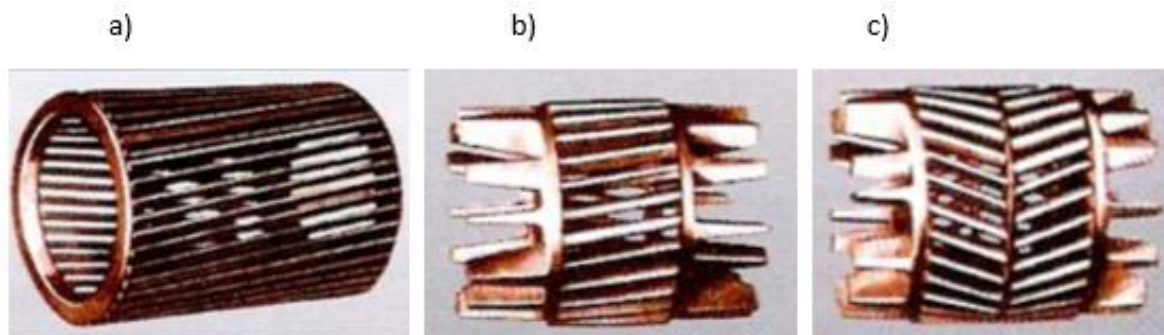


Obr. 3.70 Řez třífázovým asynchronním motorem s kotvou nakrátko, zdroj: <https://memim.com/induction-motor.html>

Stator je vytvořen z izolovaných plechů s drážkami, ve kterých prochází vinutí z izolovaných měděných vodičů. Kotva nakrátko je tvořena klecí se zešíkmenými tyčkami a na obou koncích jsou tyče spojeny nakrátko prostřednictvím kroužků (Obr. 3.71), které mohou mít širokou škálu provedení (Obr. 3.72). Zešíkmení tyček přináší větší stabilitu chodu rotoru a odolnost proti vyšším harmonickým frekvencím a tím snížení hlučnosti chodu.

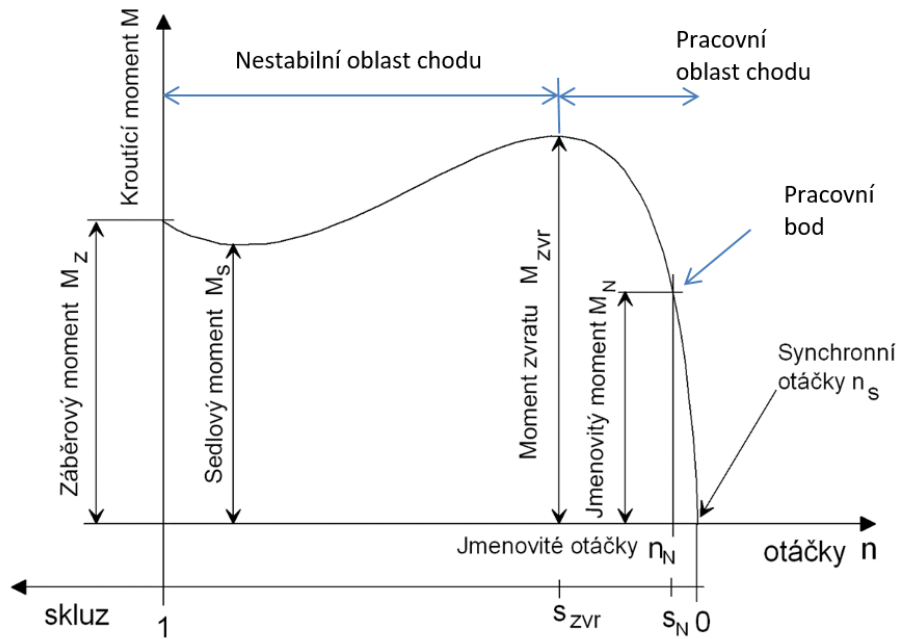


Obr. 3.71 Konstrukce rotoru a statoru asynchronního motoru: a – příčný řez motorem; b – klec rotoru se zešíkmenými tyčkami



Obr. 3.72 Možná provedení klecí asynchronních motorů: a – klec se zešíkmenými tyčkami; b – klec s omezenými tyčkami; c – stupňovitá klec

Máme-li hodnotit možnosti aplikace asynchronních motorů, je nutné sledovat charakteristiku asynchronního motoru (Obr. 3.73) a technické možnosti řízení rychlosti.



Obr. 3.73 Otáčko momentová charakteristika asynchronního motoru při konstantním napětí statoru a statorové frekvenci

Z principu činnosti asynchronního motoru je zřejmé, že pro vytvoření točivého momentu je nezbytný určitý rozdíl synchronních otáček  $n_s$  rotoru odpovídajících napájecí frekvenci (točivého magnetického pole) a skutečných otáček  $n$  rotoru při daném zatížení, což lze popsat skluzem

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (3.6)$$

Pracovní oblast je uvažována pro hodnoty skluzu  $s \in (0; s_{ZVR})$ , tj. ve stabilní oblasti charakteristiky a pro rozběh motoru musí být záběrový moment  $M_Z < M_{ZVR}$ . Jmenovitý moment motoru je pak definován poměrem  $\frac{M_{ZVR}}{M_N} > 1.6$

$$(3.7)$$

a tomu odpovídající otáčky v souladu s označením na Obr. 3.73 platí

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_N} \quad (3.8)$$

Pro otáčky asynchronního motoru platí

$$n = (1 - s) \cdot \frac{60 \cdot f}{p_d} \quad [min^{-1}] \quad (3.9)$$

kde  $s$  skluz;

$f$  frekvence napětí statoru;

$p_d$  počet pólových dvojic (pól párů) statoru.

V následující Tab. 3.3 jsou uvedeny počty jmenovitých otáček pro brzdové asynchronní motory.

Tab. 3.3 Parametry asynchronních motorů

Označení motoru	Výkon motoru [W]	Počet pólů	Jmenovité otáčky motoru [ $\text{min}^{-1}$ ]	$M_{zvr}/M_N$
1LE 1003-ODA32	1100	2	2885	3,0
1LE 1003-ODB32	750	4	1450	2,7
1LE 1003-ODC32	550	6	935	2,5
1LE 1501-ODD32	250	8	705	2,0

Pozn.: Platí pro 3 fáze, 400 V, zapojení do hvězdy, motory SIEMENS

Z uvedeného vztahu vyplývají možnosti řízení počtu otáček:

- 1) Regulace změnou skluzu – všechny užívané typy regulace jsou pro aplikace v automatizaci nevhodné.
- 2) Změnou počtu pólových dvojic – lze provádět pouze skokovou regulaci, většinou ve dvou stupních, přepínáním počtu pól párů (např. 1LE 1003-ODX32 má jmenovité otáčky 1450 resp. 2850  $\text{min}^{-1}$ );
- 3) Změnou napájecího kmitočtu – dnes nejčastější.

Regulace otáček změnou napájecího kmitočtu doznala širokého uplatnění buď jako tyristorové měniče (pro velké výkony), resp. nejčastěji pomocí tranzistorových měničů frekvence pro motory s výkony 0,25 – 50 (80) kW. Řada renomovaných výrobců (Siemens, Lenze, Baumühle, Nord, Renold, Brothers, Fanuc, Panasonic a další) dodává širokou škálu frekvenčních měničů s vysokým stupněm vybavenosti a i nejjednodušší frekvenční měniče bez zpětné vazby dovolují programovat širokou škálu obslužných funkcí (např. rozběhové a brzdové rampy, je možné připojit a programovat externí vstupy, umožňující předvolbu žádaných frekvencí a jejich přepínání na základě vnějších logických signálů). Příklad parametrů je v Tab. 3.4. Při aplikacích pohonů s frekvenčními měniči [42] je nutné respektovat pracovní oblasti stanovené mezními charakteristikami, které vymezují oblast pro trvalý provoz.

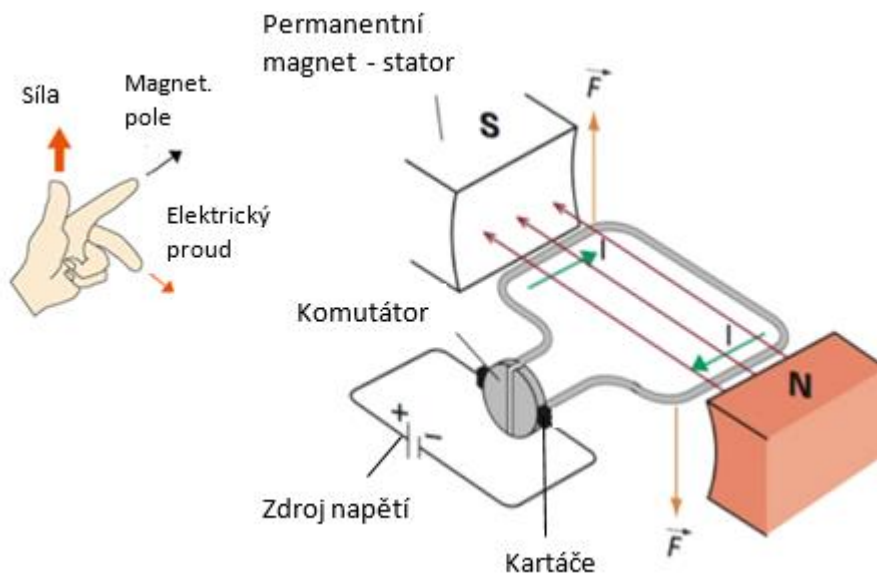
Tab. 3.4 Technická data frekvenčních měničů firmy Lenze

Typ měniče Parametr	Lenze 8100	Lenze 8600
Výstupní výkon	0,76 – 3,6 kVA	1,9 – 72,0 kVA
Jmenovitý výkon motoru	0,25 – 2,20 kW	1,1 – 55,0 kW
Jmenovitý proud měniče	2,0 – 9,5 A	2,9 – 110 A
Maximální proud měniče	3,2 – 11,4 A	4,7 – 176 A
Připojovací napětí	1x 230 V	3 x 400 V
Frekvence sítě	50/60 Hz	50/60 Hz
Výstupní napětí	3 x 0 V až $U_{sítě}$	3 x 0 až $U_{sítě}$
Výstupní frekvence	0 – 480 Hz	0 – 480 Hz

### 3.3.2 Elektropohony s DC motory

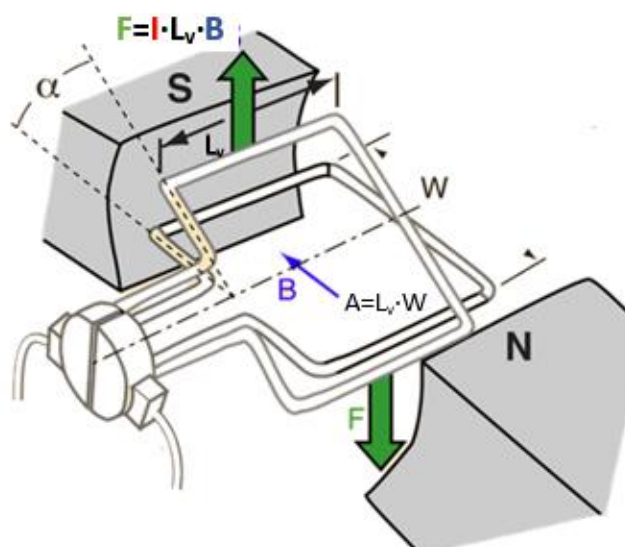
DC motor je jedním ze stejnosměrných motorů, které převádějí stejnosměrnou elektrickou energii na mechanickou energii. Společným konstrukčním znakem DC motorů je stator s póly, rotorem je kotva s vinutím, na které je přiváděno napětí přes komutátor [42, 43].

Princip činnosti stejnosměrného DC motoru lze jednoduše ukázat rozborem chování proudové smyčky umístěné v magnetickém poli permanentního magnetu, Obr. 3.74.



Obr. 3.74 Princip činnosti DC motoru

Je-li k proudové smyčce v magnetickém poli připojeno stejnosměrné napětí, bude působit na větvi smyčky bližší jižnímu pólu magnetu podle Flemingova pravidla levé ruky síla směrem nahoru, na druhé větvi síla směrem dolů vyvolají moment síly, který způsobí natáčení smyčky, Obr. 3.75.



Obr. 3.75 Zdůvodnění funkce komutátoru

Pro vyvozenou sílu platí

$$F = I \cdot L_V \cdot B \quad (3.10)$$

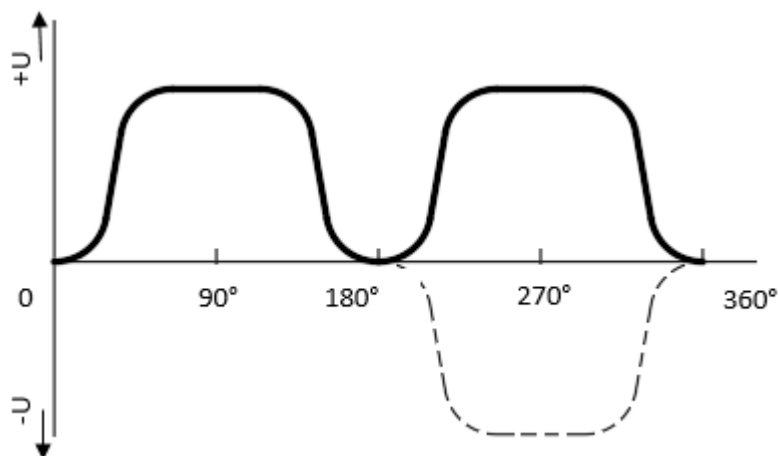
kde  $I$  proud,  
 $L_V$  délka vodiče,  
 $W$  šířka smyčky,  
 $B$  magnetická indukce.

Velikost působící síly závisí na úhlu mezi normálou smyčky a magnetickou indukcí (vektorový součin), pak výsledný působící moment magnetické síly na obdélníkovou smyčku bude mít podle vztahu (3.10) přibližně sinusový průběh

$$M = B \cdot I \cdot A \cdot \sin\alpha \quad (3.11)$$

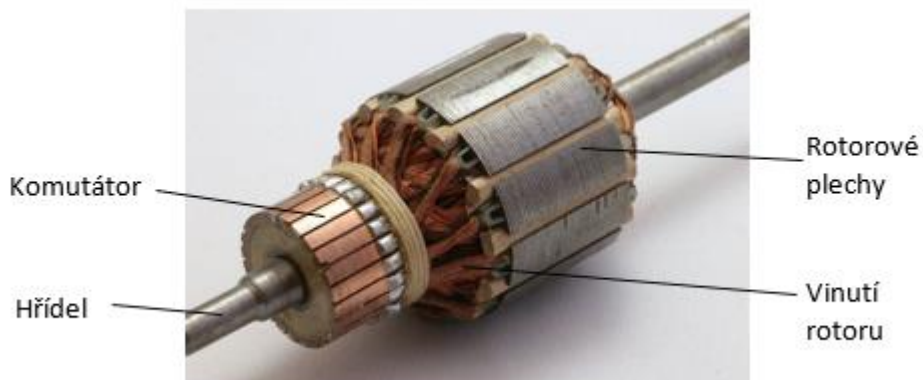
kde  $A$  plocha smyčky ( $A = L_V \cdot W$ ),  
 $\alpha$  úhel natočení.

Napětí je ke smyčce připojeno tak, aby fungovalo za pohybu přes izolované půlkroužky pomocí kartáčů. Tzv. komutátorem je realizována změna napájení tak, že se změní smysl proudu a tím je docíleno působení točivého momentu na stejnou stranu (Obr. 3.75 a Obr. 3.76).

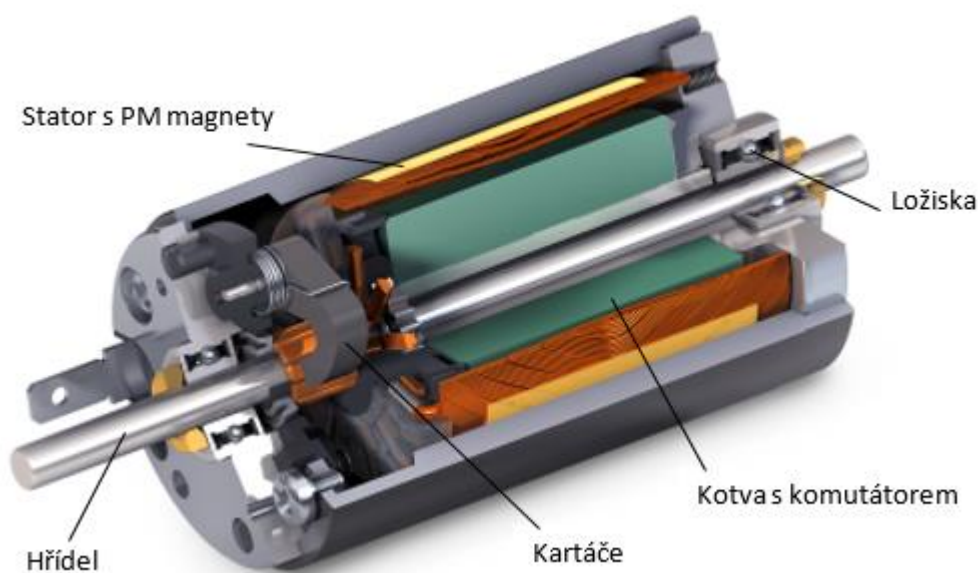


Obr. 3.76 Průběh napájení proudové smyčky

Rotor (kotva) nese v drážkách rozložené vinutí s cívkami vyvedenými k lamelám mechanického komutátoru (Obr. 3.77). Ten přivádí správně orientovaný proud do cívek vinutí rotující kotvy tak, aby všechny proudem protékané cívkové strany vytvářely v magnetickém poli hlavních pólů točivý moment souhlasného smyslu. Ke komutátoru přiléhají kartáče z grafitu s otočným, popř. posuvným pohybem, dotlačované do kontaktu pružinou. Řez moderním propojením DC motoru je na Obr. 3.78.



Obr. 3.77 Rozložené vinutí kotvy s komutátorem

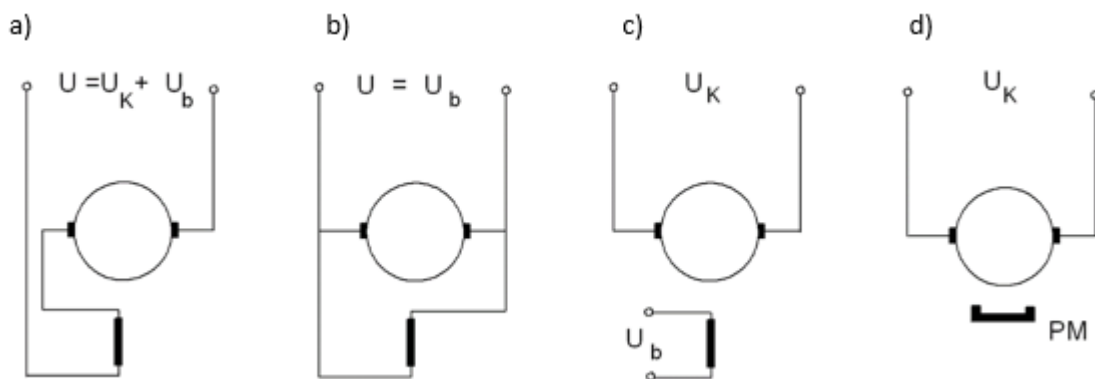


Obr. 3.78 Řez moderním provedením DC motoru (převzato od firmy Maxon)

Společným konstrukčním znakem DC motorů je stator s póly, rotorem je kotva s vinutím, na které je přiváděno napětí přes komutátor [42, 43]. V zásadě je nutné rozlišit motory:

- sériové,
- derivační,
- s cizím buzením,
- s permanentními magnety.

Tyto motory se liší vnitřním zapojením (viz schematické znázornění na Obr. 3.79) a vlastnostmi.



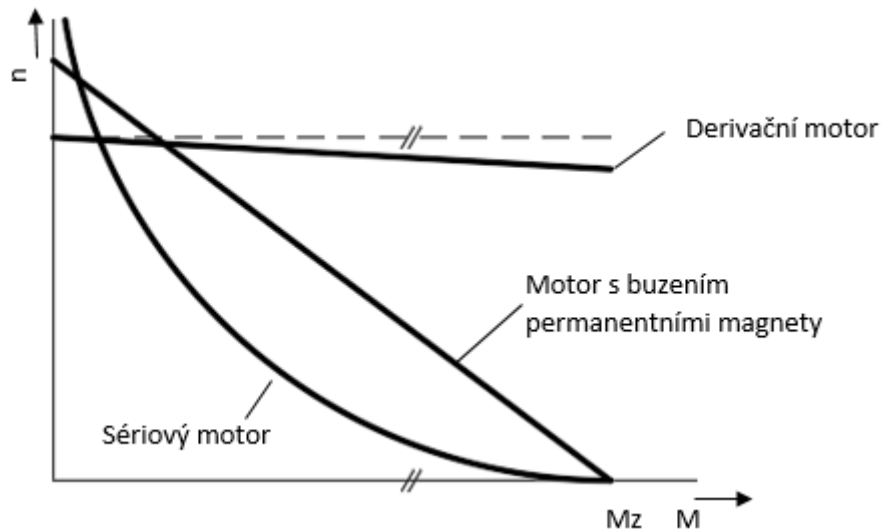
Obr. 3.79 Schémata základních typů DC elektromotorů: a – sériový motor, b – derivační motor, c – motor s cizím buzením, d – motor s buzením permanentními magnety

Nejrozšířenějším způsobem řízení pohybové frekvence DC motorů je řízení změnou napětí v obvodu kotvy. Pro jednotlivé typy motorů se regulační možnosti a vlastnosti pohonů liší, zde je uvedena pouze základní charakteristika:

- 1) Sériový motor – vhodný pro velké záběrové momenty, má měkkou charakteristiku a nesmí pracovat nezatížený (nebezpečí poškození kotvy) – nejčastější aplikace jako spouštěč (startér) automobilů.
- 2) Motory s paralelním buzením (derivační) – motory mají velmi tvrdou charakteristiku (otáčky se pouze nepatrně mění se zatížením – max. o 5 – 10 %). Otáčky se regulují především změnou napětí kotvy, případně přes zařazený reostat změnou budícího napětí.
- 3) Motory s cizím buzením – mají podobné vlastnosti jako derivační, jsou vhodné pro hospodárné řízení pohybové frekvence. Magnety se budí konstantním napětím a kotva se napájí proměnným napětím. Mají široký regulační rozsah a dostatečně tvrdou momentovou charakteristiku a dobré dynamické vlastnosti. Pro PR se aplikují výjimečně – mají nižší měrný výkon oproti motorům s permanentními magnety.
- 4) Motory s permanentními magnety – budící vinutí ve statoru je nahrazeno permanentními magnety. Svými vlastnostmi tvoří tyto motory přechod mezi sériovým a derivačním motorem, protože mají poněkud měkčí charakteristiku. Pro aplikace u PR jsou nevhodnější a nejčastěji užívané motory, které mají *výhodné vlastnosti*: vysoký záběrový moment; lineární závislost momentu na rychlosti otáčení; velmi dobré dynamické vlastnosti; odpadá budící vinutí, motor je menší, lehčí, konstrukčně jednodušší (má vyšší měrný výkon); nové materiály permanentních magnetů zlepšují charakteristiku motoru, přičemž klasické slitiny Hliník – Nikl – Kobalt (Al – Ni – Co) jsou nahrazovány magnety ze vzácných zemin s velkou koercitivní silou, nejlepší Samarium – Kobalt (Sm – Co), levnější Praseodym – Kobalt (Pr – Co) nebo Železo – Neodym – Bór (Fe – Nb – B).

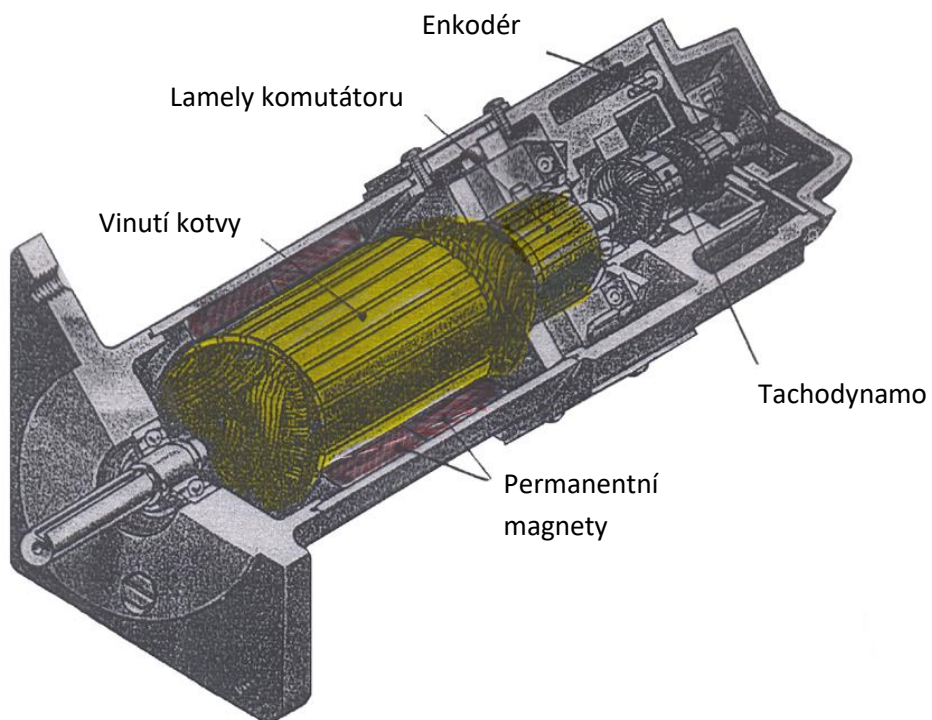
Porovnání momentových charakteristik DC motorů je zobrazeno na Obr. 3.80. Nevýhody DC motorů jsou: závislost na teplotě z důvodů velkého tepelného odporu a špatného chlazení, jiskření komutátoru – opotřebení a opalování kartáčů.



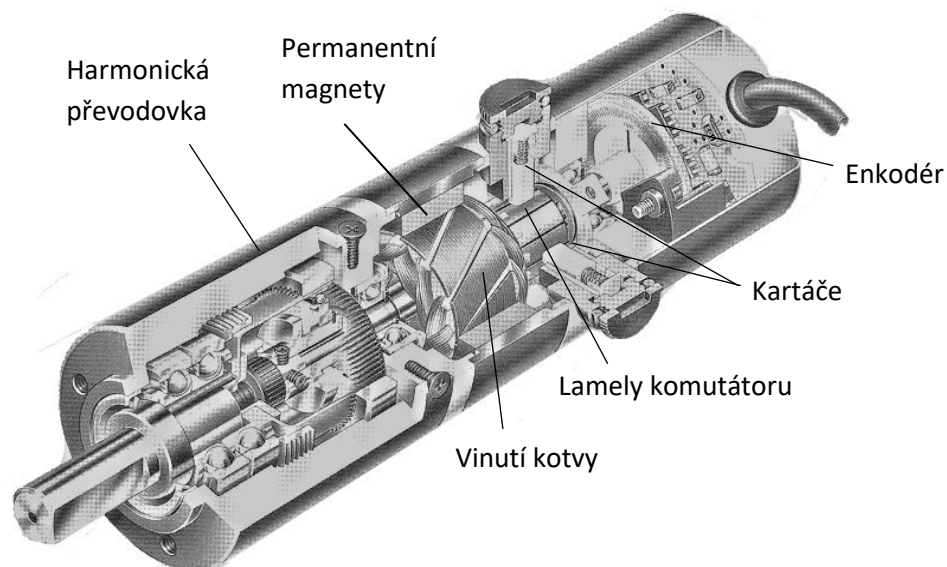


Obr. 3.80 Momentová charakteristika DC motorů

Na dalších obrázcích je ukázán řez typickým klasickým provedením DC motoru s válcovou kotvou (Obr. 3.81) a konstrukční provedení rychloběžného DC pohonu s diskovým motorem a harmonickou převodovkou (Obr. 3.82).



Obr. 3.81 Řez typickým DC servomotorem se snímačem otáček (tachodynamo) a snímačem polohy (inkrementální čidlo)

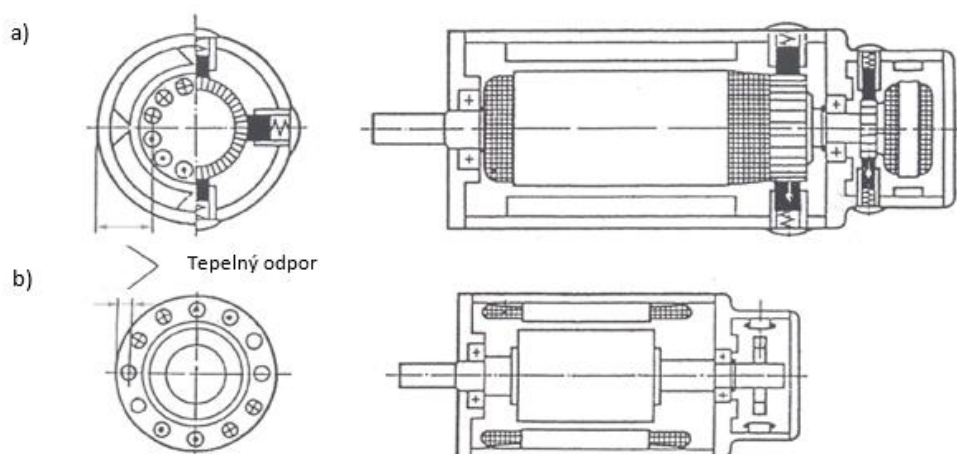


Obr. 3.82 DC servopohon s diskovým motorem a harmonickou převodovkou

U dnes nasazených robotů jsou stále DC servopohony široce používány, avšak v současné době jsou stále častěji nahrazovány modernějšími bezkartáčovými motory (BLDC).

Hlavní nevýhody DC servopohonů jsou spojeny zejména:

- s mechanickou komutací – s přechodovými odpory, napěťovými pulzy, jiskřením a opotřebením komutátoru a opalováním kartáčů (životnost motoru je dána opálením kartáčů),
- se závislostí na teplotě a problematickým chlazením vinutí kotvy, neboť permanentní magnety ve statoru tvoří značný tepelný odpor,
- s rozměrovou náročností ve srovnání s bezkartáčovými motory (viz Obr. 3.83),
- s analogovým uspořádáním řídicího systému, který není v souladu s tendencemi digitalizace propojení programovacího CNC řízení a výkonového bloku.



Obr. 3.83 Porovnání velikosti kartáčového a bezkartáčového motoru: a – kartáčový (DC motor); b – bezkartáčový (BLDC) motor

### 3.3.3 Elektropohony s bezkartáčovými motory

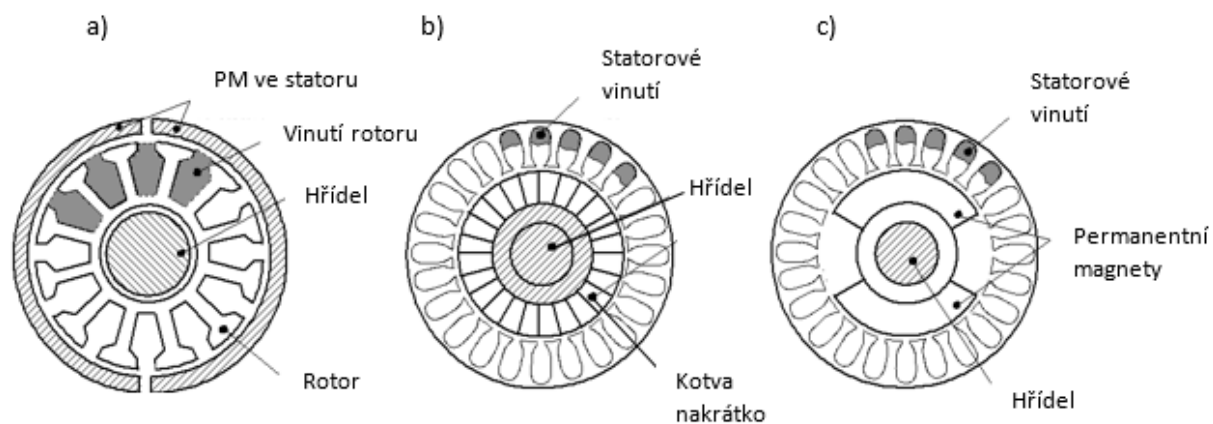
Nejmodernější pohony průmyslové automatizační techniky a průmyslových robotů v současné době využívají nejčastěji bezkartáčových motorů. Pro označení uvedeného typu motorů se užívá termín „stejnoseměrný bezkartáčový motor, angl. Brushless DC = BLDC“ (BLDC motory) anebo od způsobu komutace „EC motor“ (elektronicky komutovaný motor, angl. Electronically commutated motor) a také ne zcela správně označení – „AC servomotor“.

Motivací k vývoji těchto motorů byly především snahy o:

- dosažení vysokých rychlostí;
- zlepšení dynamických vlastností (krácení doby brzdění a akcelerace);
- zjednodušení údržby;
- zmenšení rozměrů;
- zvýšení specifického příkonu a
- zvýšení spolehlivosti a životnosti.

Bezkartáčový motor je hybrid, který v konstrukčním provedení kombinuje nejlepší vlastnosti klasických DC kartáčových motorů a asynchronních motorů s kotvou nakrátko.

Princip činnosti BLDC motorů vychází z klasického uspořádání DC kartáčových motorů s permanentními magnety [44], přičemž došlo k záměně funkce rotoru a statoru. Permanentní magnety jsou umístěné v rotoru a vinutí je ve statoru. Porovnání příčných řezů uvedených motorů je patrné z Obr. 3.84.



Obr. 3.84 Porovnání principů konstrukce motorů (příčný řez): a – DC motor; b – asynchronní motor; c – bezkartáčový motor (BLDC)

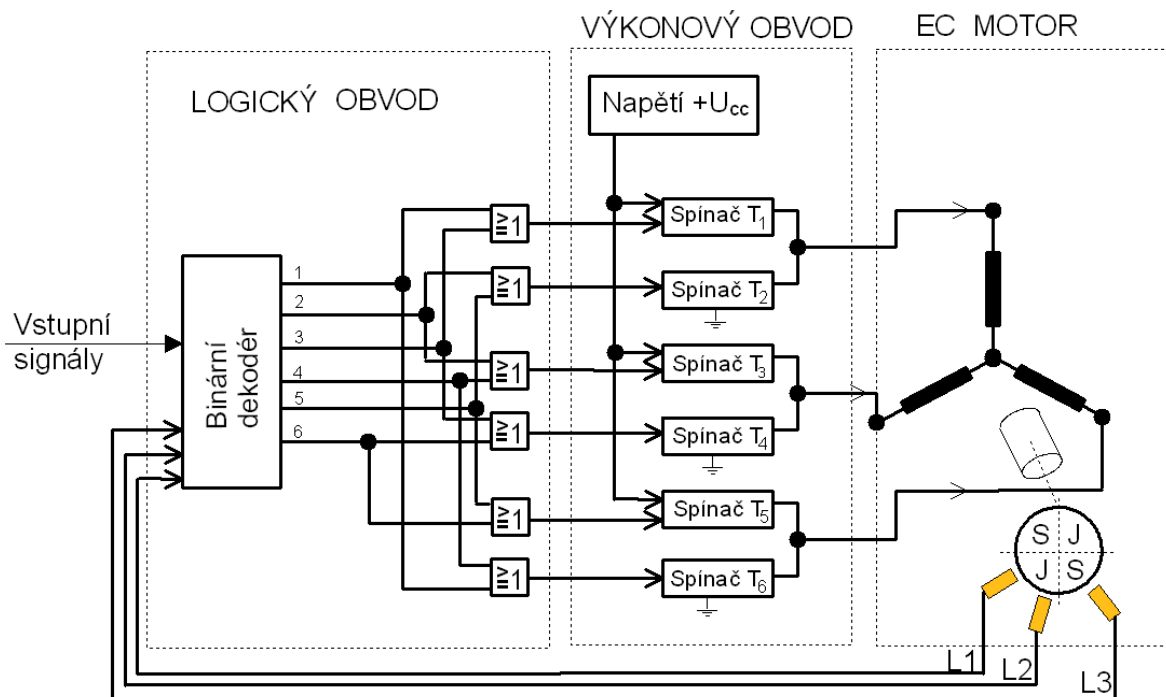
Obecně platí, že moment na hřídeli motoru je úměrný vektorovému součinu magnetických indukcí statoru  $\vec{B}_S$  a rotoru  $\vec{B}_R$

$$\vec{M}_K = k \cdot (\vec{B}_S \times \vec{B}_R), \text{ a také } |\vec{M}_K| = k \cdot |\vec{B}_S| \cdot |\vec{B}_R| \cdot \sin \gamma \quad (3.12)$$

kde  $\gamma$  je vzájemný úhel obou vektorů.

Stejného účinku jako u komutátorového motoru bude dosaženo v případě, že permanentní magnety budou umístěny v rotoru a proud bude přepínán do cívek statoru. Vinutí statoru bezkartáčového motoru je provedeno většinou třemi shodnými cívkami statoru. Mechanické spínání komutátorem je v případě bezkartáčového motoru nahrazeno elektronickým pomocí spínacích tranzistorů – elektronickou komutací. Spínání tranzistorů musí být odvozeno od okamžité polohy rotoru vůči statoru tak, aby platilo  $\gamma = 90^\circ$ .

Pro pochopení funkce bezkartáčového motoru je v Obr. 3.85 uvedeno zjednodušené blokové schéma regulace. Řízení BLDC motoru je rozděleno do tří částí: logický obvod, výkonový obvod a vlastní BLDC motor vybavený snímači poskytujícími informace o okamžité poloze rotoru (buď pomocí Hallové sondy, rezolveru anebo jednoduchého optoelektronického snímače).



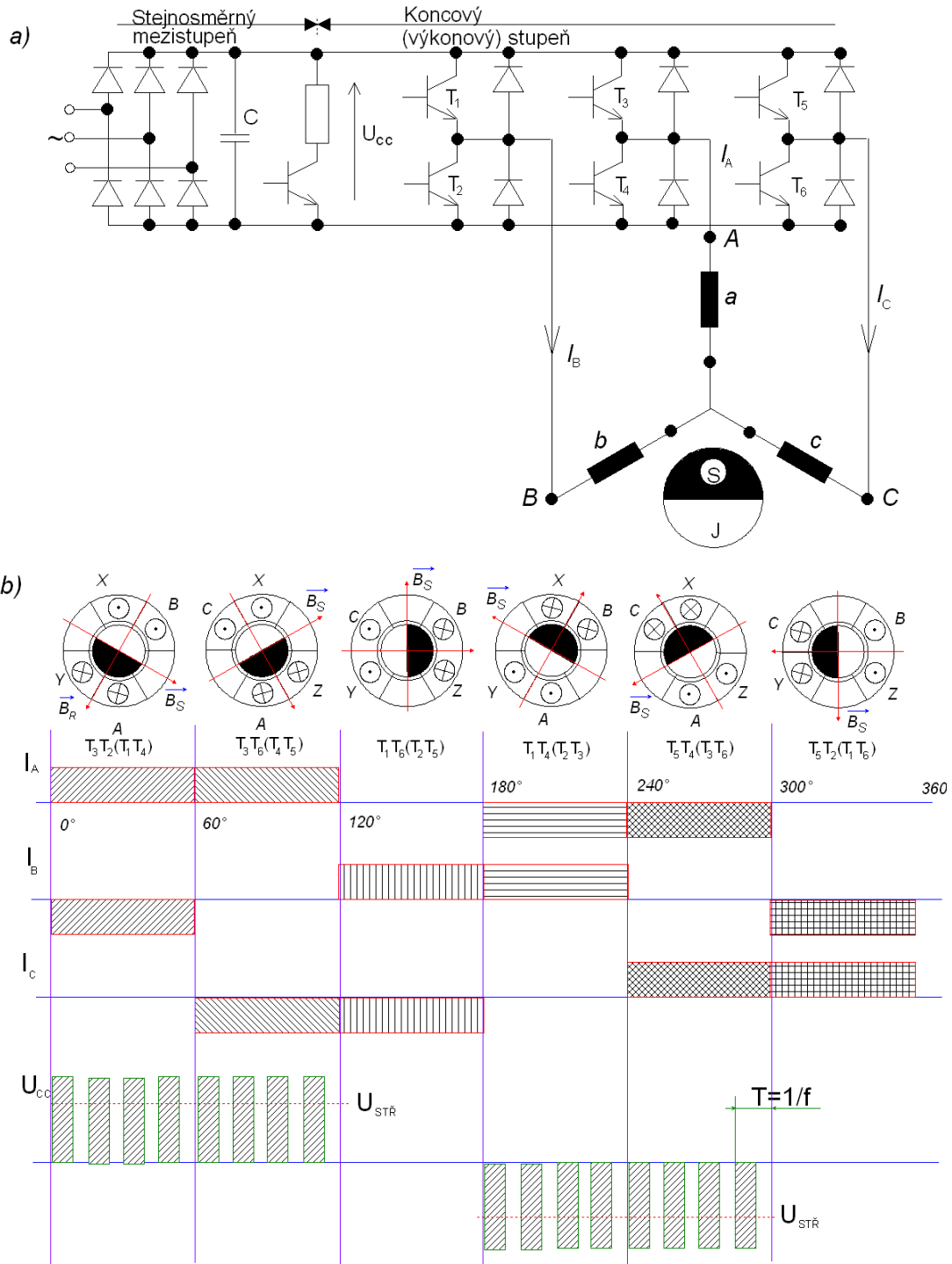
Obr. 3.85 Zjednodušené blokové schéma regulace BLDC motoru [45, 46]

Pro BLDC motory menších výkonů je výkonový obvod tvořen tranzistorovým měničem. Princip třífázového tranzistorového měniče, který zajišťuje obdélkové napájení motoru, je uveden na Obr. 3.86 a. Tranzistorový měnič obsahuje jednak stejnosměrný mezistupeň a koncový výkonový stupeň měniče, který je složen ze šesti tranzistorů s paralelními diodami, plní kromě komutace i úlohu regulace proudu motoru.

Elektronický komutátor je vlastně logický obvod, který na základě informací o poloze rotoru postupně spíná svorkové proudy  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  v takovém pořadí, aby byla spínáním jednotlivých dvojic tranzistorů (podle Obr. 3.86 b) zajištěna obdélková modulace napájecího proudu statorových cívek tak, že stále platí  $\vec{B}_R \perp \vec{B}_S$ .

Jestliže je dán vstupní povel, potom binární dekodér vyhodnocuje výstupy z Hallových sond (zda jsou sepnuty). Například jestliže je hřídel (podle Obr. 3.86 b) v poloze odpovídající  $0^\circ$ , pak vstup

do logického obvodu (výstup Hallových sond) informuje, že Hallové sondy na linkách L2 a L3 jsou sepnuty. Binární dekodér interpretuje tato data do logického výstupu. Pro daný případ je sepnut logický signál do výstupu 5 (Obr. 3.85). Tento signál je zaveden do dvou disjunkcí a přes ně jsou sepnuty tranzistory T3 a T2, tím je připojeno napájení do vinutí *a* a *b*. Pootočením rotoru o úhel 60° se změní logický vstup na sondě L1 do hodnoty vypnuto a výstup binárního dekodéru se změní na 4, tím dojde k sepnutí tranzistorů T3 a T6 a následně k napájení fází *a* a *c*. Další postup lze pro zvolený smysl rotace, proti smyslu hodinových ručiček, sledovat na Obr. 3.86 b s užitím Tab. 3.5.



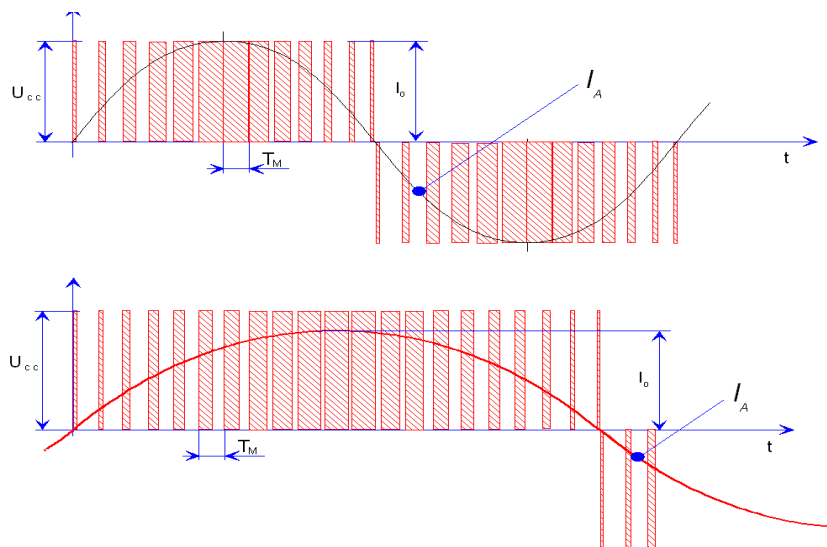
Obr. 3.86 Obdélkové napájení bezkartáčového motoru třífázovým tranzistorovým měničem [47]

Tab. 3.5 Princip elektronické komutace (rotace proti směru hodinových ručiček)

	0°	60°	120°	180°	240°	300°	360°=0°
<b>L1</b>	1	0	0	1	1	1	1
<b>L2</b>	0	0	1	1	1	0	0
<b>L3</b>	1	1	1	0	0	0	1
<b>Výstup binárního dekodéru</b>	5	4	6	2	3	1	5

<b>Spínané tranzistory</b>	<b>T3 T2</b>	<b>T3 T6</b>	<b>T1 T6</b>	<b>T1 T4</b>	<b>T5 T4</b>	<b>T5 T2</b>
<b>Napájené fáze</b>	<b>a + b</b>	<b>a + c</b>	<b>b + c</b>	<b>b + a</b>	<b>c + a</b>	<b>c + b</b>

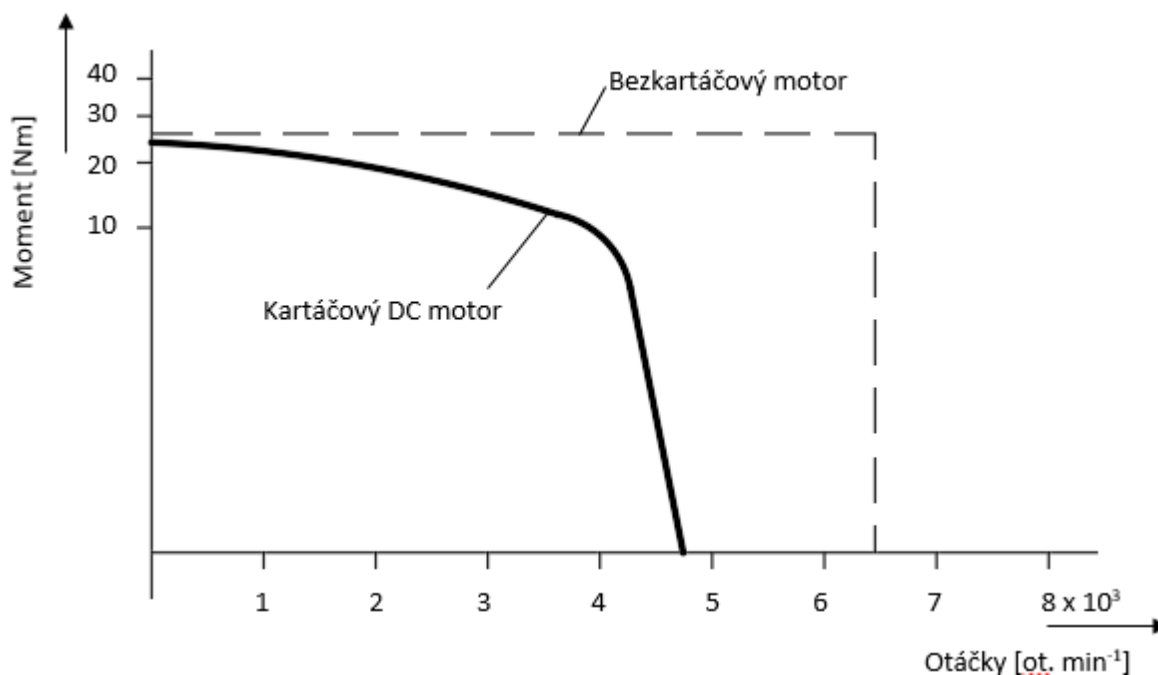
Významným zlepšením chování BLDC motoru je tzv. pulzní šířková modulace (v odborné literatuře označovaná PWM, z angl. Pulse – Width – Modulation) proudu přiváděného do statoru. Modulační obvod se skládá jednak z modulačního generátoru, zdroje pilového napětí, kterým je určován kmitočet modulace, a z komparačních obvodů, kterými lze měnit šířku (střídu) pulzů. Výsledkem je "hladký" sinusový průběh proudu přiváděného do statoru (Obr. 3.87). Významně se tak rozšiřují regulační možnosti a jsou vytvořeny předpoklady pro klidný chod v celém regulačním rozsahu rychlostí a zejména se zlepšují podmínky pro klidný chod v oblasti nízkých rychlostí.



Obr. 3.87 Princip sinusové modulace pomocí pulzní šířkové modulace proudu

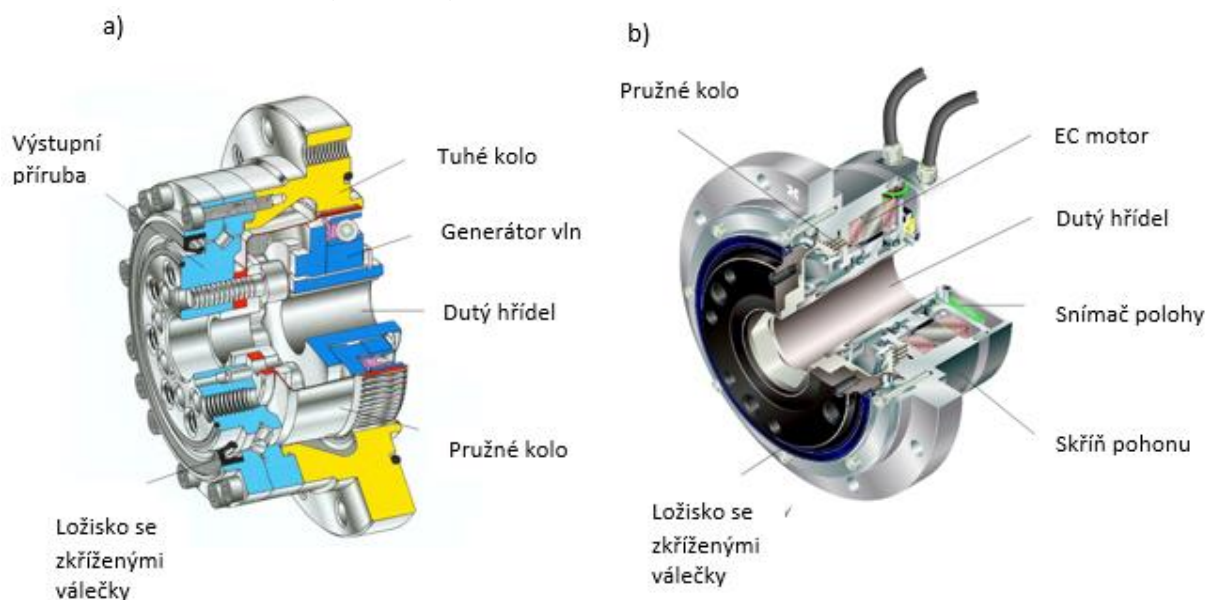
Uvedené informace umožňují podrobnější a přesnější porovnání klasických kartáčových DC motorů a bezkartáčových motorů v pohonech robotů, přičemž výhodnost BLDC motorů v konstrukcích pohonů robotů lze shrnout takto:

- 1) Odpadá mechanický komutátor a obtíže s ním spojené (nutnost údržby, opotřebení a následkem toho malá životnost). BLDC motory mají životnost prakticky omezenou pouze životností ložisek (cca 30 000 provozních hodin), mají klidný chod bez akustických efektů.
- 2) Elektrická komutace umožňuje vyvinout maximální moment i při maximálních otáčkách, takže nedochází k omezování výkonu (Obr. 3.88).



Obr. 3.88 Porovnání provozních charakteristik dvou ekvivalentních motorů

- 3) Motor má lepší chlazení, protože tepelné ztráty vznikají ve statoru a odvod tepla je možný s menším tepelným odporem (Obr. 3.83).
- 4) Důsledkem odstranění komutátoru, dobrého chlazení a vyšší momentové přetížitelnosti jsou menší rozměry a úspora hmotností, porovnání velikostí obou typů motorů pro stejný výkon při maximálních otáčkách je na (Obr. 3.83).
- 5) Pohony robotů se realizují v kombinaci rychloběžného motoru a převodovky do pomala a častá je aplikace bezkartáčových motorů v kompaktním provedení s harmonickou převodovkou vestavěnou do motoru (Obr. 3.89).



Obr. 3.89 Harmonická převodovka příklady provedení (firma Harmonic Drive): a – příklad konstrukčního řešení HD; b – elektrický pohon se zkrácenou převodovkou

### 3.3.4 Elektropohony s krokovými motory

Výrazné zlepšování technických parametrů pohonů s krokovými motory, tj. inovace a zvyšování technických parametrů krokových motorů samotných, ale zejména ovládací elektroniky, umožňuje rozšíření aplikací těchto pohonů ve stavbě automatizačního zařízení a v konstrukci účelových robotů [44, 48,].

Aplikace pohonů s krokovými motory v konstrukcích PR a manipulátorů je podmíněna jejich přednostmi, kterými jsou zejména:

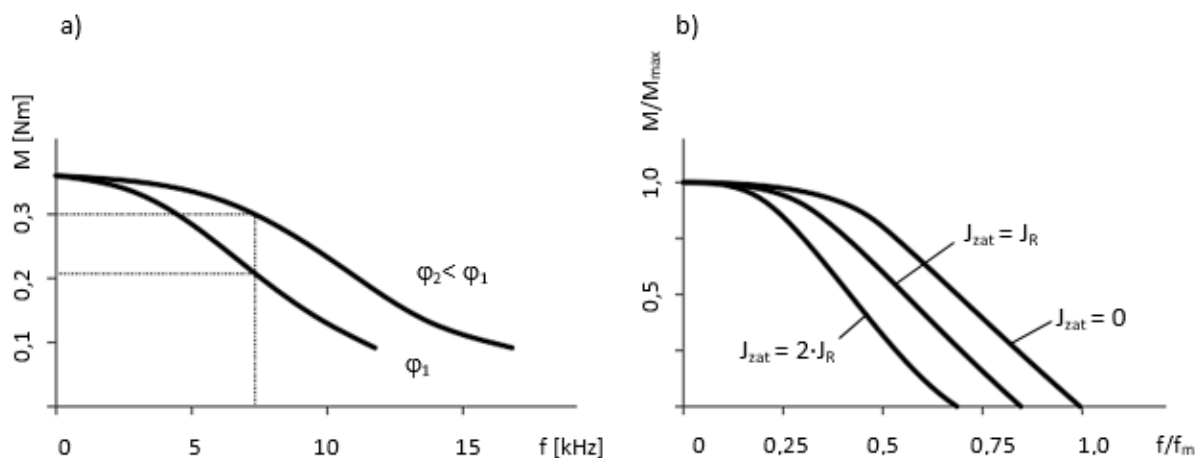
- vysoká přesnost polohování (jsou dosažitelné hodnoty velikosti kroku),
- jednoduché propojení s číslicovým zařízením (digitální řízení),
- možnost práce v otevřené smyčce (bez zpětné vazby),
- příznivý poměr mezi cenou a technickými parametry.

S respektováním nevýhodných vlastností:

- nesnese přetížení (přetížení vede k porušení synchronizace s řídicími pulzy),
- jsou vyráběny pro poměrně nízké hodnoty momentů ( $M_n = 0,2 - 10 \dots 15 \text{ Nm}$ ),
- mají nízkou hodnotu měrného momentu  $\frac{M_{max}}{m} = 0,5 \div 0,8 \dots \frac{(0,9)Nm}{kg}$ , pro BLDC motory je pak tato hodnota cca 4 x větší,
- dynamické vlastnosti se mění a výrazně zhoršují s velikostí momentu setrvačnosti připojené zátěže.

Krokové motory (KM) mají poměrně jednoduchou vnitřní strukturu, kde řídicí impulzy se převádějí přímo na změnu polohy výstupu (rotoru) krokového motoru v přesně definovaném poměru k počtu pulzů. Reverzace pohybu se provádí změnou sledu impulzů do jednotlivých fází a rychlost je přímo úměrná frekvenci impulzů.

Vlastnosti KM a kvalitativní možnosti jejich zlepšování lze sledovat na charakteristikách (Obr. 3.90).



Obr. 3.90 Charakteristiky krokového motoru: a – pro dva krokové motory s odlišnou velikostí kroku  $\varphi_1, \varphi_2$ ; b – závislost momentu na hřídeli motoru na frekvenci kroků pro různé velikosti momentu setrvačnosti vnější zátěže



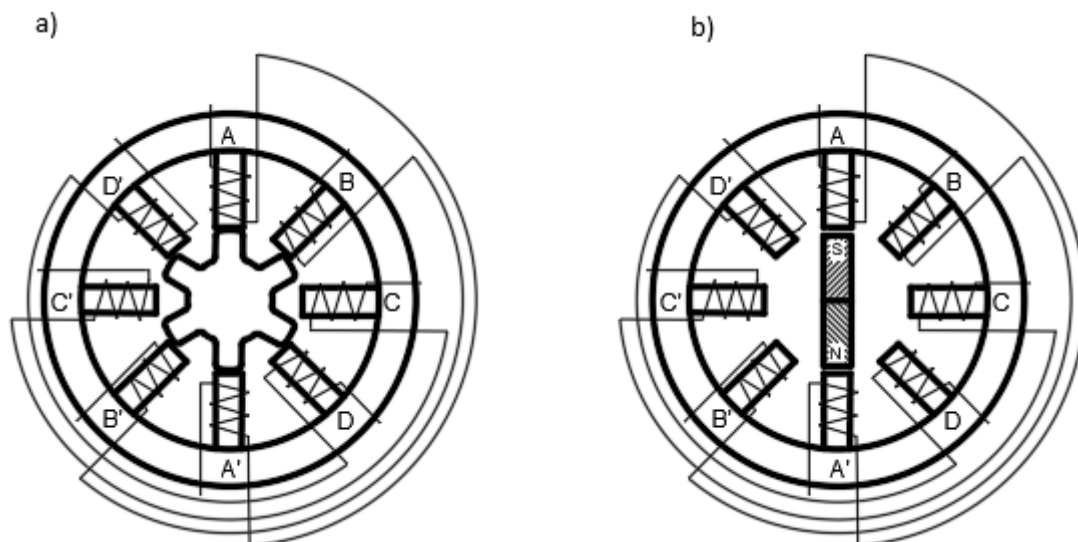
Charakteristika na Obr. 3.90 a ukazuje kvalitativní závislost momentu na hřídeli motoru na frekvenci kroků pro dva krokové motory s odlišnou velikostí kroku  $\varphi_1, \varphi_2$ . Je zřejmé, že z hlediska aplikace pohonu se chová KM s menší velikostí kroku lépe, protože dovoluje při zvolených otáčkách odebírat větší krouticí moment bez porušení synchronizace (bez ztráty kroku).

Charakteristika na Obr. 3.90 b pak ukazuje závislost momentu na hřídeli motoru na frekvenci kroků pro různé velikosti momentu setrvačnosti vnější zátěže. Z charakteristiky je zřejmé, že zátěž svým momentem setrvačnosti výrazně negativně ovlivňuje chování KM.

### 3.3.4.1 Konstrukce krokových motorů

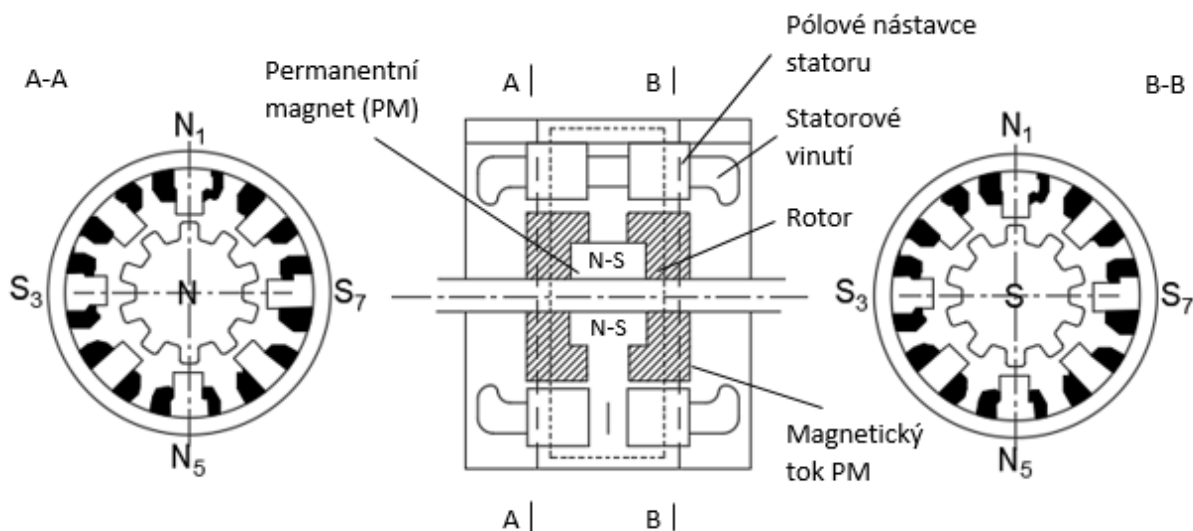
Z hlediska konstrukčního řešení lze rozlišit tři základní koncepce KM:

- **Reakční nebo také reluktanční** (*reluktance = magnetický odpor*) motory využívají schopnosti magnetického obvodu natáčet se vždy do mechanické konfigurace s co nejmenší energií (co nejmenším magnetickým odporem), Obr. 3.91 a. Vhodně tvarovaný magnetický obvod se zuby z magneticky vodivého materiálu se vždy natočí těmito zuby pod póly statoru s cívkami (zdroji magnetického toku), aby zvýšil magnetický tok a snížil magnetický odpor (reluktanci) celé konstrukce. Pouštěním proudu do cívek (nejjednodušeji zapínáním a vypínáním cívek) je potom možné s rotorem pohybovat.
- **Motor s permanentními magnety** využívá magnetického pole vytvořeného permanentními magnety, v magnetickém obvodu se potom objevuje daleko větší magnetický tok a motor je daleko "živější". Severní a jižní póly pak vytvářejí různě směřované toky po celém motoru a vhodným elektrickým proudem se pak motor roztáčí v různém směru, Obr. 3.91 b.
- **Hybridní** znamená, že tento motor v sobě kombinuje dva předcházející typy motorů. Hybridní krokový motor má vinutí ve statoru, permanentní magnet mezi částmi rotoru a vzduchovou mezeru mezi rotorem a statorem. Kuličková ložiska jsou pak jedinou třecí plochou při otáčení motoru [49].



Obr. 3.91 Princip krokových motorů: a – Reakční nebo také reluktanční KM, b – KM s permanentními magnety

Konstrukce hybridního krokového motoru je zřejmá z Obr. 3.92. Satorové vinutí je provedeno obdobně jako u reakčních KM a napájeno stejnosměrným proudem. Nejčastější je bipolární uspořádání, kdy vinutí každé fáze je rozděleno na dva protilehlé pólové nástavce a umožněno paralelní proudové napájení vyšším proudem a tím je dosaženo větších momentů. Rotor obsahuje permanentní magnety zmagnetizované v axiálním směru a je tvořen dvojicí ozubených kol s ozuby, které tvoří pólové nástavce přesazenými o 1/2 zubového dělení. Při proudovém zatěžování jednoho satorového vinutí působí na rotor krouticí moment tak dlouho, až se zuby na satorových pólech a ozuby rotoru dostanou do opozice – přesně proti sobě, tomu také odpovídá magnetické dělení. Je-li napájeno následující satorové vinutí, dojde k pohybu o další krok. Každému proudovému impulzu odpovídá pootočení rotoru o právě jeden krok. Statická momentová charakteristika s průběhem momentů je uvedena na Obr. 3.93.

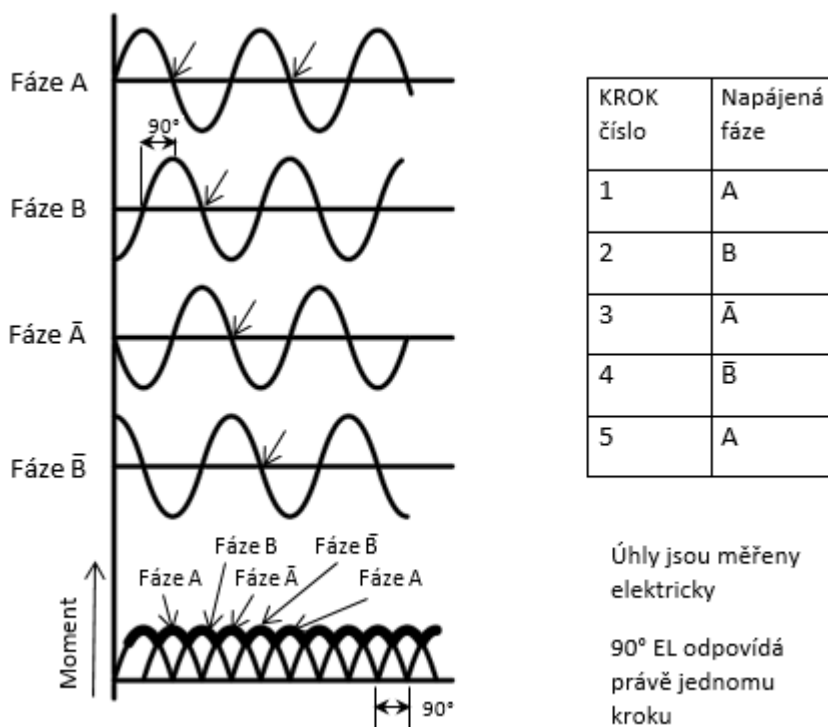


Obr. 3.92 Princip hybridního (dvoufázového) krokového motoru

Krokové motory mají možnost, v důsledku rozdílného napájení, pracovat ve dvou režimech chodu:

1. Režim plný krok, u dvoufázových motorů nejčastěji 200 kroků/ot. ( $\sim 1,8^\circ$  na krok).
2. Režim půlkrok – pro dvoufázové KM 400 kroků/ot. ( $\sim 0,9^\circ$  na krok).

Tuto přesnost lze podstatně zvýšit tzv. mikrokrokováním, jehož princip je založen na rozdělení každého kroku na pevný počet mikrokroků. Běžné řídicí jednotky podporují dělení kroku na 16, 32, 64 a 128 mikrokroků, špičkově až 1024 mikrokroků.

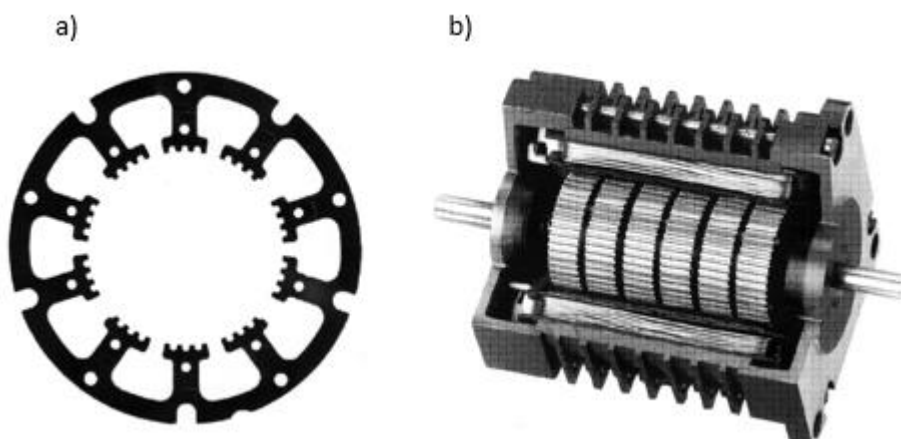


Obr. 3.93 Průběh momentů dvoufázového KM

### 3.3.4.2 Konstrukce pětifázových hybridních motorů

Pětifázové KM firmy Berger Lahr jsou podobně jako běžné dvoufázové KM konstruovány jako hybridní a pracují na principu shodného počtu pólů statoru a rotoru.

Pět vinutí statoru je rozděleno na 10 hlavních pólů, které jsou opatřeny nástavci s ozuby (vždy 3 drážky a 4 zuby), Obr. 3.94. Rotor pak obsahuje permanentní magnety zmagnetizované v axiálním směru mezi dvojicí ozubených kol s pólovými ozuby (vždy s 50 zuby).



Obr. 3.94 Princip konstrukčního řešení pětifázového KM (firma Schneider Electric Motion GmbH): a – příčný řez státorem (bez vinutí); b – řez krokovým motorem

Toto uspořádání dává po obvodu 50 bipólů ( $p_b = 50$ ) a při  $m = 5$  fázích dostaneme v režimu napájení pro plný krok  $\kappa = 1$  počet  $s_K = 2 \cdot m_f \cdot p_b \cdot \kappa = 500$  kroků na otáčku ( $0,72^\circ$  plný krok) a v režimu napájení pro půlkrok, kde  $\kappa = 2$  pak bude dvojnásobek, tj.  $s_K = 1\,000$  kroků na 1 otáčku rotoru ( $0,36^\circ$  půlkrok).

Proud tekoucí statorovým vinutím vytváří rotující magnetické pole, podobně jako u synchronního motoru. Pólpáry jsou individuálně buzeny a řízeny stejnosměrným proudem. Rotorem je permanentní magnet ve tvaru ozubeného kola. Jestliže je přiveden proud na statorové vinutí, vytváří se točivý moment, dokud nejsou póly rotorového ozubu a pólového nastavce statoru v opozici (vazba N-S). V této poloze je rotor magneticky fixován – je proveden právě 1 krok.

Nejmodernější konstrukce KM jsou motory s třífázovým vinutím a napájením řešeným pomocí sinusové komutace (Schneider Electric Motion GmbH), které dovolují pracovat jako dvoufázové (200, resp. 400 kroků/ot.), popř. pětifázové (500, resp. 1000 kroků/ot.) s plnou aplikací techniky mikrokrokování, kdy lze na výkonových jednotkách nastavit rozlišení v rozsahu 200 až 10.000 kroků na otáčku. Jsou dosahovány o 50% vyšší hodnoty momentů oproti pětifázovým KM stejné hmotnosti, snížena hlučnost a potlačeny rezonanční efekty.

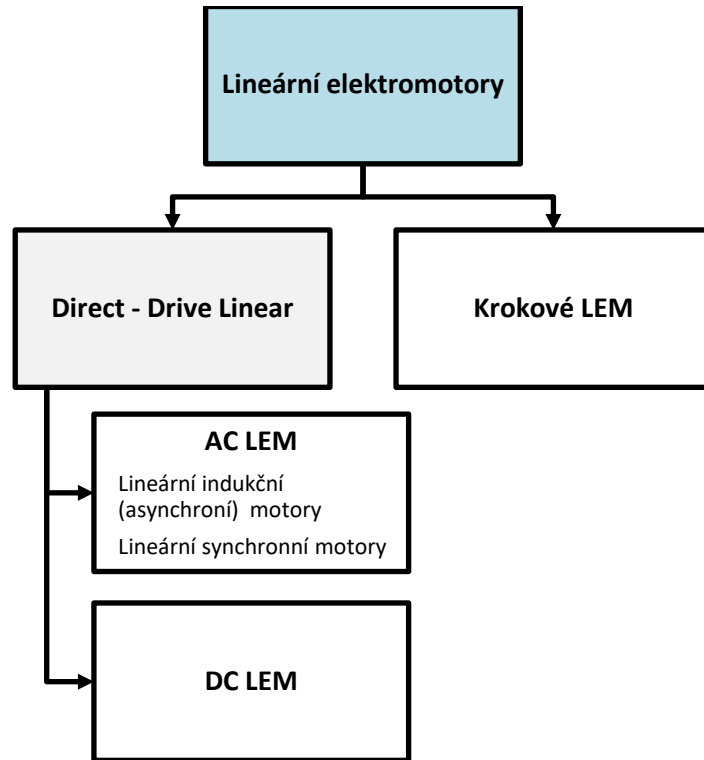
### 3.3.5 Lineární elektromotory v pohonech PR

Rozšiřování aplikací elektropohonů je provázeno snahou prosadit přesné elektropohony s translačním pohybem výstupního členu bez nutnosti transformace typu pohybu. Dosud nekonvenčním typem motorů jsou lineární elektromotory (LEM).

V současnosti je veden intenzivní výzkum [50, 51] zaměřený na rozvoj všech základních typů LEM (Obr. 3.95) se snahou:

- minimalizovat počet mechanických dílů v řetězci pohonu (translační pohybové jednotky bez transformačních bloků);
- dosáhnout vysokých rychlostí přímočarých pohybů (jsou běžně dosažitelné rychlosti 3 až 6  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a špičkově 8 až 10  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ );
- dosáhnout uspokojivé přesnosti polohování (při rychlostech 0,5 – 0,7  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  lze provádět polohovou regulaci s přesností lepší než 0,5 mm);
- dosáhnout vysokých přesností při mikropolohování (aplikací lineárních krokových motorů a Sawyerových planárních motorů).

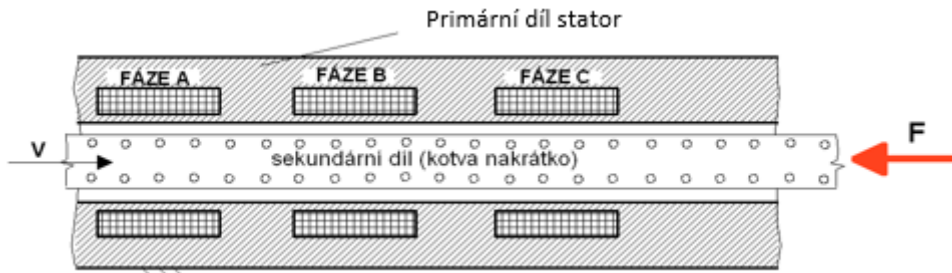
Motory označované Direct Drive Linear (DDL) se dělí na dvě kategorie, bezkartáčové synchronní motory a lineární indukční motory (LIM).



Obr. 3.95 Typy lineárních elektromotorů (LEM)

### 3.3.5.1 Lineární indukční elektromotory

Lineární indukční (asynchronní) elektromotory (LIM) jsou pohony založené na principu elektromagnetické indukce. Primární díl (Obr. 3.96) je tvořen třífázovým vinutím, kdy jednotlivé fáze jsou axiálně posunuty podél směru pohybu oproti sekundárnímu dílu, který je tvořen kotvou nakrátko. Pohybový člen (translátor) se pohybuje se skluzem v žádaném směru podle pořadí zapojování fází a vytváří hnací sílu.



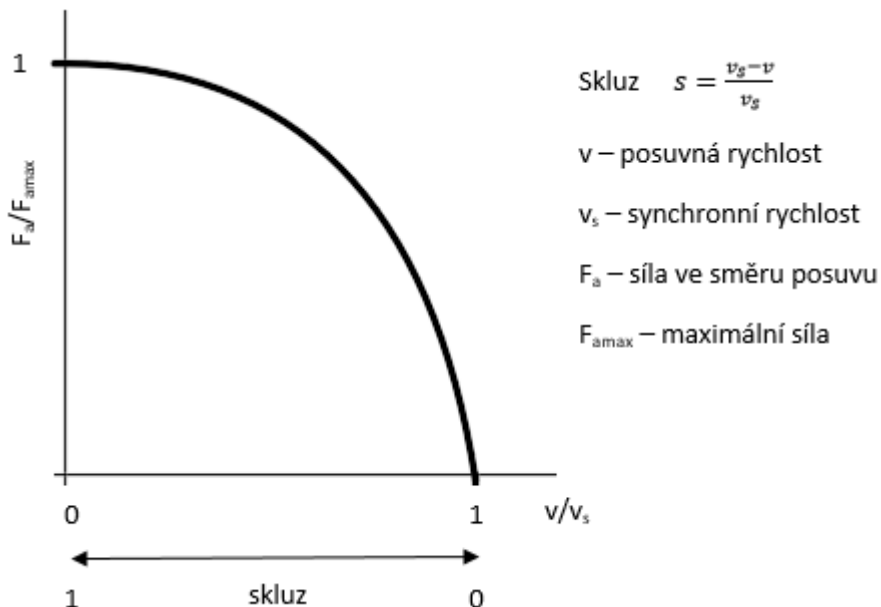
Obr. 3.96 Princip asynchronního LEM

Posuvná síla  $F_a$  se mění v závislosti na velikosti napájecího napětí:

$$\left(\frac{F_a}{F_n}\right) \approx \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 \quad (3.3)$$

kde  $F_n$  je síla odpovídající jmenovitému napětí  $U_n$ ,  
 $U$  – napětí odpovídající hnací síle  $F_a$ ,  
 $U_n$  – jmenovité napětí.

Silová charakteristika lineárního motoru (Obr. 3.97) ukazuje monotónní závislost velikosti hnací síly na skluzu.

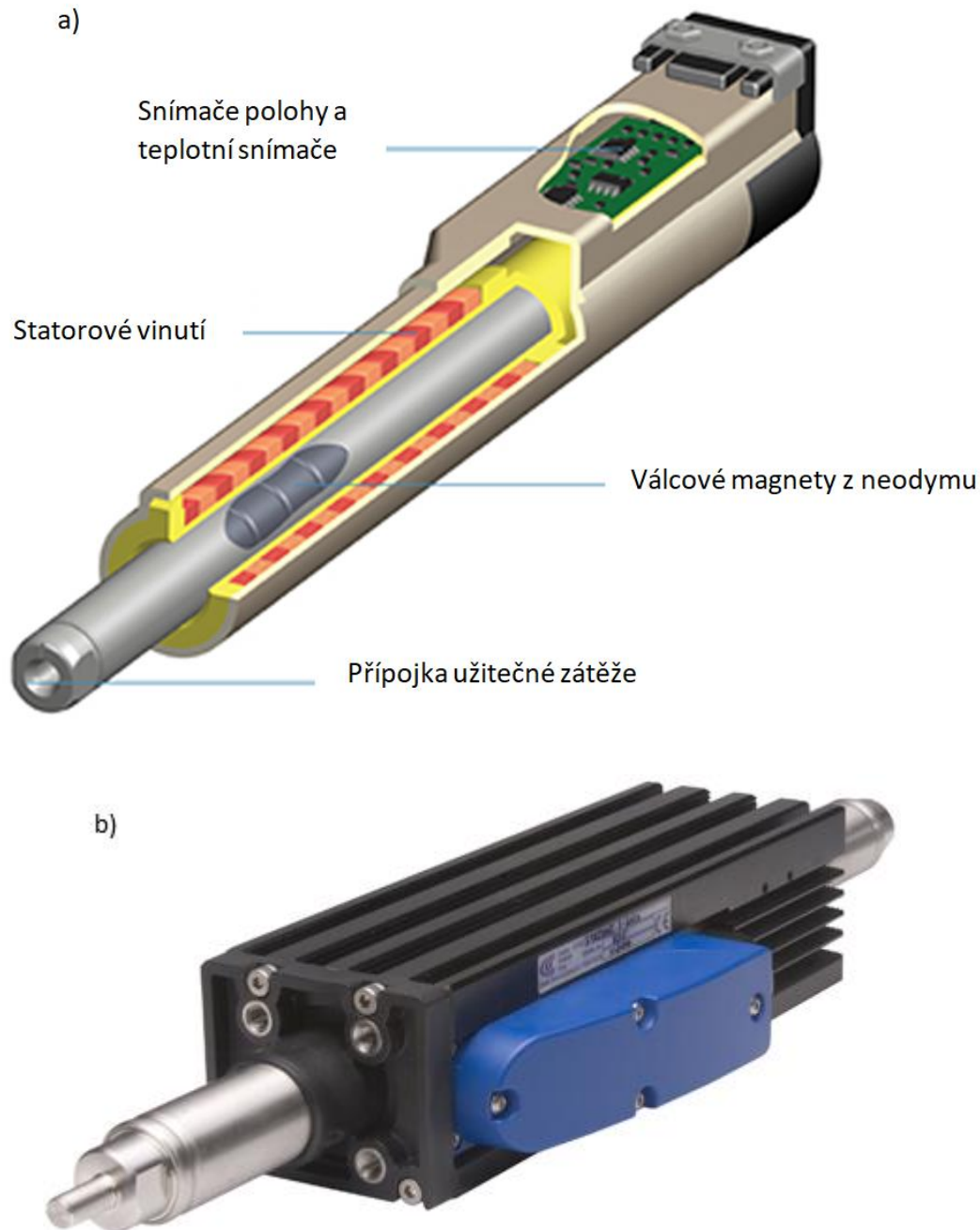


Obr. 3.97 Silová charakteristika asynchronního LEM

### 3.3.5.2 Bezkartáčové synchronní LEM

Bezkartáčové synchronní LEM jsou vyráběny buď v uzavřeném skříňovém provedení (Obr. 3.98) anebo pro těžší aplikace v otevřeném hřebenovém provedení (Obr. 3.99).

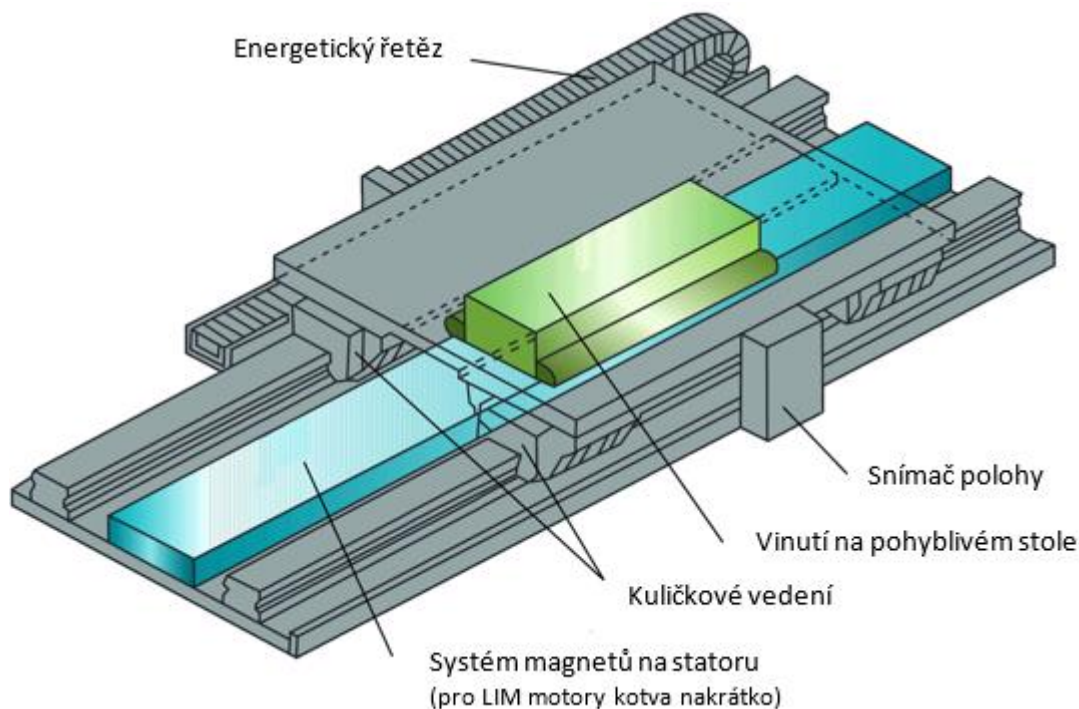
**Skříňové provedení** (Obr. 3.98) je kompaktní konstrukce s vysokým stupněm krytí (IP 67), vysokými hodnotami sil a přesností. Pohybová tyč nese sekundární díl (soustavu neodymových magnetů), prochází uzavřenou skříní a je uložena buď do valivého, popř. kluzného vedení. Stator (primární díl) má tvar trubky a nese třífázové vinutí. Tyto motory jsou určeny pro zdvihy 70 – 220 mm, přičemž dosažitelné zrychlení je až  $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Snímač polohy je montován zásadně na hnací stranu tyče, aby se zabránilo chybám odměřování v souvislosti s teplotní dilatací. Jednotlivé verze jsou přitom vybaveny buď konvekčním anebo nuceným kapalinovým chlazením. Rozsah užití je široký pro NC řízené vratné pohyby se značnými zátěžnými silami a vysokými nároky na pohybovou dynamiku. Jsou k dispozici motory s klidovými silami v rozmezí od 170 do 2 900 N s hmotnostmi od 3,6 do 98 kg.



Obr. 3.98 Bezkartáčový synchronní motor ve skříňovém provedení: a – funkční schéma bezkartáčového synchronního motoru, b – příklad provedení

**Otevřená hřebenová provedení** Obr. 3.99 jsou vhodným pohonem pro vodorovná pojezdová ústrojí manipulátorů a PR. Systém magnetů, resp. pro lineární indukční motory kotva nakrátko, je zde součástí statoru a primární díl (vinutí) je spojen s pohyblivým stolem, který je uložen valivě v rozděleném vedení pomocí valivých pouzder na profilových tyčích. Opět je možné buď přirozené ventilační chlazení anebo tekutinové chlazení s nuceným oběhem. Jsou zde dosažitelné rychlosti do  $3 \text{ m.s}^{-1}$  se zrychlením do  $100 \text{ m.s}^{-2}$  pro zátěžné síly od 170 do 3 000 N. Relativně vysoká hmotnost pohybových jednotek s pohonem podle Obr. 3.99 je omezujícím faktorem pro aplikaci těchto pohonů

uvnitř kinematických řetězců manipulátorů a PR. Nejčastěji se motory DDL v tomto konstrukčním uspořádání úspěšně aplikují pro realizaci 7 osy robotu jako pojezd.



Obr. 3.99 LEM v otevřeném provedení

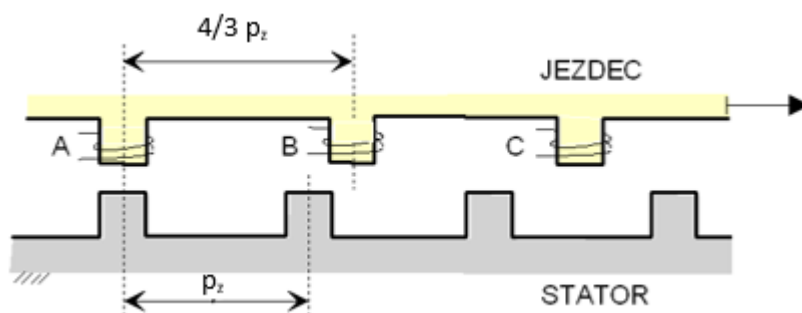
Postupně se v současné době prosazují více bezkartáčové synchronní motory, protože dosahují až 3x větší hustoty síly (poměr síly oproti objemu vinutí), mají rychlejší reakci a méně tepla je přenášeno do konstrukce motoru.

### 3.3.5.3 Krokové lineární elektromotory

Krokové LEM vycházejí svým principem z reakčních krokových motorů rozvinutých do roviny. Základem je dvojice magnetů s opačnou polaritou a polohová změna nastává minimalizací magnetického odporu, kdy jsou magnety v opozici.

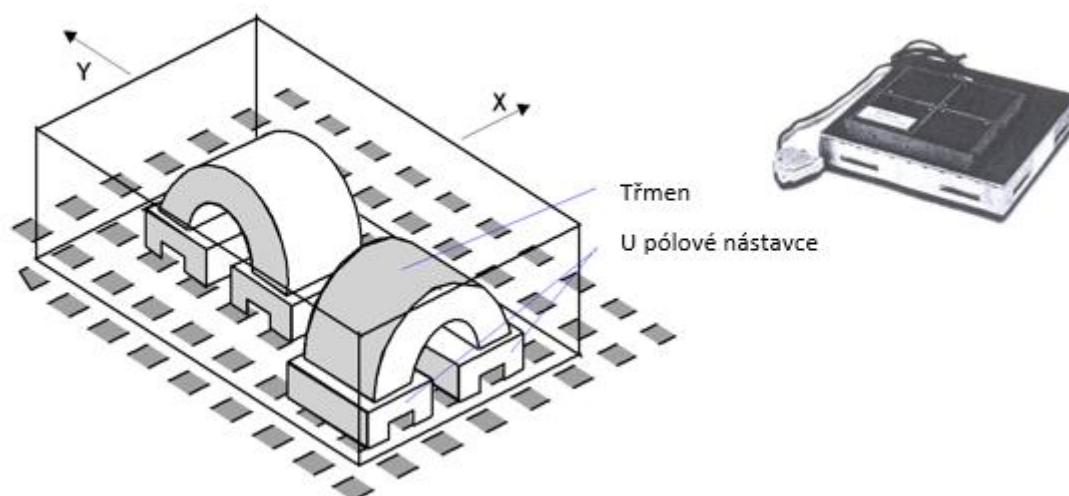
Stator je ve tvaru "zubového" hřebene a na pólových nastavcích statoru je vícefázové vinutí (Obr. 3.100). Ve schématu je zde pro příklad uvedeno třífázové vinutí statoru (A, B, C). Na statoru jsou zubové rozteče  $p_z$  a na jezdcí rozteče  $4/3 p_z$ , resp. obecně rozteče  $p_z \cdot (1 + 1/m_f)$ , kde  $m_f$  je počet napájecích fází.





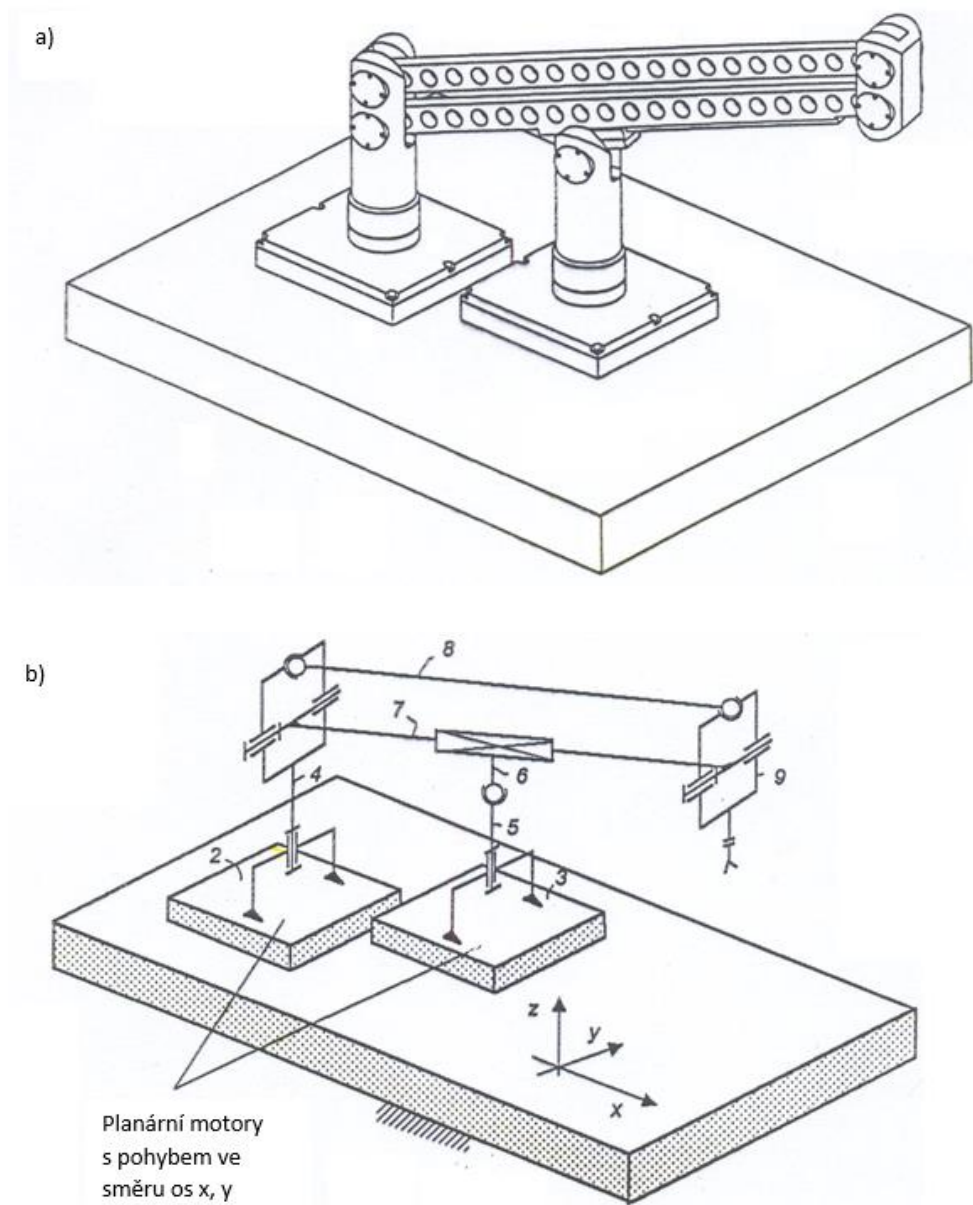
Obr. 3.100 Princip lineárního krokového motoru

S růstem počtu fází roste pak počet kroků  $p_z/m_f$  na rozteč jezdce. Typické hodnoty špičkových vyráběných motorů jsou rozteče  $p_z = 0,5$  mm a při počtu napájecích fází  $m_f = 4$  je velikost kroku  $p_z/m_f = 0,125$  mm/impulz. Problémem lineárních krokových motorů je poměrně nízká pracovní frekvence (do 1 kHz) a tím malé rychlosti pohybu (řádově  $100 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Tyto hodnoty lze dále výrazně zlepšovat a např. pro krok  $1 \mu\text{m}/\text{impulz}$  je nutné zajistit  $m_f = 500$  diskretních fází. Rychlý lineární KM s označením LINSTEP3 dodává firma Berger Lahr, jezdec dosahuje rychlosti až  $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , avšak má přesnost jen  $\pm 2$  mm.



Obr. 3.101 Princip planárního krokového motoru

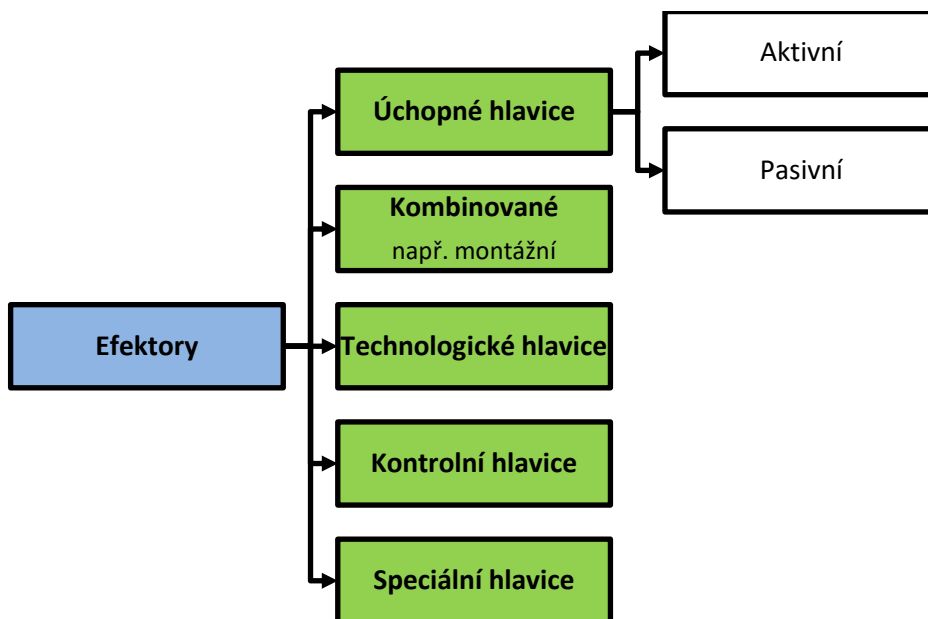
Tento princip rozvinul Bruce Sawyer (firma XYNETIC, Co. – USA) do planárních motorů s pohybem ve dvou na sebe kolmých osách (Obr. 3.101). Tento pohon se jeví jako perspektivní pohon montážních mikrorobotů (Obr. 3.102). Motor aplikuje dvoufázové napájení obou pohybových os. Vinutí na jednotlivých U pólových nástavcích je vždy souhlasné a vinutí dvojice nástavců na jednom třmenu je však opačného smyslu. Tím je dosahováno příznivého efektu pro řízení pohybu. Jezdec se pohybuje nad statorem na vzduchovém polštáři s výškou cca 1,5 mm při tlaku vzduchu 3,5 baru. Přerušením proudu vzduchu dojde k zabrzdění motoru přitažením jezdce magnetickými silami.



Obr. 3.102 Průmyslový robot s planárními motory: a – konstrukční provedení (firma 3D Automation); b – kinematické schéma robotu se 4° volnosti

## 4 Efekторы a periferní zařízení robotů

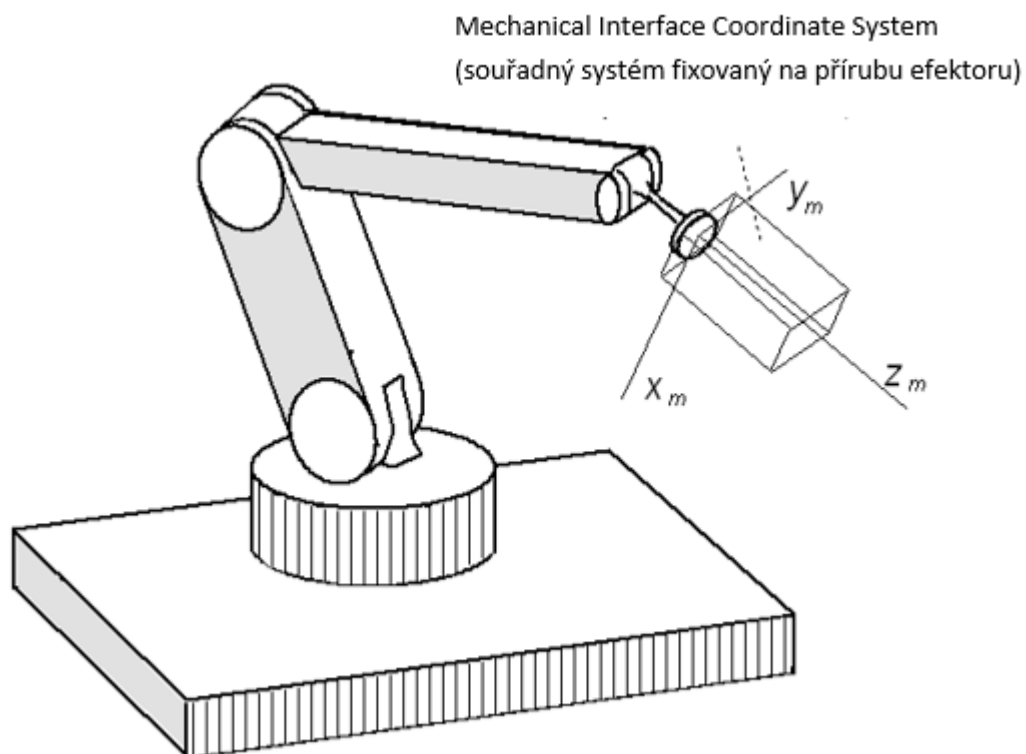
Efekторы jsou koncové členy průmyslového robotu (PR), resp. manipulátoru, které slouží ke komunikaci PR a manipulátorů s okolím [52]. Jsou výkonnými orgány, které svými vlastnostmi a konstrukcí odpovídají způsobu nasazení. Efekторы lze pak rozdělit do základních skupin v souladu s Obr. 4.1. Požadovaným činnostem PR a manipulátorů musí být také přizpůsobena periferní zařízení, která předcházejí, spolupracují a následují za PR nebo manipulátorem. V tomto textu je kladen důraz na vysvětlení efektorů, ale periferní zařízení jsou zmiňována v daném kontextu činnosti PR nebo manipulátoru.



Obr. 4.1 Rozdělení efektorů podle aplikačního nasazení

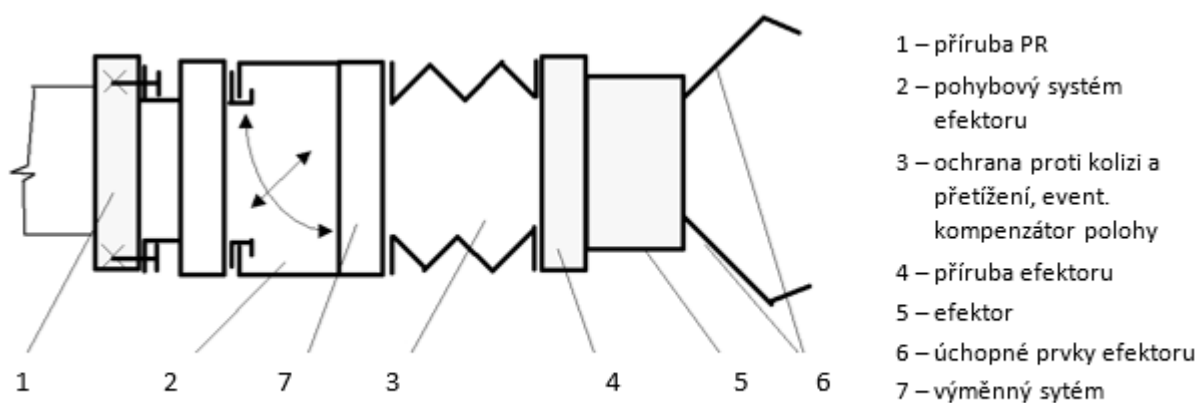
Podrobnější rozdělení hlavic s příklady je popsáno v dalších kapitolách s tím, že nejčastějšími úlohami PR a manipulátorů v průmyslové praxi jsou úlohy manipulační, tedy objekt manipulace je potřeba nejdříve uchopit. Úchopné hlavice jsou tedy nejčastějšími mezi efekторы a bude jim věnována větší pozornost.

Za normálních okolností je rozhraní pro připojení efektoru tvořeno přírubou robotu, přičemž efektor zajišťuje tuhé fixování, tj. nepohyblivost uchopeného objektu, popř. nástroje vůči lokálnímu souřadnému systému, který má podle Obr. 4.2 počátek v ose příruby robotu.



Obr. 4.2 Lokální souřadný systém efektoru

V souladu s požadavky dané aplikace může být efektor vybaven dalšími moduly (Obr. 4.3), které plní v systému efektoru speciální funkce. Těmito moduly může být pohybový systém efektoru (např. zajišťující rotaci nástroje, natáčení, otočné moduly s vratným pohybem apod.), zařízení pro ochranu proti kolizi a přetížení, kompenzátory polohy, moduly systému výměny efektorů.



Nejčastější alternativa: Pozice 4, 5 (ostatní ve speciálních aplikacích)

Obr. 4.3 Blokové schéma modulární koncepce efektoru

Skutečné vybavení přidavnými moduly je podřízeno požadavkům dané aplikace (Tab. 4.1), přičemž nejširší stupeň rozšířeného vybavení vyžadují zejména montážní aplikace.

Tab. 4.1 Modulární skladba efektorů ve vztahu k aplikačnímu nasazení

Modul Aplikace	Úchopná resp. technolog. hlavice	Rotační jednotka	Otočný (kývavý) modul	Výměnný systém	Kompenzátor polohy a orientace	Kolizní modul	Silový senzor (dynamometr)
Jednoduché uchopování a manipulace	●						
Jednoduchá obsluha strojů	●						
Běžné technologické nasazení	●						
Bodové sváření	●			●			
Kombinované nasazení	●			●			
Obsluha obráběcích strojů	●					●	
Uchopování s rozšířenou pohyblivostí	●	●	●				
Komplikovaná manipulace	●			●		●	
Montážní operace	●					●	●
Flexibilní montáž	●	●	●	●	●	●	●
Zdvojené chapadlo	●		●				

Konstrukci, popř. výběru efektorů od renomovaných výrobců je nutné věnovat značnou pozornost, protože tyto výstupní hlavice bezprostředně ovlivňují možnosti využití manipulátorů nebo robotů. Základní požadavky je možné shrnout do následujících bodů:

- 1) *Minimální hmotnost* – spolu s hmotností objektu nebo nástroje podmiňují požadovanou nosnost robotu nebo manipulátoru danou výrobcem a bezprostředně ovlivňují jejich využití, popř. životnost.
- 2) *Rozměry a prostorové uspořádání* – ovlivňují manipulační možnosti robotu zejména ve stísněných podmínkách a mají vliv také na silové zatěžení výstupního členu robotu.
- 3) *Provozní bezpečnost* – musí být zajištěna nejen v běžných provozních režimech, ale i v nouzových a havarijních situacích a vždy musí být řešena s ohledem na vyloučení poškození zařízení uvnitř a bezpečnost osob v okolí robotizovaného technologického pracoviště.
- 4) *Provozní spolehlivost* – bezprostředně ovlivňuje celkovou spolehlivost automatizovaného pracoviště.

#### 4.1 Technologické hlavice

Technologické hlavice (technologické koncové efekторы) jsou výkonným orgánem PR v případě, že je určen k provádění technologické operace. Technologické hlavice se uplatňují především v kombinaci s multiúhlovými typy průmyslových robotů, a to jak v celé řadě strojírenských, ale i nestrojirenských aplikací [35, 53, 54]. Technologické hlavice jsou tvořeny přímo nástrojem, který vykonává danou technologickou operaci. Technologické hlavice je možné rozdělit podle druhu operace, kterou vykonávají:

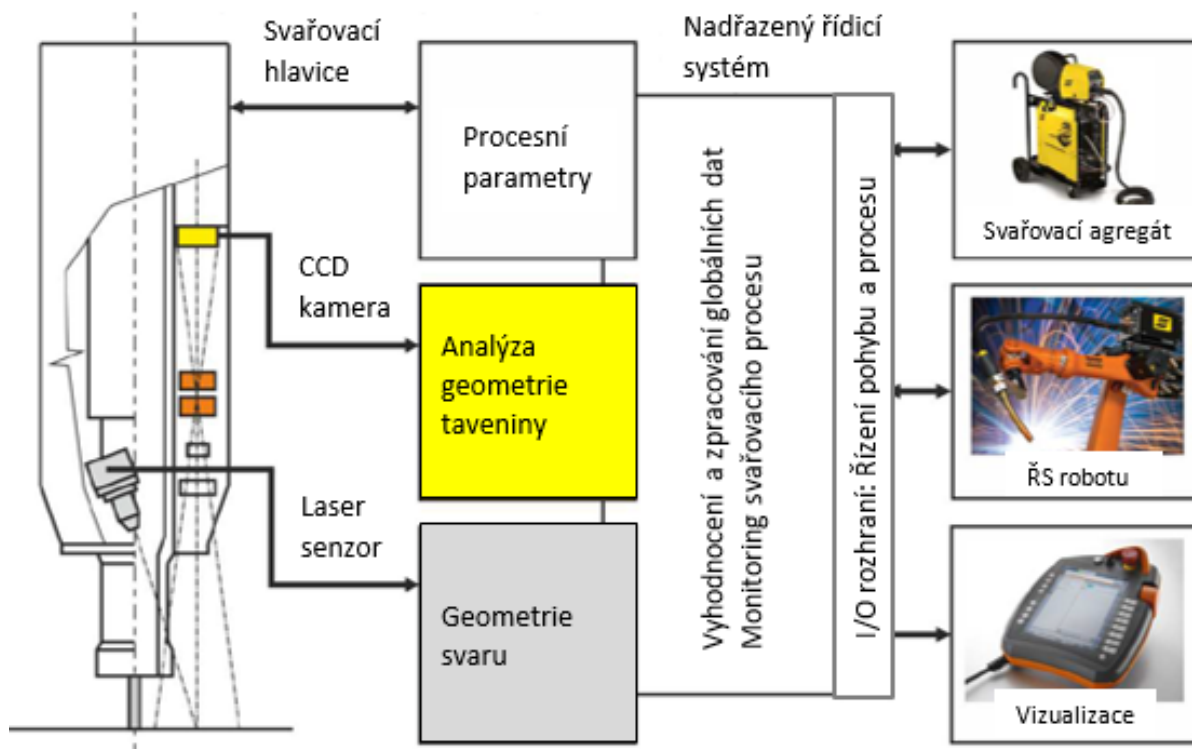
- **Dělení materiálu**, používají se hlavice s mechanickým dělením, laserovým paprskem, plazmovým paprskem, vodním paprskem atd.
- **Obrábění materiálu**, mohou se použít k frézování, vrtání, soustružení atd., kap. 4.1.3. Do této oblasti lze zahrnout také hlavice pro broušení, odjehlování, leštění atd.
- **Spojování**, lze spojovat materiály pomocí svařování, pájení, lepení atd. Nejčastěji se používá ke spojování materiálu tavné elektrické svařování (obloukové svařování a odporové bodové svařování), kap. 4.1.1.
- **Nanášení ochranných látek a nátěrových hmot**. Nejčastěji se používají k lakování, kap. 4.1.2, ale také k tmelení.
- **Speciální aplikace**, především v chemickém průmyslu, biologii a lékařství.

Kromě samotných technologických hlavic je robotizace technologických procesů spojena s řadou periferních zařízení, jako jsou výkonové agregáty, podavače drátu, energetické řetězce pro vedení a přívod energií, procesních médií a dat, balancéry pro kompenzaci polohy energetických řetězců, polohovací přípravky atd., které se bezprostředně podílejí na výsledném charakteru a provedení dané technologické operace. Důležitým prvkem pak jsou také typy a úroveň použitých senzorů, včetně řídicího systému, softwarového vybavení a realizace zpětných vazeb, které mohou být jak na interní tak externí úrovni a s výhodou lze kombinovat. Je zřejmé, že automatizace technologických procesů představuje mnohdy poměrně komplikovanou úlohu, jejímž výsledkem je zcela konkrétní a specifické řešení. Příkladem mohou být např. robotizovaná svařovací pracoviště, pro která jsou dílčí nároky a konkrétní řešení uvedeny v následující kapitole.

##### 4.1.1 Svařovací technologické hlavice

Jednou z prvních oblastí PR bylo jejich využití ve spojování materiálů v procesech obloukového nebo bodového svařování s cílem zefektivnit výrobu a zvýšit kvalitu velkosériově vyráběných dílů. Pro dosažení jakostního svarového spoje je nutné zajistit samočinné vedení svařovací technologické hlavice během svařování. Základní podmínkou je zajištění odměřování polohy hlavice během svařovacího cyklu, tj. řídicí systém provádí korekci původně naprogramované dráhy v průběhu pohybu hlavice při vlastním svařovacím cyklu. Korekce se následně využívá během realizace koutových svarů a v některých případech i u tupých svarů. Řídicí systém tedy vyhodnocuje údaje z měření a provádí korekci tzv. rovnovážného svaru – osy svaru. Kromě korekce dráhy je modifikována např. délka oblouku nebo upravován výkon na svařovacím agregátu apod. Pro účely korekce dráhy je možné využít škálu senzorů, které pracují na různém fyzikálním principu a jedná se např. o multisouřadnicové dotykové senzory, elektrodové kontaktní senzory, indukční senzory, kapacitní, ultrazvukové, optické, laserové atd. Novinkou ve sledování svarů jsou termosenzory, které mohou

být spojeny s laserovými senzory, to umožňuje vyhodnocovat jak aktuální polohu, tak i teplotní pole (stav) svaru. Moderní systémy pro vedení svařovacích hlavic využívají snímačů umístěných přímo v místě hoření oblouku a jedná se o kompaktní blok integrující dva laserové senzory, které emitují paprsky poblíž čela hlavice (Obr. 4.4). Obraz formovaný pomocí svazku paprsků na svaru následně snímá obrazový senzor (často CCD kamera) přes optický filtr pohlcující jas svařovacího oblouku. Na základě obrazové analýzy lze korigovat dráhu hlavice, svařovací parametry a rychlost podávání svařovacího drátu.

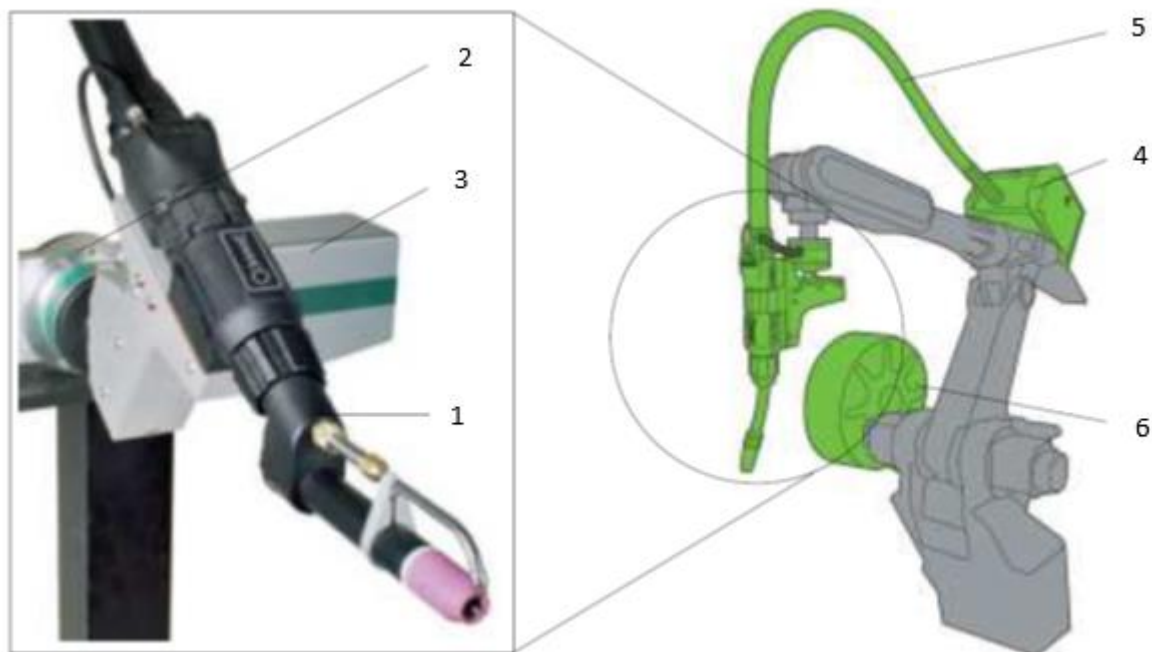


Obr. 4.4 Naváděcí systém svařovací hlavice

Obecně je během svařovacího procesu elektrickým obloukem nutné zajistit automatickou regulaci nastavené optimální délky oblouku. U svařovacích agregátů s přídavným svařovacím materiálem je svařovací drát do oblouku podáván konstantní rychlostí, která je dána otáčkami podávacích kladek a délka oblouku se pak reguluje změnou odtavovací rychlosti drátu závislé na intenzitě svařovacího proudu. Svařovací zařízení, u kterých je možné plynule regulovat rychlost podávání drátu je délka oblouku korigována změnou otáček podávacích kladek. V tomto případě má svařovací zdroj strmou zatěžovací charakteristiku, aby se kolísání napětí na oblouku výrazně nepromítalo do změn svařovacího proudu. Pro zvýšení efektivity a jakosti svaru je nastavována také hodnota předfuku a dofuku ochranného plynu, proudu a napětí na oblouku, čímž je možné minimalizovat svařovací krátery při ukončovacích operacích apod.

V současné době existuje na trhu řada výrobců svařovací techniky, z nichž nejvýznamnější jsou např. společnosti DINSE, LORCH, FRONIUS, ESAB, které disponují širokým spektrem výrobků (svařovací hlavice – hořáky, bodovací kleště, kolizní moduly, systémy automatické výměny hlavic, svařovací agregáty, podavače drátu, energetické řetězce, senzory) pro robotické svařování. Typický

profil svařovacího systému bez svařovacího agregátu se zvýrazněním základních komponent je na Obr. 4.5.

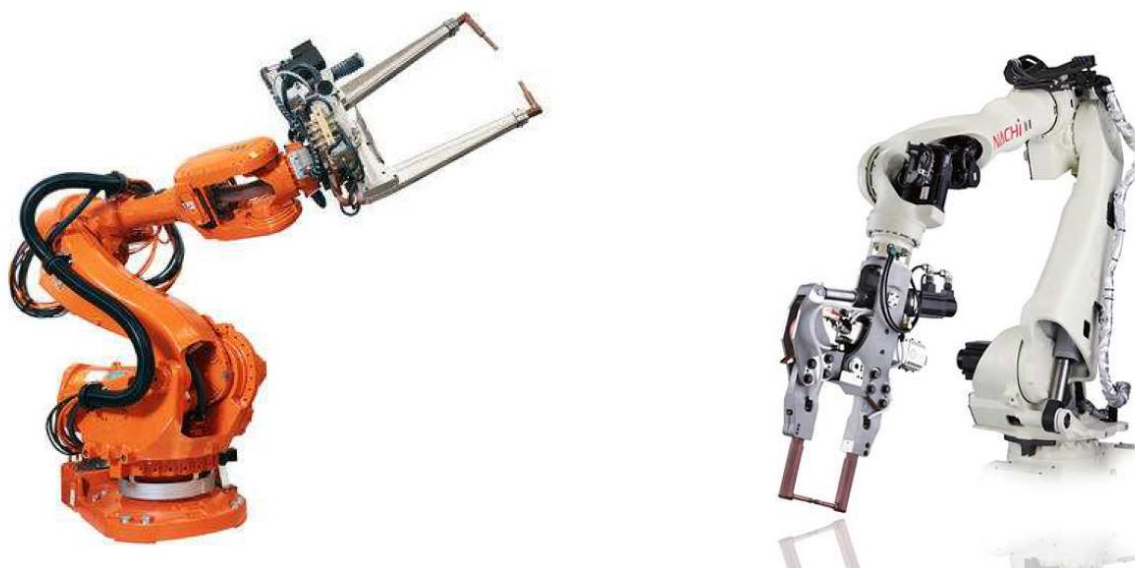


Obr. 4.5 Průmyslový robot se základními svařovacími komponenty (firma DINSE)

Jedná se především o svařovací technologickou hlavici – hořák (1) v kombinaci s bezpečnostním proti-kolizním systémem (2) a dokovací stanicí (3). Na robotu, ale i mimo něj, je možné umístit zásobník přídatného materiálu (6) a podavač drátu (4). Energetický řetězec (5) vede svařovací drát, energii, data a také systém chlazení (vodou nebo vzduchem) od svařovacího agregátu až po svařovací hlavici (1).

Dalším plně automatizovaným svařovacím procesem je aplikace odporového svařování, které se využívá v širokém spektru průmyslových odvětví, zejména pak v automobilovém průmyslu. Zdrojem potřebného tepla není hořící oblouk jako u obloukového svařování, ale přechodový odpor v místě styku dvou materiálů. Úroveň tepla závisí na celkovém odporu soustavy, intenzitě svařovacího proudu (až 104 A při nízkém napětí 10 až 15 V) a době průchodu. Hlavními částmi technologické hlavice na Obr. 4.6 (bodovací kleště) jsou tedy dvě elektrody, které většinou tvoří i upínací čelisti a spolu se svařovaným materiálem charakterizují celkový odbor svařovací sestavy. Přítlak čelistí pro odporové sváření je řízen buď pomocí řízeného pneumatického válce nebo lineárního elektrického servopohonu u složitějších bodovacích kleští.



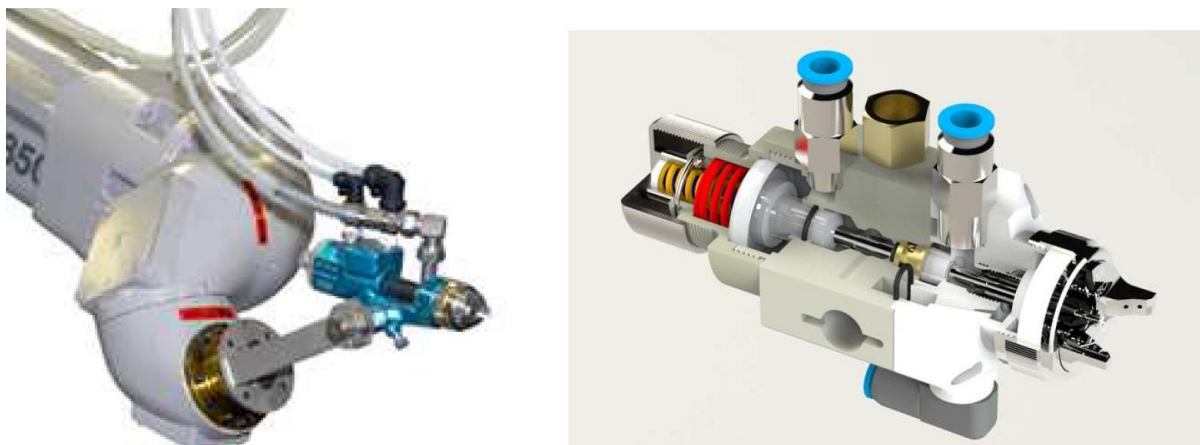


Obr. 4.6 Bodovací kleště

#### 4.1.2 Stříkáci (lakovací) technologické hlavice

Automatické lakovací procesy v kombinaci s průmyslovými roboty zatím nejsou rozšířeny v takové míře jako svařovací aplikace. Jejich největší zastoupení je tradičně v automobilovém průmyslu s tím, že se zatím příliš nedaří je přenést do běžných výrob v jiných oblastech. Vzhledem k rozvoji nových technologií a v souvislosti s rostoucím tlakem na kvalitu a efektivitu procesu, např. razantním snížením spotřeby barev a zmetkovitosti, lze předpokládat prudký nárůst robotického lakování v kombinaci s vyspělými lakovacími technologickými hlavicemi. Je nutné si uvědomit, že na rozdíl od klasických robotů musí lakovací robot disponovat schopností práce ve výbušném prostředí a řídicí systém musí obsahovat funkce pro řízení lakovacího procesu v reálném čase, tj. bez mechanických zpoždění, která se generují na regulátorech, měničích barvy atd., což umožní zkracování časových cyklů, úsporu barev a zlepšení kvality laku.

Hmotnost lakovacích hlavice se pohybuje v závislosti na velikosti lakovaných dílů od řádově jednotek kilogramů až po desítky pro lakování nadstandardně velkých dílů. Většina lakovacích robotů pak tvoří společně s řízením a technologickou hlavicí jeden celek, který umožňuje dosáhnout vysoké kvality finálního povrchu. Standardně jsou k dispozici stříkácí pistole s držákem a snímačem otevření jehly (Obr. 4.7), pistole pro nanášení prášků elektrostatickou metodou s velkým výkonem a speciální miniaturní rotační atomizéry pro lakování bez použití elektrostatiky s průtoky barvy od 100 do 400  $\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  (Obr. 4.8), které jsou vhodné pro barvy na vodní i organické bázi. Dosahují velmi malou stopu paprsku, která zajišťuje úsporu barev během lakování úzkých vzorů.



Obr. 4.7 Stříkací pistole



Obr. 4.8 Rotační atomizér s různými typy trysek

#### 4.1.3 Technologické hlavice pro obrábění materiálu

U robotického obrábění existují dva základní přístupy. V prvním případě robot nese nástroj, kterým obrábí díl napoložovaný na periferním zařízení. Ve druhém případě je nástroj pevně upevněný na periférii a robot pohybuje obrobkem. V tomto druhém případě se jedná o uchopení objektu vhodnou úchopnou hlavici, kap. 4.5.

V obou případech je možné se setkat s obráběním ve spojení s klasickými nástroji, jako je vřeteno s frézou nebo brusným/leštícím kotoučem. Obrábění pomocí robotů je dnes stále více spojováno s moderními technologiemi obrábění, jako je dělení laserem nebo vodním paprskem. Ve všech případech je třeba zvážit přesnost výsledného polohování robotu, které ve většině případů bude horší než u CNC obráběcích strojů. Většina průmyslových robotů má také horší parametry tuhosti než specializovaná obráběcí centra. Při nasazení angulárního robotu pro obrábění je tak

nutno provést optimalizaci z hlediska zatížení robotu, která vede k jemnějšímu a tedy časově delšímu obrábění.

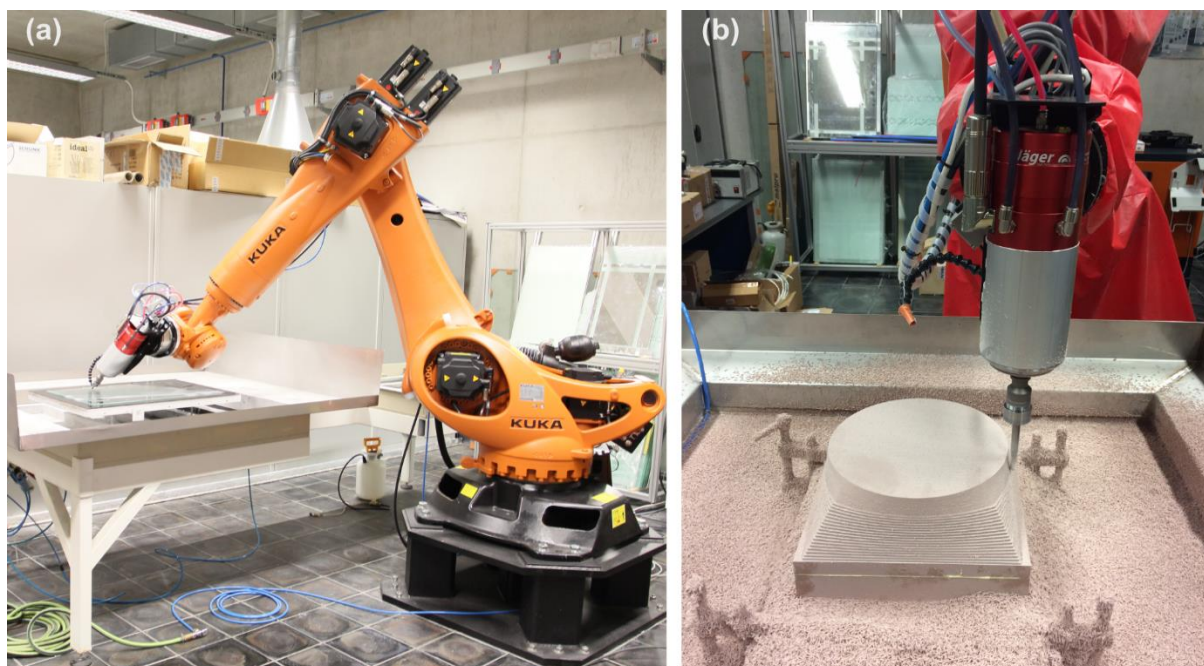
Robot tak nemůže být přímou náhradou obráběcích center, kterým nemůže konkurovat z hlediska dosažitelné přesnosti a tuhosti, ale může je doplnit nebo nahradit tam, kde víceosá CNC obráběcí centra nejsou vhodným či ekonomickým řešením, například při obrábění rozměrných dílů. K vhodným aplikacím patří například obrábění křídel letounů, vyřezávání okenních a dveřních otvorů v hliníkových skříních kolejových vozidel, přebroušování svarů, vrtání otvorů aj. Robot je vhodný jak pro sériovou, tak i kusovou výrobu [55].

Podle průzkumu na internetu a odborných článcích se roboty nejčastěji využívají v těchto obráběcích procesech [56]:

- frézování,
- vrtání,
- závitování,
- gravírování,
- broušení,
- odjehlování,
- leštění,
- tryskání.

Roboty pro obrábění lze využít pro obrábění kovových materiálů od slitin hliníku nebo mědi až po různé druhy ocelí, pro obrábění plastů, kompozitních materiálů, skla, nerostů či dřeva.

V rámci výzkumu [57] a bakalářské práce [58] bylo realizováno obrábění skla respektive umělého dřeva, Obr. 4.9. V obou případech bylo využito vysokootáčkové vřeteno Jäger Chopper 2300-40 HSK S5 s ruční výměnou nástrojů a pneumatickým upnutím. Vřeteno je vhodné pro vysokorychlostní frézování, broušení, vrtání a rytí (gravírování) různých materiálů [59] a bylo testováno na robotu KUKA KR90 R2700.

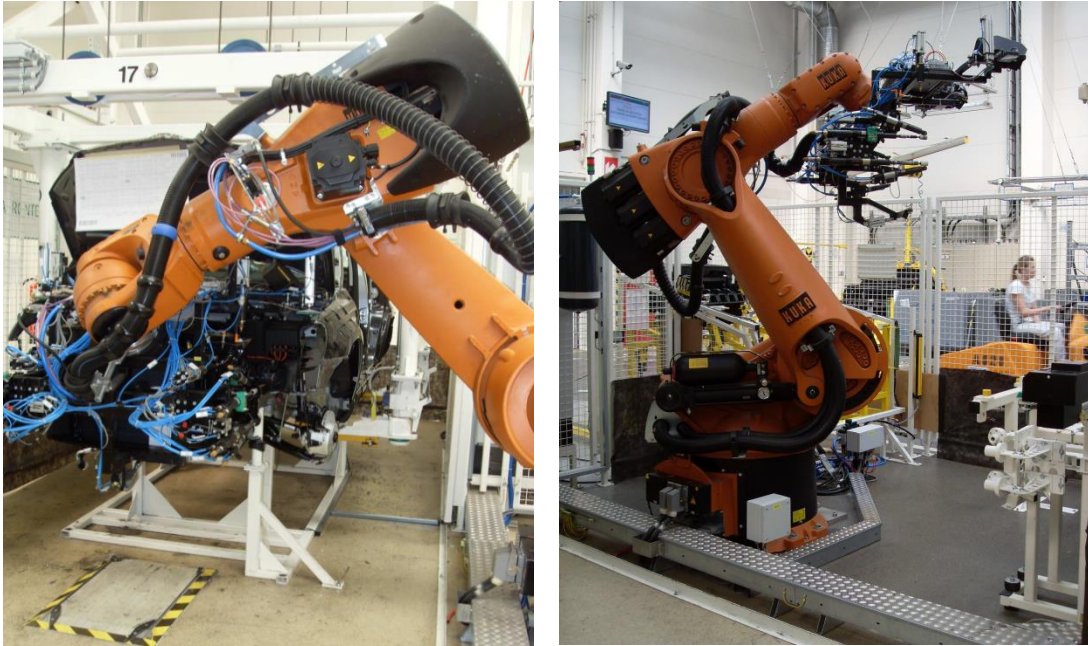


Obr. 4.9 Obrábění robotem KUKA KR90 R2700 s vysokootáčkovým vřetenem Jäger Chopper 2300-40 HSK S5: a – broušení skla [57]; b – frézování umělého dřeva [58]

## 4.2 Kombinované hlavice

Kombinované hlavice plní základní funkci úchopné hlavice ve smyslu uchopení, avšak mohou být doplněny přídatným technologickým zařízením, které působí na objekt ve smyslu prováděné technologické operace. Příkladem mohou být hlavice aplikované u plastikářských lisů, kde základem je podtlaková úchopná hlavice, která vyjímá výlisek z formy a provádí manipulaci a je doplněna frézovací jednotkou, jež zajišťuje technologickou operaci odstranění vtoku. Širokou škálu kombinovaných technologických hlavic představují montážní hlavice, které často zahrnují jednak úchopnou hlavici, jednak nástroj (např. šroubovací jednotku) k realizaci montážní operace. Příklad je uveden na Obr. 4.10.

Další možností kombinované hlavice je spojení obráběcí a kontrolní hlavice. Příklad na Obr. 4.11 ukazuje propojení značkovací (gravírovací) hlavice s kamerovým systémem rozeznávání textu a kódu.



Obr. 4.10 Montážní hlavice tzv. frontendů ve ŠKODA Auto Kvasiny



Obr. 4.11 Kombinovaná hlavice pro značení a čtení textu/kódů pomocí integrované kamery, zdroj: <https://www.pryormarking.com/products/robotic-marking-cell>

### 4.3 Kontrolní hlavice

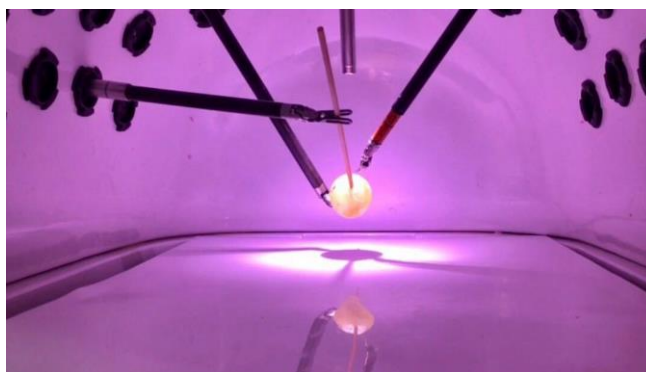
Zvláštní skupinu tvoří kontrolní hlavice, které jsou vybaveny senzoričkou k identifikaci jakostních parametrů výrobků, resp. měřícím zařízením. Velmi často je používáno 2D a 3D kamer a 3D scannerů. Jak již bylo ukázáno v předchozí kapitole, jsou kamery často kombinovány s obráběcími anebo manipulačními hlavice. Na Obr. 4.12 je uveden příklad automatické měřicí stanice vybavené 3D skenovacím vibrometrem RoboVib® Structural Test Station.



Obr. 4.12 Automatická měřicí stanice vybavená 3D skenovacím vibrometrem RoboVib® Structural Test Station, zdroj: <https://www.polytec.com/us/vibrometry/products/full-field-vibrometers/robovib/>

#### 4.4 Speciální hlavice

Speciální hlavice jsou takové, které svým účelem nelze zařadit do výše uvedených skupin. Sem se řadí např. hlavice pro aplikace v lékařství, Obr. 4.13 (chirurgické nástroje, kamery, manipulační členy atd.).



Obr. 4.13 Robot chirurg Da Vinci a koncové efekty pro manipulaci, dělení tkání a snímání obrazu, zdroj: <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/systems>

#### 4.5 Úchopné hlavice

Úchopné hlavice (chapadla) slouží k uchopení (tuhému fixování) objektů před následnou manipulací prostřednictvím pohybového systému PR nebo manipulátoru. Při držení objektu v úchopné hlavici jsou v rovnováze vnější síly působící na objekt (hmotové, tj. setrvačné síly a síla tíže, případně technologické síly a síly, jimiž je objekt držěn – úchopné síly). Uchopení objektu je spojeno s

mechanickým kontaktem tzv. úchopných prvků s povrchem objektu. Při uchopení dojde k znehybnění objektu oproti chapadlu.

Rozdělení úchopných hlavic lze provádět z různých hledisek, která mohou posloužit k objasnění principů uchopení a držení objektu:

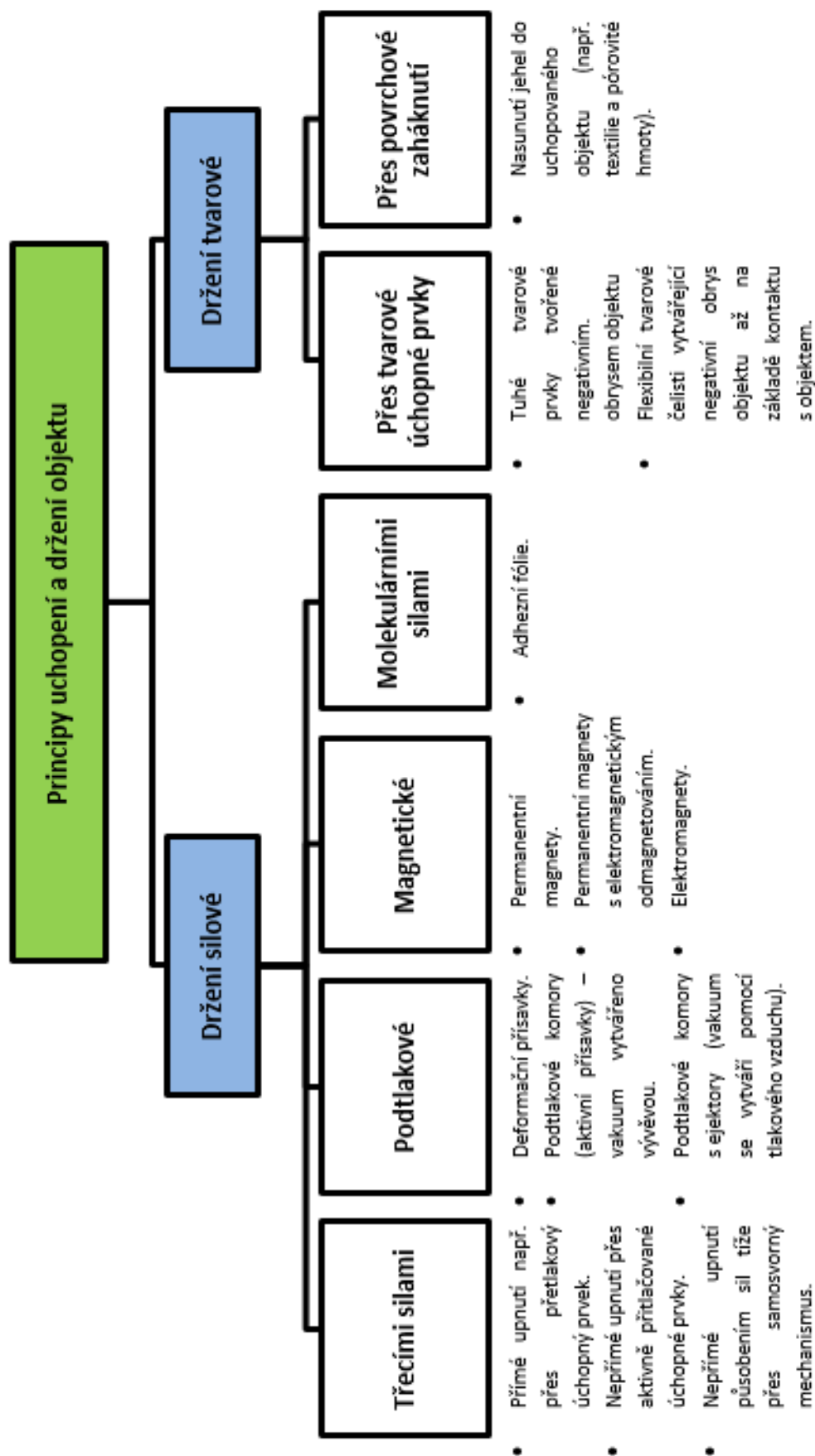
A. Podle způsobu vyvozování úchopné síly

- a) *Pasivní* způsob vyvozování úchopné síly je vázán na úchopné prvky, které dovolují uchopení, avšak úchopnou sílu nelze ovládat přímo řídicím systémem (bez ovládacího vstupu).
- b) *Aktivní* způsob vyvozování úchopné síly je takový, kdy funkce úchopného prvku je ovládána přímo řízeným vstupem (prostřednictvím řídicího systému je ovládán akční člen – pohon a od něho přímo nebo zprostředkovaně úchopný prvek);

B. Podle struktury uchopení

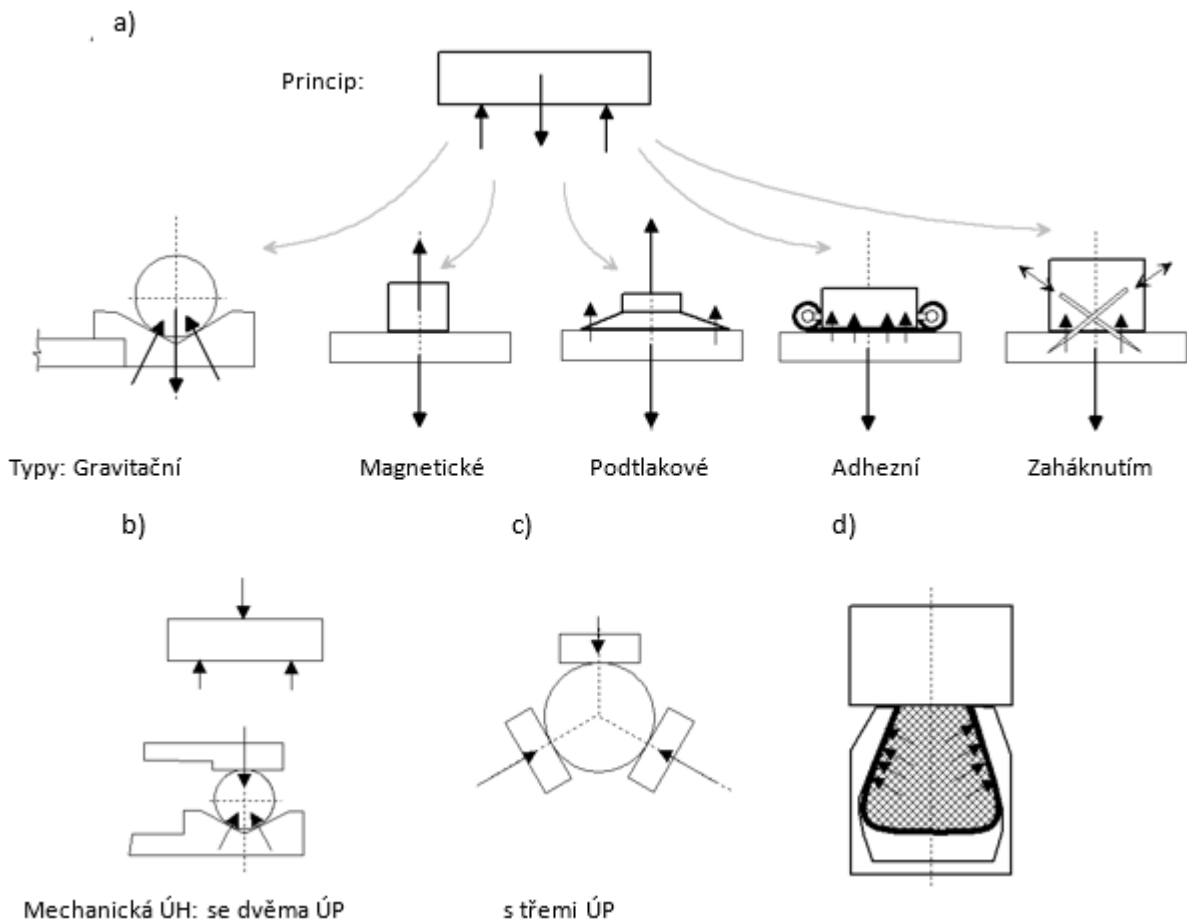
Strukturou uchopení se rozumí počet, kvalita a rozmístění kontaktů úchopných prvků s objektem. S přihlédnutím k jednotlivým aspektům lze rozlišovat:

- a) *Podle charakteru uchopení a držení objektu*, tj. kvality kontaktu úchopných prvků s objektem, lze v souladu s Obr. 4.14 rozlišovat:
  - silové uchopení,
  - tvarové držení (uchopení),
  - kombinované silové a tvarové uchopení.
- b) *Podle umístění kontaktní roviny úchopných prvků* oproti objektu (Obr. 4.15):
  - uchopení jednostranné,
  - uchopení oboustranné,
  - třístranné uchopení,
  - plošné tvarové uchopení.
- c) *Podle počtu úchopných prvků*:
  - s dvěma úchopnými prvky,
  - s třemi úchopnými prvky,
  - s více úchopnými prvky.
- d) *Podle místa kontaktu úchopného prvku s objektem* (Obr. 4.16):
  - vnější uchopování,
  - vnitřní uchopování.
- e) *Podle polohy těžiště objektu oproti rovině uchopení* (Obr. 4.17):
  - uchopení symetrické – body kontaktu jsou rozmístěny symetricky oproti rovině procházející těžištěm,
  - uchopení nesymetrické – těžiště leží mimo rovinu uchopení.
- f) *Podle polohy roviny uchopení oproti rovině pohybu čelistí*:
  - centrické uchopení,
  - excentrické uchopení.

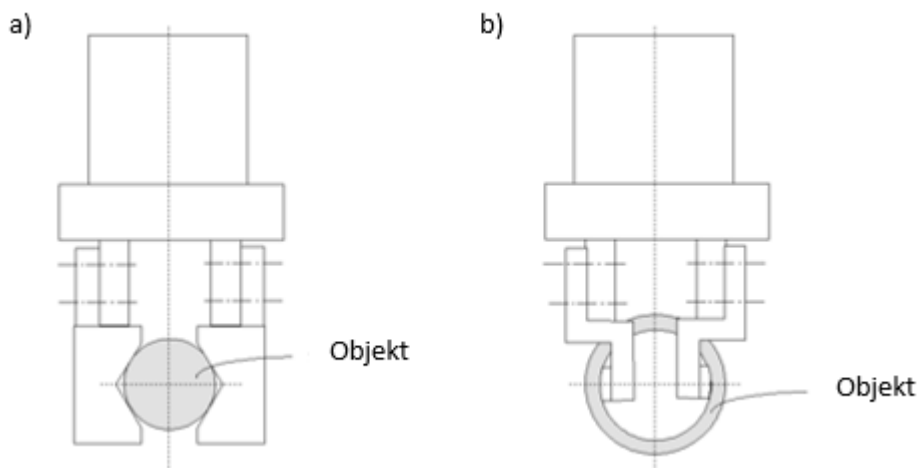


Obr. 4.14 Charakteristika uchopení a držení objektu

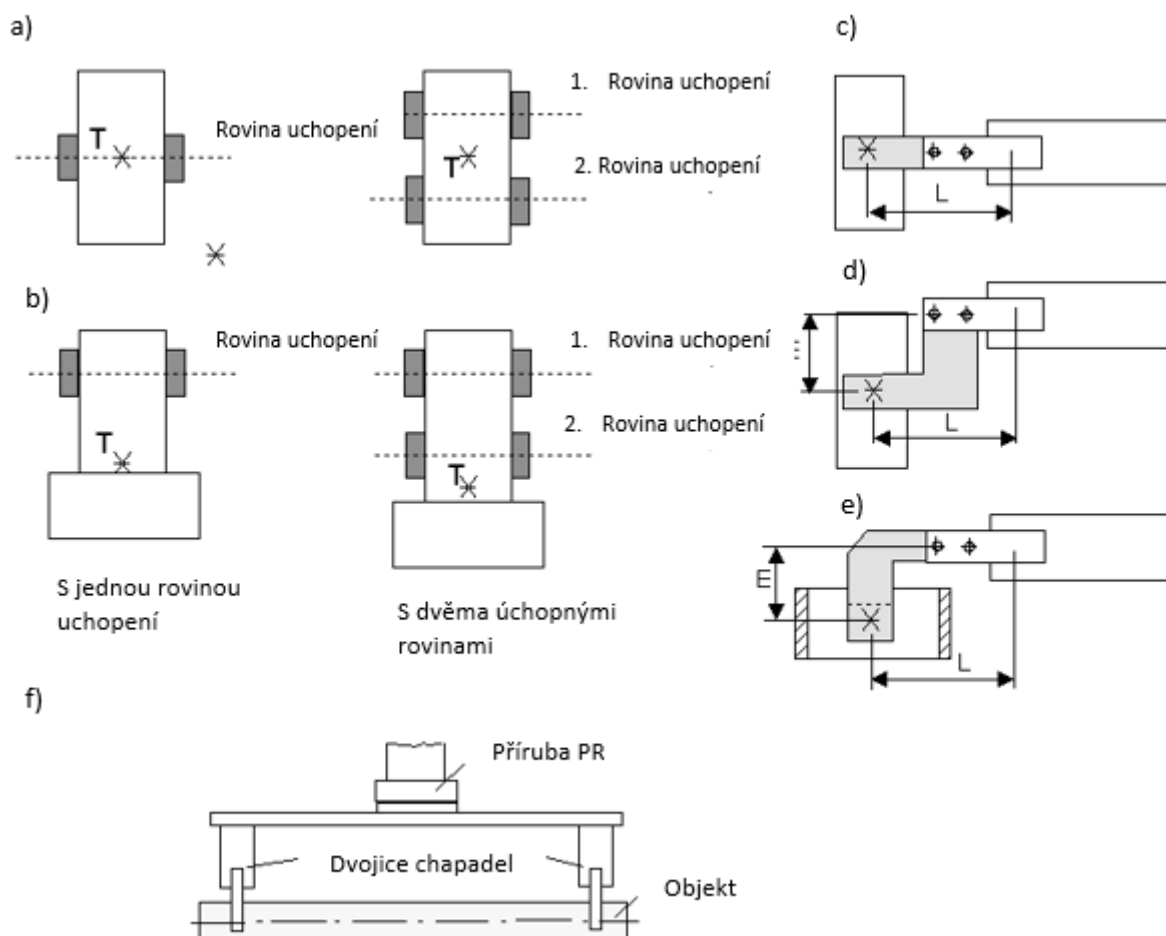




Obr. 4.15 Umístění kontaktních ploch úchopných prvků: a – uchopení jednostranné; b – uchopení oboustranné; c – třístranné uchopení; d – plošné flexibilní tvarové uchopení



Obr. 4.16 Princip uchopení: a – vnější; b – vnitřní



Obr. 4.17 Poloha těžiště objektu oproti rovině uchopení a oproti rovině pohybu čelistí: a – uchopení symetrické; b – uchopení nesymetrické; c – centrické uchopení; d – excentrické uchopení – vnější; e – excentrické uchopení – vnitřní; f – úchopná hlavice tvořená dvojicí chapadel – rozložené uchopení

Z hlediska požadované úchopné síly zajišťující uchopení se zvolenou mírou bezpečnosti a pro minimalizaci reakcí v uložení čelistí chapadla je vhodné upřednostňovat symetrické a centrické uchopení ( $E = 0$ ) při minimálním vyložení objektu oproti úložným bodům chapadla (vzdálenost  $L_{\min}$ ). Přitom excentrické umístění působí síly (Obr. 4.17 d, e) může být při účelném uspořádání a při zohlednění přídavných zatěžovacích momentů výhodné. V konkrétních případech však vyžaduje vždy podrobnější statický výpočet.

Naproti tomu u objektů s velkým momentem setrvačnosti (např. dlouhé objekty) je často výhodné rozložené uchopení s uspořádáním úchopných prvků ve dvou rovinách a pro extrémní případy je možná aplikace dvou chapadel paralelně, umístěných na společném rámu (Obr. 4.17 f).

#### 4.5.1 Pasivní úchopné hlavice PR

Pasivní úchopné hlavice PR a manipulátorů patří k nejjednodušším prostředkům k uchopení předmětů a jejich přenášení. Vzhledem k většinou jednostrannému kontaktu s objektem je nutné zajistit pro jejich bezpečný provoz vyšší míry bezpečnosti oproti aktivním úchopným hlavicím.

Koeficienty bezpečnosti se zde běžně pohybují v rozmezí  $k_c = 5 \div 8$  a výjimečně i více. Značné rozšíření mají tyto prostředky u jednoduchých manipulátorů (podavačů) také vzhledem k relativně nízké ceně.

Z hlediska charakteru úchopné síly se rozlišují a vyskytují tyto typy pasivních úchopných hlavic:

- mechanické,
- magnetické,
- podtlakové.

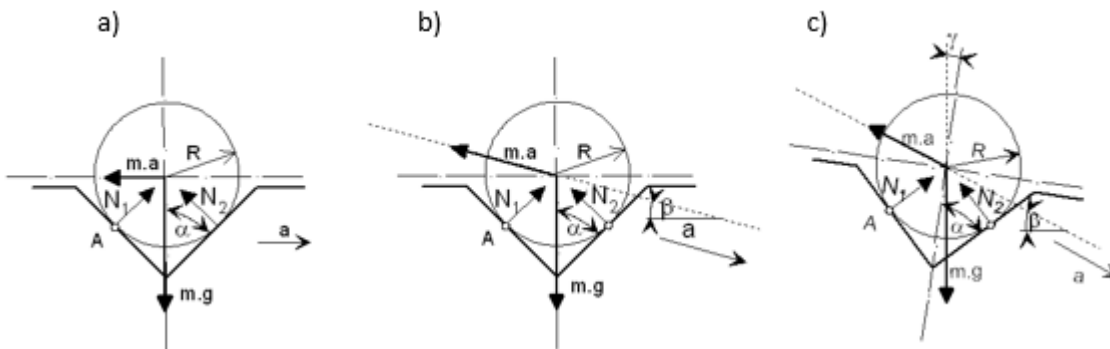
#### 4.5.1.1 Pasivní úchopné hlavice mechanické

Tyto hlavice se vyznačují buď užíváním síly tíže (tvarová lůžka, čepy, závěsy apod.) anebo pružné deformace úchopných prvků (tzv. odpružené čelisti), popř. může jít o úchopné hlavice s oboustranným uchopením, kde úchopná síla je vyvozována pasivně pomocí pružin.

Společným problémem všech typů pasivních úchopných hlavic je způsob rušení úchopné síly v okamžiku odkládání objektu. To se provádí buď kontaktem odkládaného objektu s periferií, resp. s komunikujícím výrobním strojem nebo zařízením anebo aktivně pomocí síly od vnějšího pohonu.

##### A. Prizmatické lůžko

V praxi se aplikuje zejména pro manipulaci v horizontální rovině široká škála jednoduchých tvarových lůžek, přičemž častý je tvar prizmatu. Vždy je nutné zajistit dynamické podmínky limitující vypadnutí součásti z lůžka. V zásadě lze sledovat tři případy podle Obr. 4.18.



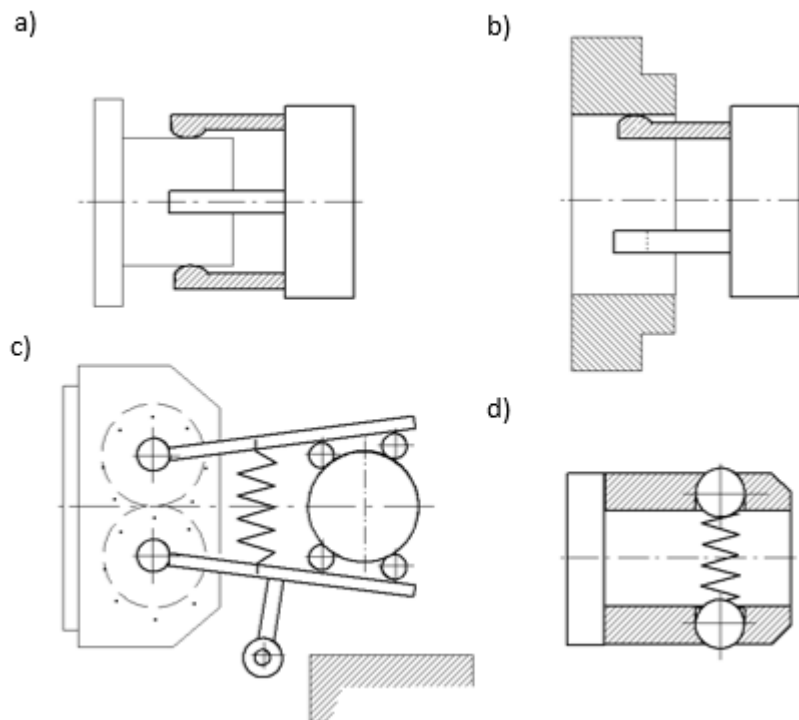
Obr. 4.18 Rovnováha objektu při pohybu prizmatického lůžka

##### B. Odpružené čelisti

Jde o širokou škálu úchopných hlavic, kdy najetím čelistí na objekt dojde k jejich pružné deformaci a tím k vyvození úchopné síly a pasivnímu uchopení, resp. najížděním na objekt se přes narážku otevřou pružinou svírané úchopné prvky.

Příklady konstrukčních principů jsou uvedeny na Obr. 4.19. Principiálně jsou možné různé koncepce řešení s jedním, dvěma nebo více vetknutými odpruženými úchopnými prvky (čelistmi). Dostaneme tak různá provedení kleštin pro vnitřní nebo vnější uchopení, popřípadě otočnými

úchopnými prvky svíranými pružinou. Jinou možností je aplikace radiálně posuvných úchopných prvků ve tvaru kuličkových západkových mechanismů.

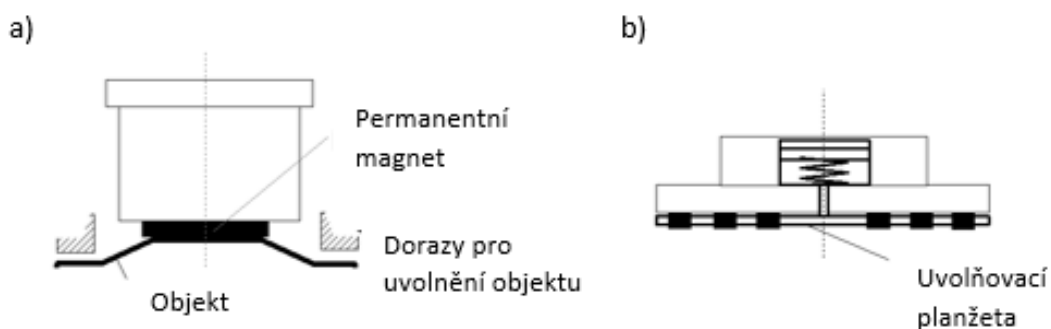


Obr. 4.19 Schémata pasivních úchopných hlavice s odpruženými úchopnými prvky: a – odpružené čelisti pro vnější uchopení; b – pro vnitřní uchopení; c – otočné čelisti; d – posuvné prvky s kuličkovou západkou

#### 4.5.1.2 Pasivní úchopné hlavice magnetické

Pasivní magnetické úchopné hlavice jsou opatřeny permanentními magnety. Předností je jednoduchá konstrukce a nízká cena. Uvolňování objektů je prováděno buď najetím na vnější dorazy (Obr. 4.20 a) anebo pomocí uvolňovací planžety s pneumatickým pohonem (Obr. 4.20 b).

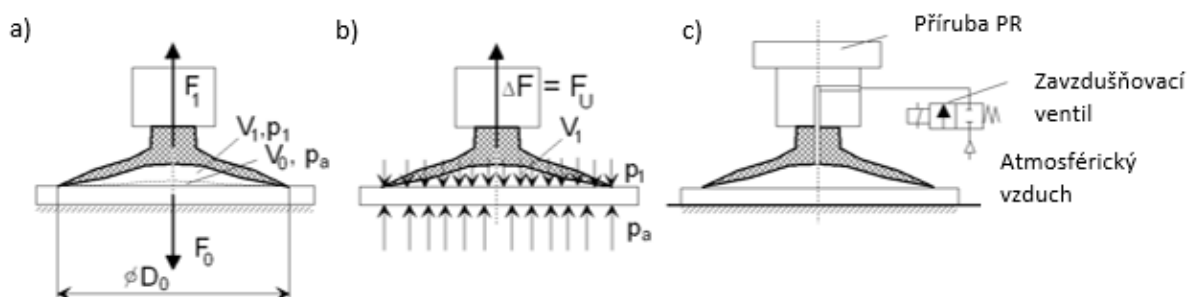
Hlavním problémem efektivní aplikace magnetických úchopných hlavice je remanentní magnetismus, který způsobuje zachycování feromagnetických nečistot na objektech manipulace.



Obr. 4.20 Pasivní magnetické úchopné hlavice: a – uvolňování objektů pomocí vnějších dorazů; b – uvolňování objektu pomocí poháněné planžety

### 4.5.1.3 Pasivní podtlakové hlavice

Nejrozšířenějším typem pasivních podtlakových úchopných hlavice jsou deformační přísavky. K uchopení předmětu dochází podle Obr. 4.21. Nejprve se zmenší objem pod přísavkou na hodnotu  $V_0$  deformací přísavky jejím přitlačením na objekt, přičemž lze předpokládat, že tlak je přitom roven atmosférickému tlaku, tedy  $p_0 = p_a \cong 10^5 \text{ Pa}$ . Pohybem úchopné hlavice se postupně přísavka deformuje a zvětšuje se objem vzduchu na hodnotu  $V_1$ , současně se snižuje tlak na hodnotu  $p_1$  a vzniká úchopná síla  $F_U$ . Problematické je při aplikaci deformačních přísavek rušení úchopné síly. Odrhnutí objektu pomocí vnějších mechanických dorazů lze nahradit zavzdušněním prostoru pod přísavkou v okamžiku uvolňování objektu. Atmosférický vzduch je přiváděn pomocí elektricky ovládaného pneumatického ventilu (Obr. 4.21 c).



Obr. 4.21 Princip deformační přísavky: a – vyvození podtlaku; b – silová rovnováha na objektu; c – princip uvolnění objektu zavzdušňovacím ventilem

### 4.5.2 Aktivní mechanické úchopné hlavice – chapadla

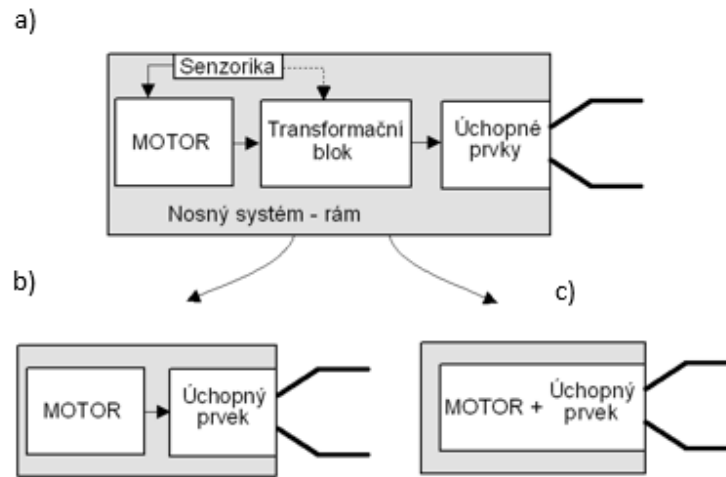
Chapadlo (mechanická úchopná hlavice – MÚH) je koncovým členem manipulačního zařízení, slouží k uchopování a držení objektů a úchopná síla je vyvozována na mechanickém principu.

#### 4.5.2.1 Skladba a základní požadavky na chapadla

Mechanické chapadlo se skládá z pěti základních komponent, kterými jsou:

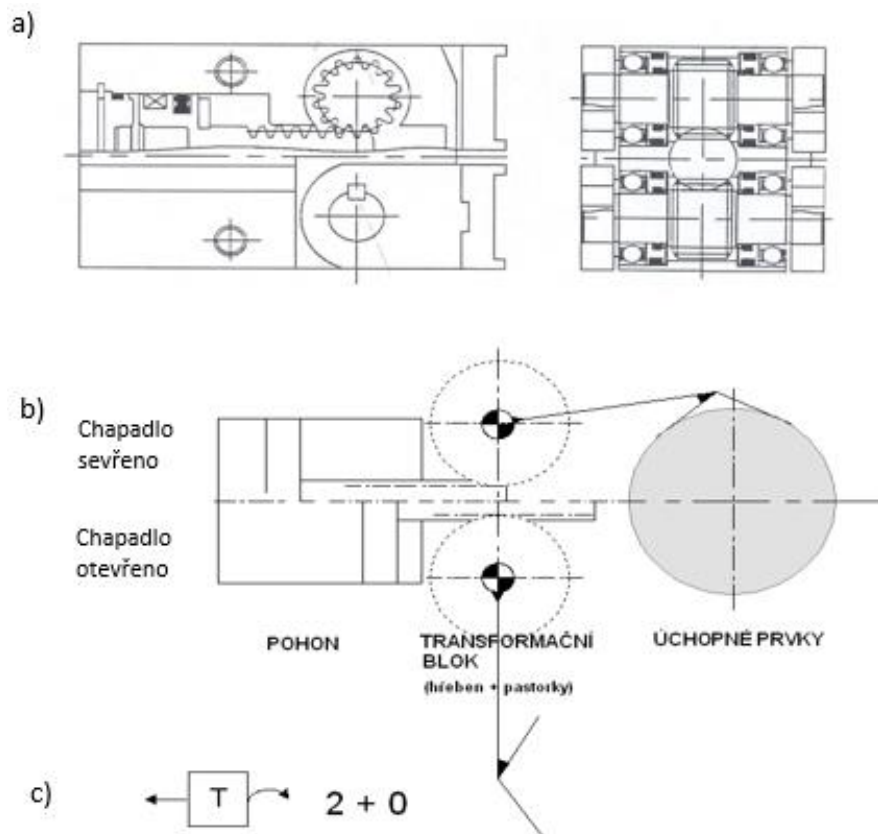
- nosný systém – rám;
- motor;
- transformační blok (TB);
- úchopné prvky (ÚP, čelisti);
- sensorika.

Vedle základní struktury (Obr. 4.22 a) jsou často aplikovány zjednodušené struktury bez TB (Obr. 4.22 b, c).



Obr. 4.22 Struktura chapadla: a – struktura s transformačním blokem (základní); b – struktura bez TB; c – s integrací ÚP a motoru

Chapadlo uvedené na Obr. 4.23 je vybaveno dvěma aktivními otočnými ÚP s velkým rozsahem pohyblivosti (o 90°), TB je tvořen ozubeným převodem s dvojicí pastorků a dvojitým hřebenem, kterým je zajištěn konstantní silový převod od pneumomotoru na úchopné prvky a synchronizace jejich pohybu.



Obr. 4.23 Příklad chapadla se dvěma úchopnými prvky (konstrukční řešení firma SMC): a – konstrukční řešení; b – kinematické schéma; c – schématická značka (neidentická transformace: vstup posuvný – výstup rotační, 2 aktivní ÚP + 0 pasivních ÚP)

### **A. Nosný systém – rám**

Rám se skládá ze základního tělesa, do něhož jsou většinou přímo integrovány motor a TB, úložné body (vedení) ÚP i snímače a prostřednictvím příruby se fixuje na přírubu průmyslového robotu. Pokud nejsou příruby kompatibilní, je nutné realizovat připojení chapadla na koncový člen robotu pomocí mezipříruby.

### **B. Motory MÚH**

Nejčastějším typem motorů aplikovaných u chapadel jsou pneumatické přímočaré (Obr. 4.24), popř. kyvné motory. Hydraulické pohony se aplikují pouze v případech chapadel u těžkých manipulátorů s extrémními hodnotami úchopných sil, desítky až stovky kN.



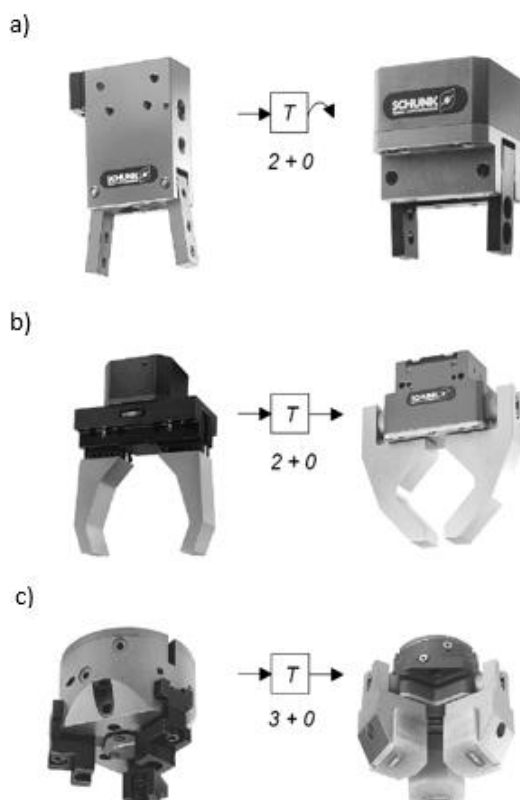
Obr. 4.24 Chapadla s pneumatickým pohonem, zdroj: <http://www.robot27.com/contact/>

V poslední době se stále častěji pro chapadla aplikují elektropohony, zejména pro takové aplikace, které vyžadují řízení průběhu pohybu při svírání chapadla, resp. je vyžadováno dráhové řízení úchopné síly, Obr. 4.25.



Obr. 4.25 Chapadla s elektrickým pohonem, zdroj: <https://cz.rs-online.com/web/>

Na Obr. 4.26 jsou ukázána chapadla s dvěma a třemi ÚP, která jsou nejčastějším provedením úchopných hlavic. V nabídce MÚH chapadel uvedené typy naprosto převládají.



Obr. 4.26 Příklad typových mechanických hlavic (výrobce firma Schunk): a – chapadla s dvěma otočnými ÚP; b – chapadla s dvěma posuvnými ÚP; c – chapadla se třemi posuvnými ÚP



### **C. Transformační blok**

TB MÚH může plnit několik různých funkcí:

- umožňuje měnit druh pohybu motoru,
- modifikuje parametry hnací síly v přenosu na čelisti a ÚP,
- synchronizuje pohyb dvou nebo více ÚP,
- určuje konstrukční provedení mechanické úchopné hlavice,
- mění smysl pohybu od motoru po ÚP.

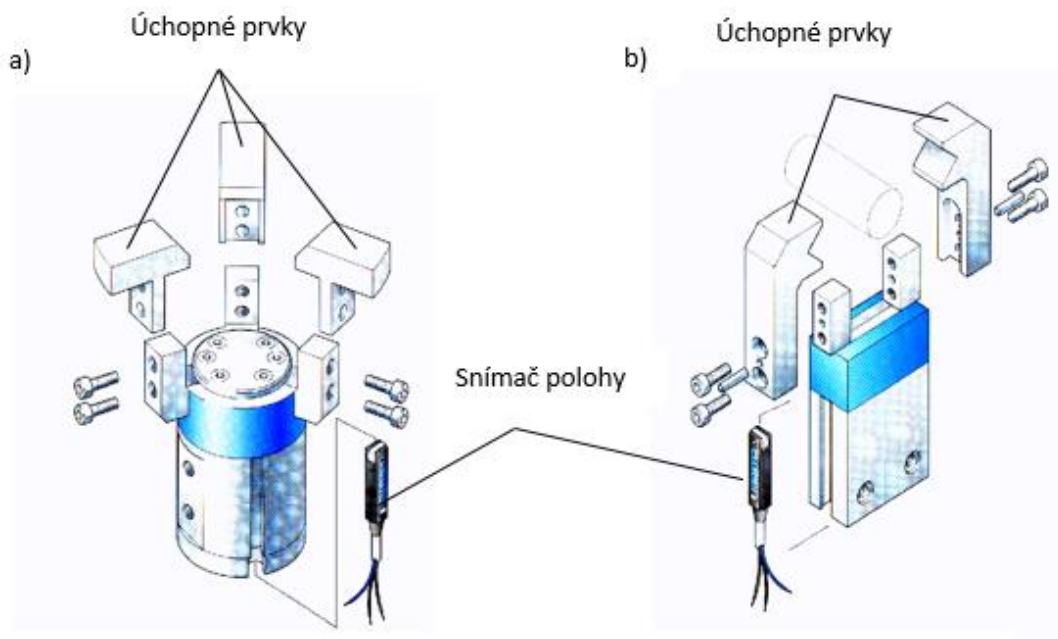
V konstrukci TB mohou být uplatněny různé mechanické principy, nejčastěji:

- kloubové mechanismy,
- kulisové mechanismy,
- ozubené převody,
- mechanismy s křivkovou vazbou (vačkové, šablonové),
- šroubové mechanismy,

což dává obrovskou variabilitu struktur a konstrukčního provedení.

### **D. Úchopné prvky**

ÚP MÚH zajišťují kontakt výstupního členu mechanismu chapadla (čelistí) a objektu a zabezpečují vystředění, stabilní uchopení a držení objektu. Tvar, rozmístění, počet a charakter pohybu ÚP určují pak zásadním způsobem středící schopnosti chapadla, stabilitu a přesnost uchopení. ÚP se dnes velmi často konstrukčně řeší jako výměnná nástavba čelistí (Obr. 4.27), přitom je nutné věnovat mimořádnou pozornost konstrukčnímu návrhu, přesnosti výroby a dodržení tolerancí pro zajištění tuhosti a přesnosti polohy uchopení.



Obr. 4.27 Konstrukční řešení spojení úchopného prvku a čelistí chapadla; a – chapadlo s třemi ÚP; b – chapadlo s dvěma ÚP

### **E. Senzorika**

Pro nasazení chapadel v automatické manipulaci je sensorika nezbytná. U mechanických úchopných hlavíc se používá řada typů snímačů, které mohou plnit různé úkoly:

- hlášení polohy chapadla (levné a nejčastější),
- odměřování polohy chapadla,
- odměřování silových popř. momentových zatížení.

Senzorové vybavení chapadel je vždy kompromisem mezi technickými požadavky dané aplikace a cenou. Souvislé odměřování polohy je nákladné, jak z hlediska snímačů, tak potřebné vyhodnocovací elektroniky. Proto jsou dnes miniaturní odporové, indukční, ultrazvukové, resp. laserové snímače pro odměřování polohy zabudované přímo na výstupní člen chapadla spíše výjimkou, u elektricky poháněných chapadel se častěji pro nepřímé odměřování polohy užívají inkrementální optické snímače polohy (kap. 5.2.12.2), popř. rezolvery, které odměřují polohu hřídele použitého elektropohonu (3 až 5 % aplikací). Dynamometry se užívají pro odměřování sil v manipulačních aplikacích výjimečně, přičemž častěji se aplikují u montážních hlavíc.

Běžně jsou aplikovány dvouhodnotové přibližovací snímače polohy, převážně indukční, které snímají aktuální polohu chapadla a následně spínají logické vstupy řízení robotu. Indikuje se jimi buď poloha zvoleného členu TB (nejčastěji čelistí) nebo se testuje poloha pístu pneumatiku (u většiny chapadel vyrobených specializovanými firmami, Obr. 4.27).

#### **4.5.2.2 Požadavky na chapadla**

Požadavky kladené na MÚH lze shrnout do následujících bodů:

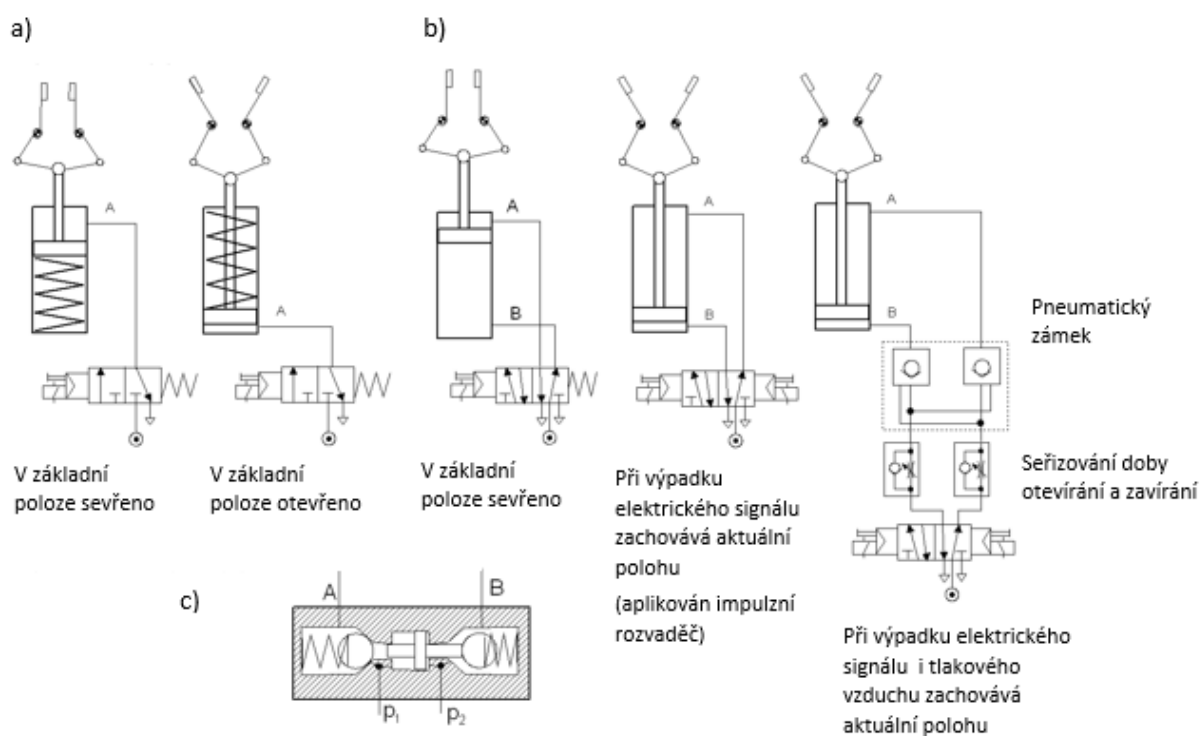
- úchopná síla a hmotnost chapadla,
- konstrukční rozměry,
- vhodná rozhraní pro připevnění na přírubu, přívody energií, sdílení dat a informací,
- vybavení sensorikou,
- bezpečnost uchopení,
- životnost,
- doba otevírání a zavírání,
- nároky na údržbu,
- odolnost vůči pracovnímu prostředí,
- přesnost,
- kompenzace polohových chyb a kolizní ochrana.

Úchopná síla  $F_U$  je základním konstrukčním parametrem chapadel a ve vztahu k hmotnosti chapadla [60] je vhodnou charakteristikou při výběru chapadel z nabídky renomovaných výrobců.

Konstrukční rozměry jsou určující z hlediska obslužnosti uzavřených prostorů. Konstrukce chapadel je provázena snahou po kompaktním řešení s minimálními rozměry ve vztahu k objektu manipulace.

Řešení mechanických rozhraní (přírub) podmiňuje přesnost polohování chapadla vůči PR a tím přesnost uchopení. Energetické přívody musí respektovat požadavky spolehlivosti obvodu a bezpečnosti uchopování a držení objektu, datové a informační přívody a řešení sensoriky musí být provedeno s přihlédnutím k provozní odolnosti a spolehlivosti úchopné hlavice.

Bezpečnost z hlediska chapadlem vyvozené úchopné síly ve všech pracovních režimech se zajistí vhodnou volbou koeficientu bezpečnosti. Provozní bezpečnost z hlediska možného výpadku energie (v nouzových situacích) se může zajistit pasivně pomocí pružinových systémů zajišťujících předpětím požadovanou úchopnou sílu i při výpadku tlakového vzduchu. Zde se používají speciální zapojení pneumatického obvodu (Obr. 4.28).



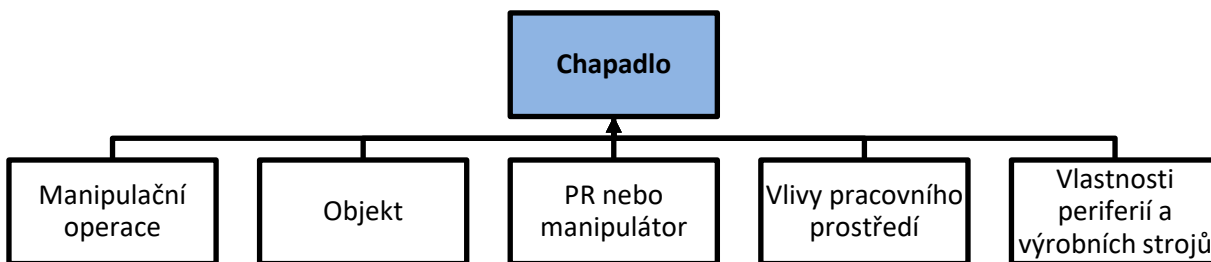
Obr. 4.28 Pneumatické obvody chapadel s různými prostředky zajištění bezpečného uchopení: a – jednočinný pneumotor; b – dvojčinný pneumotor; c – konstrukční princip pneumatického zámku

#### 4.5.2.3 Výběr chapadel z nabídky renomovaných firem

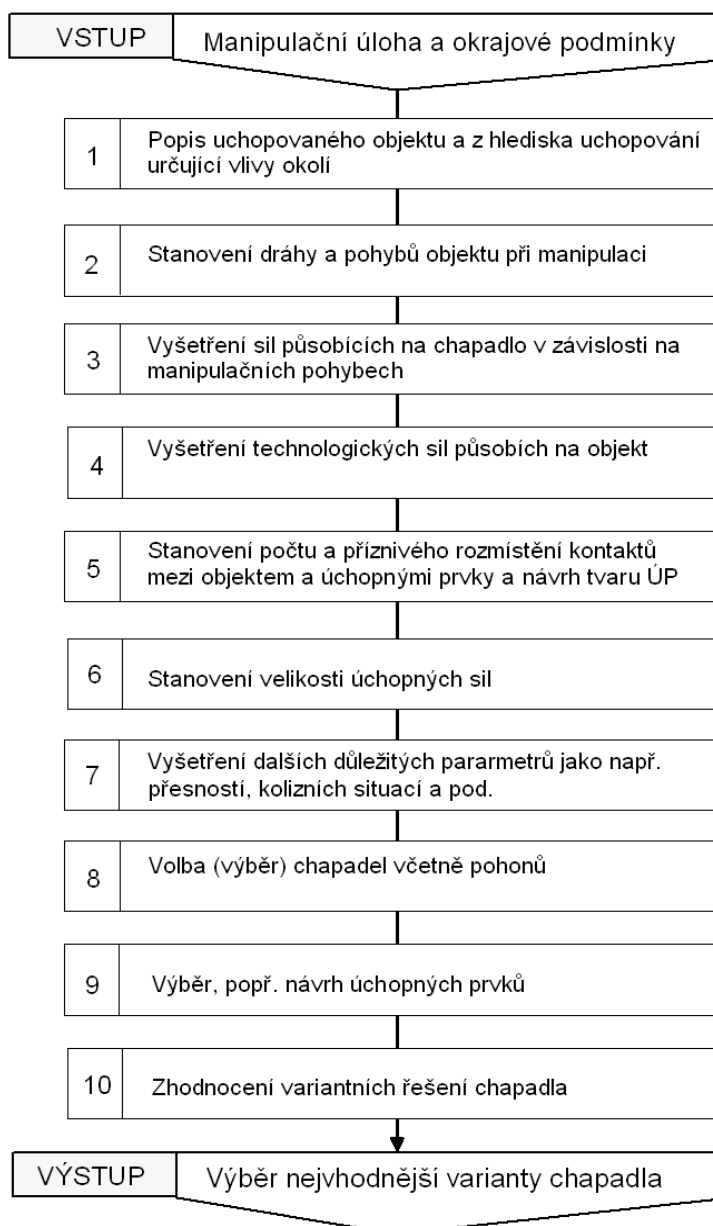
Současný trend využívání modulů v konstrukci manipulátorů a PR se uplatňuje též u chapadel, která dnes nabízejí desítky firem v široké škále typů, velikostí i kvality provedení. Jednak jde o firmy, které se specializují na chapadla a upínače (Schunk, IPR, Sommer, GMG, Airtec a další), které většinou souběžně nabízejí další rozšiřující moduly, systémy výměny efektorů i pohybové jednotky manipulátorů. Vedle toho se úchopné hlavice stále výrazněji prosazují v nabídce renomovaných výrobců pneumatických prvků (např. Festo, SMC, Bosch a další).

Orientace v podkladové firemní literatuře vyžaduje znalost problematiky a přehled o důležitých parametrech. Zjednodušené přístupy při výběru chapadla mohou přinést chyby koncepční i chyby v dimenzování, což může mít fatální následky. Výběru chapadla předchází obdobná škála činností, které jsou spojeny s přístupem ke konstrukčnímu řešení chapadla. Je nutné vycházet z důkladné

analýzy vnějších vlivů na výběr chapadla (Obr. 4.29) a na tomto základě provést postupné kroky pro výběr, které jsou metodicky shrnuty do 10 bodů v Obr. 4.30.



Obr. 4.29 Vnější vlivy působící na výběr chapadla



Obr. 4.30 Postup výběru chapadla z nabídky renomovaných firem

Postup volby chapadla závisí na tom, zda je prováděn jeho výběr pro PR nebo zda jde o součást řešení modulární konstrukce účelového manipulátoru. Zatímco v prvním případě jsou omezující vlivy ze strany PR dány jeho technickými parametry, v případě konstrukce manipulátoru patří po návrhu koncepce výběr (popř. konstrukce) chapadla do 1. etapy konstrukčního řešení (konstrukce manipulátorů musí postupovat od koncového členu směrem k rámu tak, aby bylo zřejmé dynamické zatěžování pohybových jednotek). Je nutné zejména věnovat pozornost výpočtu úchopných sil, návrhu a konstrukčnímu řešení úchopných prvků, které nejsou v naprosté většině součástí dodávky od výrobce chapadla.

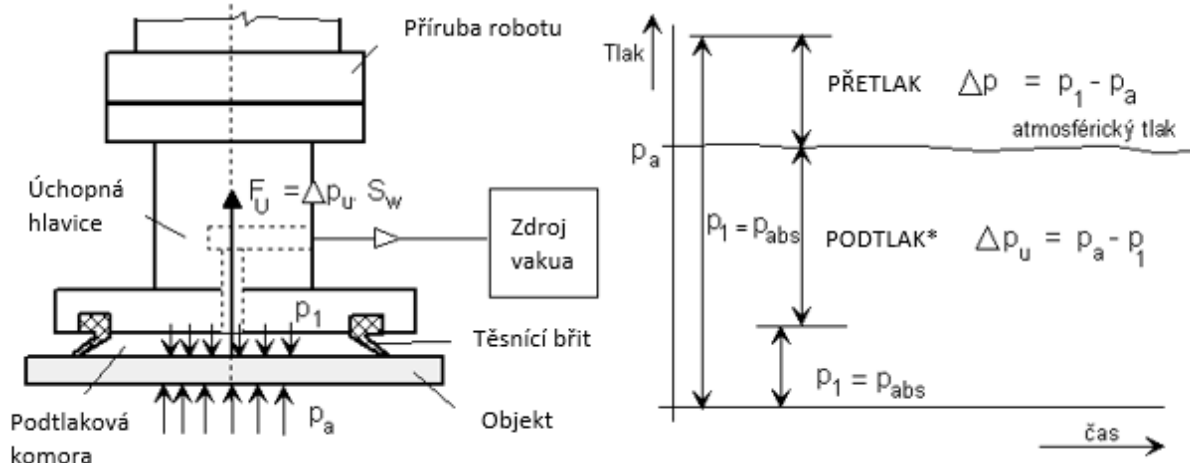
### 4.5.3 Aktivní podtlakové úchopné hlavice

Aktivní podtlakové úchopné hlavice (APÚH) mají v současné době rozmanité využití nejen u manipulátorů a PR, ale také u výrobních strojů. Aplikují se zejména pro uchopování a manipulaci s širokou škálou plochých objektů – desek z různých materiálů (dřevo, plasty, skleněné tabule, plechy), mají uplatnění v procesech balení, v paletizaci atd. Je k dispozici široká škála typů, velikostí a provedení APÚH, které navazují na využití nabídky komponent řady specializovaných firem, Obr. 4.31.



Obr. 4.31 Ukázky aktivních podtlakových úchopných hlavic, zdroj: <http://www.onexiarobotics.com>,  
<https://www.plasticmachinerymagazine.com/blow-molding/>,  
<https://e oat.net/tooling/>,  
<https://www.schmalz.com>

Vytvoření úchopné síly je zde založeno na principu rozdílu tlaku vně a uvnitř úchopného prvku – podtlakové komory (dále jen přísavky), která je vakuotěsně tímto rozdílem tlaků přitisknuta definovanou plochou na povrch objektu (Obr. 4.32). Odsávání vzduchu z podtlakové komory je přitom prováděno aktivně, pomocí vnějšího zdroje vakua.



\* *Podtlak je definován rozdílem atmosférického tlaku  $p_a$  a absolutního tlaku  $p_1$  pod přísavkou  $\Delta p_u = p_a - p_1$ , přičemž platí  $0 < \Delta p_u < 1$ . V literatuře je často podtlak uváděn jako záporný přetlak  $\Delta p_u \in \langle -p_a, 0 \rangle$  a někdy je uváděn % Vakuum  $= \frac{\Delta p_u}{p_a} \cdot 100\%$ .*

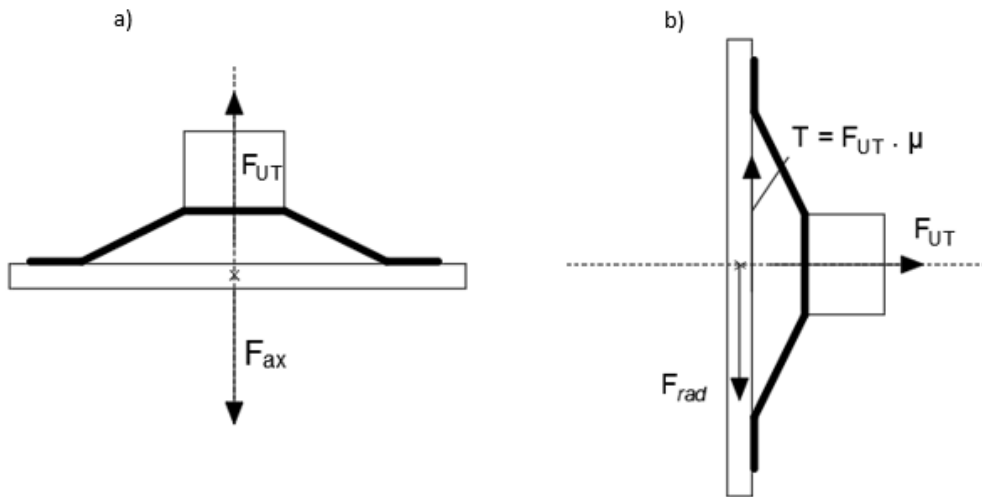
Obr. 4.32 Princip aktivní podtlakové úchopné hlavice

Při návrhu APÚH je podle [61] nutné umět stanovit typ, počet a velikost přísavek, jejich upevnění do rámu, navrhnout typ a velikost zdroje vakua a vyřešit pracovní vakuový obvod.

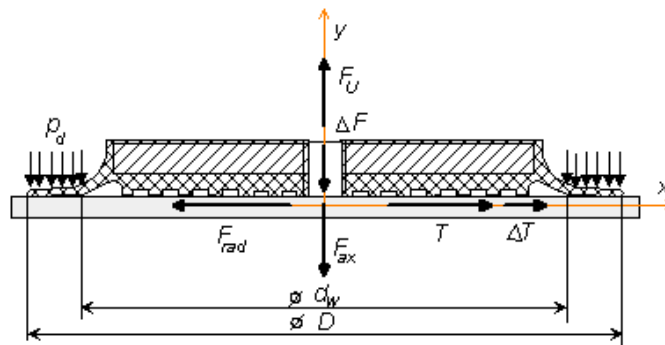
#### 4.5.3.1 Silové zatěžování přísavky

Z hlediska zatěžování přísavky je výhodná taková poloha uchopení, kdy zátěžná síla (síla tíže) působí v ose přísavky, kolmo na rovinu uchopení (horizontální) – axiální zatěžování. Vertikální rovina uchopení přináší radiální zatěžování třecí silou v rovině uchopení, které je nevýhodné.

Na zvláštních případech v praxi častého zatěžování (Obr. 4.33) lze ukázat rozdílný mechanismus zatěžování přísavky. Je-li objekt zatěžován vnějšími silami **v axiálním směru** (Obr. 4.33 a) je zatěžující síla přenášena prostřednictvím tzv. teoretické úchopné síly přísavky, pro zatěžování **radiální**, je síla přenášena třením. Přitom je zřejmé, že únosnost přísavky je v případě zatěžování podle Obr. 4.33 b  $\mu$  – krát nižší ( $\mu$  je koeficient tření dvojice objekt – přísavka). Navíc při radiálním zatěžování zvyšují nadměrné deformace v rovině kontaktu nebezpečí kolapsu uchopení [62], což vyžaduje provést kompenzaci volbou větší míry bezpečnosti, která pak v sobě zahrnuje i nejistotu stanovení hodnoty koeficientu tření.



Obr. 4.33 Základní typy zatěžování: a – axiální rovina uchopení; b – radiální rovina uchopení



Obr. 4.34 Silová rovnováha na objektu

S přihlédnutím k Obr. 4.33 bude pro teoretickou úchopnou sílu  $F_{Ut}$  platit

$$F_{Ut} = \frac{F_{rad}}{\mu} + F_{ax}. \quad (4.1)$$

Pro zajištění potřebné míry bezpečnosti  $k$  dostaneme pro skutečnou úchopnou sílu  $F_U$  vztah

$$F_U = k \cdot \left( \frac{F_{rad}}{\mu} + F_{ax} \right), \text{ resp. } F_U = k_1 \cdot F_{ax} + k_2 \cdot \frac{F_{rad}}{\mu} \quad (4.2 \text{ a,b})$$

Pro zvolenou hodnotu podtlaku lze stanovit účinnou plochu přísavky (síla  $F_U$  je vyvozená podtlakem  $\Delta p_u$ , který působí na účinnou plochu  $S_w$  přísavky)

$$S_w = \frac{F_U}{\Delta p_u} \quad (4.3)$$

a následně dostaneme pro účinný průměr přísavky  $d_w$  (Obr. 4.34)

$$d_w = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_w}. \quad (4.4)$$

#### 4.5.3.2 Komponenty vakuového pracovního obvodu

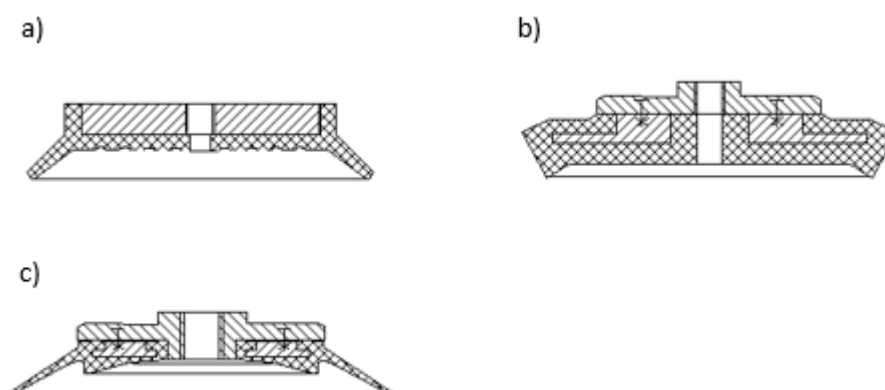
Mezi komponenty vakuového pracovního obvodu patří:

- přísavky,
- zdroje vakua,
- obvod a ventily,
- sensorika.

#### 4.5.3.3 Přísavky

Přísavky jsou základním prvkem, který zajišťuje interakci s objektem. Jsou nabízeny v rozsáhlé škále typů a velikostí a jednotlivé typy přísavek se liší svými vlastnostmi a podmiňují aplikační možnosti.

Nejčastější jsou **ploché kruhové přísavky**, které mají po obvodu buď těsnící břít, který se deformuje ohybem nebo těsnící kroužek deformující se tlakem, popřípadě je realizována jako dvoubřítá přísavka (Obr. 4.35). Tyto přísavky jsou k dispozici v široké škále velikostí, v rozsahu jmenovitých průměrů od 1 do 320 mm, přičemž větší přísavky mají rovinnou dosedací plochu tvořenou výstupky, na kterou dosedne uchopovaný objekt, který je tím jednoznačně polohován.



Obr. 4.35 Základní typy plochých kruhových přísavek: a – jednobřítá plochá přísavka; b – plochá přísavka s těsnícím kroužkem; c – dvoubřítá plochá přísavka

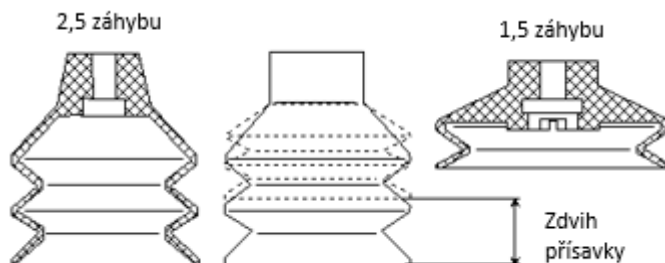
Jednobřítá plochá přísavka vhodná pro běžné uchopování hladkých objektů, např. plechů, skleněných tabulí, kartónů, desek.

Plochá přísavka s těsnícím kroužkem je po obvodu opatřena deformačním kroužkem a zvláště je vhodná pro drsné, popř. strukturované povrchy (dřevo, kámen, drsné sklo, profilovaný plech, atd.).

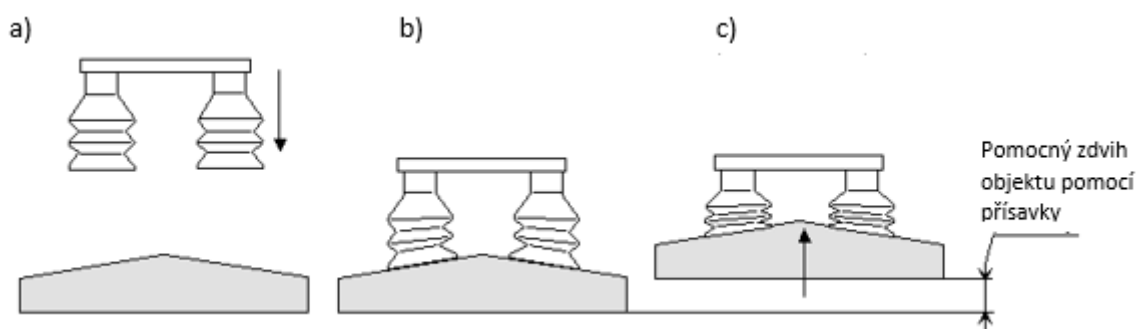
Dvoubřítá plochá přísavka těsnost je zajišťována kombinací těsnícího břitu a kroužku, má vysokou elasticitu a s výhodou může být aplikována v případech drsných povrchů objektů se značným prověšením při manipulaci (např. pro okujené a znečištěné plechy), kde zajišťuje minimální síly při uchopování a větší bezpečnost držení



**Skládané přísavky** slouží k manipulaci s objekty, jejichž úchopná plocha je postavena šikmo k ose přísavky, je zakřivená nebo nerovinná. Tyto přísavky jsou tvořeny vlnovcem, nejčastěji s 2,5 anebo 1,5 záhybem (Obr. 4.36). Uchopení touto přísavkou má dvě fáze (Obr. 4.37). Po najetí APÚH na objekt dosedají skládané přísavky na plochy uchopení a jemně s minimálními silami se deformují do normály k ploše. V druhé fázi dojde po připojení vakua k přísátí a podle velikosti vakua a působících vnějších sil (tíže objektu) je dosažena silová rovnováha.



Obr. 4.36 Skládané přísavky

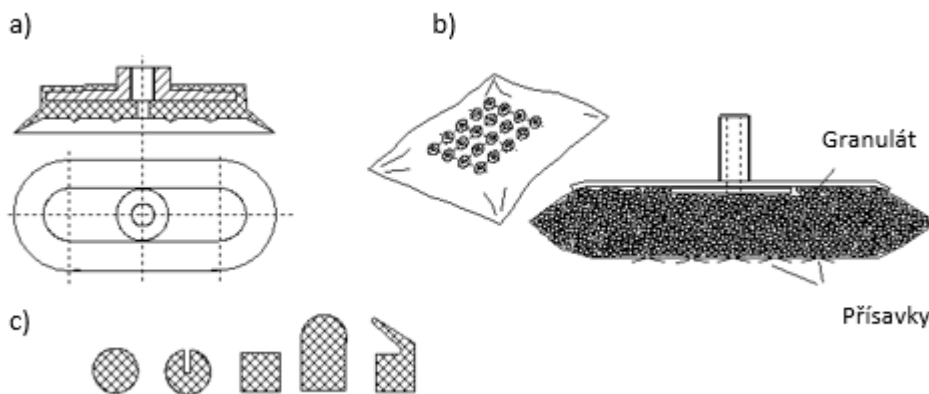


Obr. 4.37 Princip uchopování hlavicí osazenou skládanými přísavkami: a – najetí ÚH na objekt; b – první fáze uchopení; c – druhá fáze uchopení

Při vakuování skládané přísavky je objekt poněkud vyzdvižen nad odnímací pozici, tento zdvih v důsledku pružného přetvoření přísavky může být využit jako přídavný manipulační pohyb bez dodatečných nákladů. Vzhledem k nízké příčné tuhosti nejsou skládané přísavky vhodné pro manipulace s radiálním zatížením.

### **Speciální přísavky**

Kromě uvedených základních typů jsou dodávány speciální přísavky pro zvláštní účely použití. Například oválné přísavky (Obr. 4.38 a), ploché i skládané dovolující bezpečnou manipulaci s tyčemi a trubkami a ploché materiálu dovolují uchopit za úzké můstky. Relativně nové jsou flexibilní vakuové polštářky s tvarovou adaptivitou vůči povrchu objektu (Obr. 4.38 b). Pro konstrukci podtlakových komor s nekruhovým tvarem podle požadované aplikace jsou nabízeny různé těsnící profily (Obr. 4.38 c), které mohou být využity též pro konstrukci vakuových upínačů.



Obr. 4.38 Speciální podtlakové úchopné prvky: a – oválná přísavka; b – vakuový polštářek; c – těsnící profily (šňůry)

#### 4.5.3.4 Základní technické parametry přísavek

Základními technickými parametry přísavek jsou jmenovitý průměr, teoretická úchopná síla, účinný průměr přísavky, vnitřní objem přísavky (slouží pro výpočet doby přísátí), minimální poloměr křivosti objektu, který lze bezpečně danou přísavkou uchopit. Důležitým údajem je také dráha odpružení těsnících břitů a zdvih přísavky, který je důležitý zejména u skládaných přísavek.

Důležitou volbou pro výběr přísavek je též materiál, z kterého jsou vyrobeny. Je nutné odlišovat materiály pro hladké a strukturované, popř. abrazivní povrchy. Nejčastěji aplikovanými materiály jsou pryž s obchodním názvem perbunan (NBR), dále silikon a polyuretan (PUR) a pro vyšší tepelné namáhání s obchodním názvem viton (FPM – fluorkaučuk).

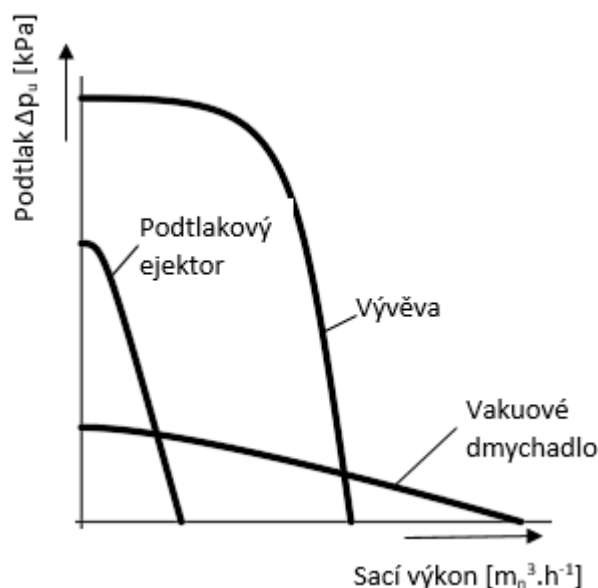
#### 4.5.3.5 Zdroje vakua

Při stavbě vakuového obvodu je důležitým krokem volba typu a velikost zdroje vakua. V zásadě jsou možné dva rozdílné způsoby řešení: zdroj vakua je externí (obvod je připojen k centrálnímu rozvodu vakua – obdobnému jako je centrální rozvod stlačeného vzduchu) anebo lokální, kdy vakuum je vytvářeno co nejbližší místu spotřeby.

Pro volbu typu zdroje vakua jsou rozhodujícími parametry velikost podtlaku a sací výkon. Přitom je možné podle těchto parametrů a s přihlédnutím ke specifickým požadavkům dané aplikace volit:

- vývěvu,
- vakuové (sací) dmychadlo,
- ejektor.

Jejich kvalitativní charakteristiky jsou uvedeny na Obr. 4.39. Obecně lze říci, že každý ze zdrojů vakua má své specifické přednosti, avšak nejhorším případem je současný požadavek vysokého sacího výkonu při vysoké míře vakua [52]. To je spojeno se značnou spotřebou energie a tím současně vysokými náklady.

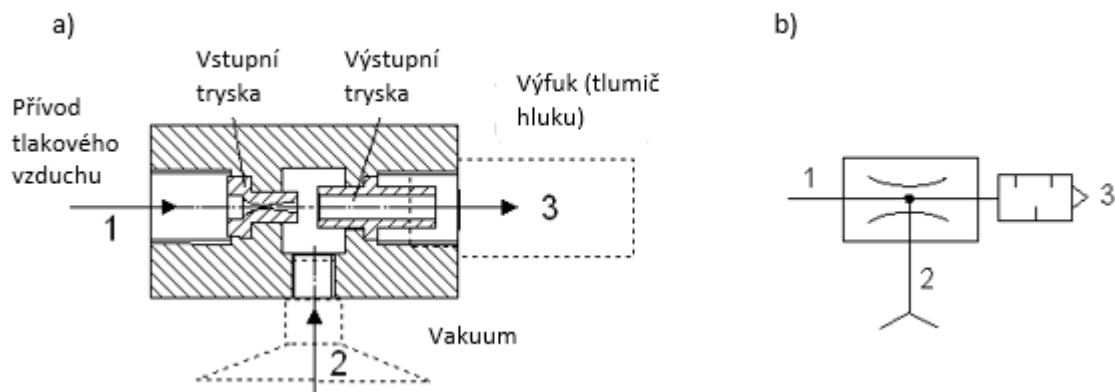


Obr. 4.39 Porovnání charakteristik zdrojů vakua ( $m_n^3$  je normální metr krychlový při tlaku  $p=101,325$  kPa a teplotě  $t=0^\circ C$ )

**Vývěvy** umožňují dosahovat poměrně vysokého podtlaku při malém objemovém průtoku, tj. při nepatrném sacím výkonu. Jsou zvláště výhodné tam, kde je nutné vytvářet podtlak v těsně uzavřeném prostoru s minimálními tlakovými ztrátami. Vývěvy lze rozlišovat podle způsobu utěšňování pracovních prostorů. Zatímco vývěva s během nasucho může pracovat v libovolné poloze, vodokružné a olejové vývěvy vyžadují horizontální umístění. Pro manipulační účely se nejčastěji užívají vývěvy s během nasucho. S výhodou mohou být uplatněny při manipulaci s velkoformátovými plochými objekty, kde je relativně dlouhá doba manipulačního cyklu a požadována dlouhá doba držení objektu.

**Vakuová dmychadla** umožňují naproti tomu dosahovat pouze nízkou míru vakua (-10 až -30 kPa) při velkých sacích výkonech (50 až  $500 m_n^3 \cdot h^{-1}$ ). Mohou se efektivně aplikovat pro vakuování velkých anebo špatně utěsnitelných prostor s velkými ztrátami podtlaku (např. prodyšností objektu) a s požadavkem rychlé reakce. Jsou vhodné pro manipulaci s pórovitými materiály (např. stavebními hmotami) a prodyšnými objekty manipulace (např. pytli, krabicemi, přepravkami).

**Podtlakové ejektory** jsou určeny pro relativně malý objemový průtok při možnosti dosažení až 85% vakua. Ejektory, na rozdíl od vývěv a dmychadel, kde se podtlak vytváří na mechanickém principu, pracují čistě pneumaticky a jejich funkce je založena na tzv. Venturiho principu (Obr. 4.40).

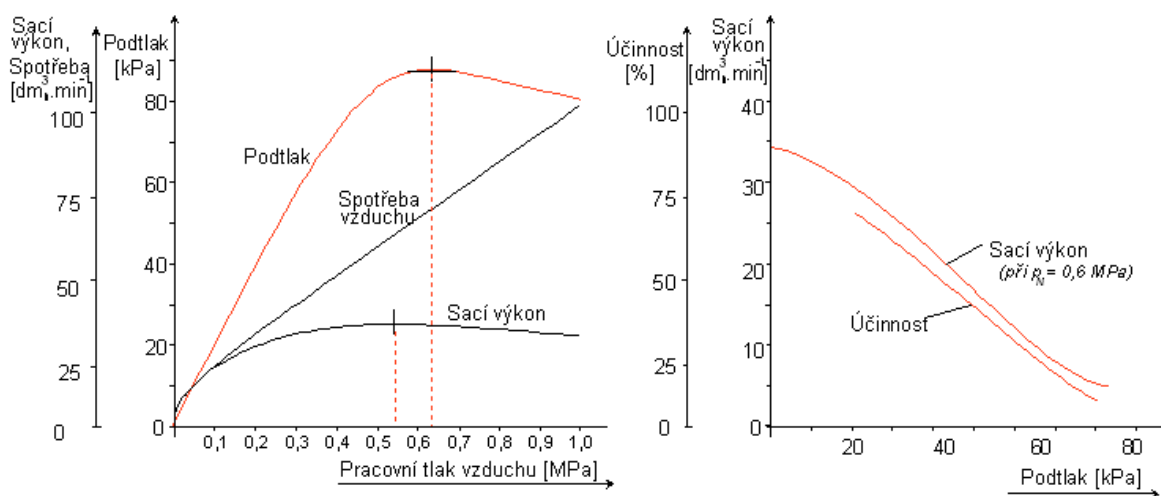


Obr. 4.40 Princip ejektoru: a – konstrukce ejektoru; b – schématická značka

Tlakový vzduch proudí vstupní tryskou (Venturiho dýza) a jeho rychlost se zvyšuje a na výstupu dosahuje nadzvukové rychlosti. Tento vzduch následně expanduje a proudí výstupní tryskou většího průměru a vystupuje do ovzduší přes tlumič hluku. Volný paprsek vzduchu v mezeře mezi oběma tryskami strhává s sebou klidný vzduch, předává mu část kinetické energie a tak vzniká v tomto prostoru podtlak, který umožňuje nasávání vzduchu z podtlakové komory.

Právě ejektory jsou často aplikovány v chapadlech při automatické manipulaci pomocí manipulátorů a PR, kde je výhodou jejich jednoduchost, minimální hmotnost a možnost snadného přivedení tlakového vzduchu. Pro správný výběr a dimenzování ejektor je nutná znalost jeho základních charakteristik (Obr. 4.41). Je zřejmé, že velikost dosažitelného podtlaku s velikostí použitého tlaku stlačeného vzduchu roste a maximální hodnoty bývá dosaženo při cca 0,6 MPa, poté již zůstává podtlak na konstantní úrovni, popř. mírně klesá. Spotřeba tlakového vzduchu přitom s velikostí tlaku proporcionálně roste. Sací výkon je funkce, která má maximum při pracovním tlaku stlačeného vzduchu 0,5 až 0,6 MPa, pak výrazně klesá, což přináší zvýšení spotřeby a výrazný pokles účinnosti ejektoru.

Pro průmyslové aplikace se vyrábí řada ejektorů se speciálními funkcemi, možností práce v přerušovaném chodu, automatickým držetím vakua a vyšší účinnosti ejektoru.



Obr. 4.41 Charakteristiky ejektoru

#### 4.5.3.6 Metodika navrhování a konstrukce APÚH

Při navrhování APÚH je nutné postupovat v několika krocích:

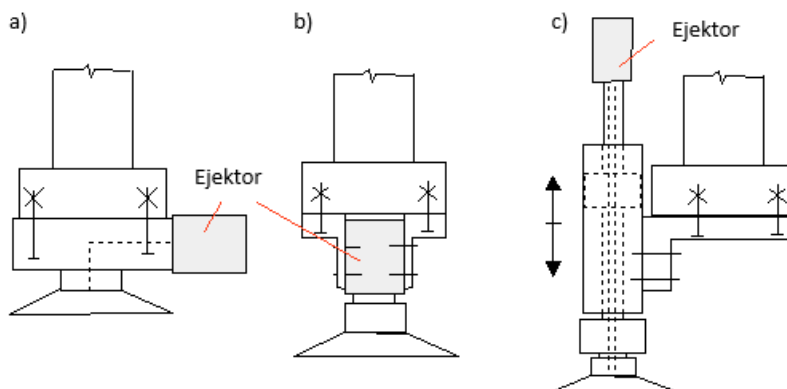
- návrh počtu, typu a rozmístění přísavek a způsob upevnění do nosného tělesa,
- dimenzování velikosti přísavek,
- volba typu a velikosti zdroje vakua,
- řešení pracovního obvodu – volba ventilů a dimenzování přívodů,
- volba senzorů.

V praktickém návrhu není možné se jednotlivým krokům věnovat odděleně v uvedeném pořadí, nýbrž je nutné postupovat komplexně se znalostí všech působících vlivů a případně předběžné volby korigovat ve vazbě na vzájemné interakce.

##### A. Návrh počtu a typu přísavek a způsob upevnění do nosného rámu

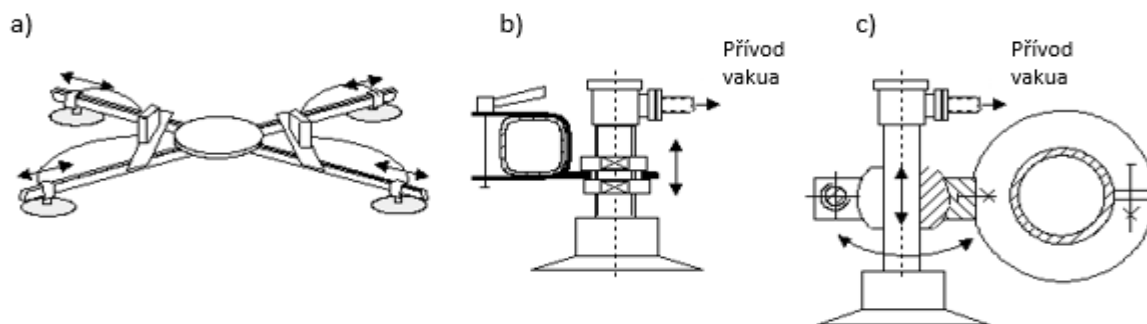
Počet a typ přísavek musí být volen ve vazbě na vlastnosti objektu manipulace (materiál, stav povrchu – zejména drsnost a eventuálně znečištění, prodyšnost, frikční poměry, pevnost materiálu, tvarová stálost, tuhost objektu, geometrické rozměry atd.) a s přihlédnutím k požadavkům manipulační úlohy (manipulační prostor, požadovaná trajektorie, rychlost pohybu, působící zrychlení, doba držení, vlastnosti manipulačního zařízení a periferií, vlastnosti výrobních strojů apod.).

Nejjednodušší typ APÚH je tvořen jedinou přísavkou, která buď je našroubována do tělesa příruby upevněné na přírubu PR (Obr. 4.42 a) nebo našroubována přímo do tělesa ejektoru (Obr. 4.42 b). U modulárních manipulátorů je často aplikována jako výstupní člen posuvná jednotka tvořená pneumatickým s dutou průběžnou pístnicí, do které je našroubována přísavka (Obr. 4.42 c). Všechna uvedená řešení splňují požadavek minimalizace škodlivého objemu a dávají předpoklad pro rychlé uchopení a uvolnění objektu.



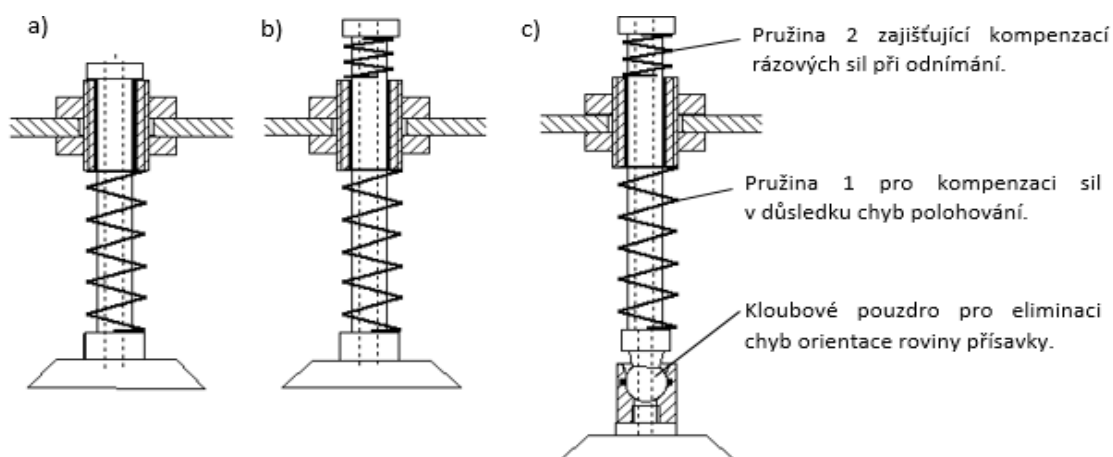
Obr. 4.42 Konstrukce APÚH s jednou přísavkou

Pro uchopování velkých objektů (typu deska, tabule plechu, tabule skla apod.) je nutné volit větší počet přísavek upnutých do nosného rámu úchopné hlavice s přihlédnutím k optimalizaci zatížení (podrobněji v [61, 63]), minimalizaci rázů a nutnosti minimalizace přídavných sil vznikajících v místě uchopování a odkládání objektu v důsledku nepřesného polohování PR, manipulátoru popř. periferie. Hlavice se konstruují buď s pevným fixováním polohy přísavek nebo s možností posouvání po rámu (pasivní flexibilitou) a seřizování výšky, popř. orientace přísavek (Obr. 4.43).

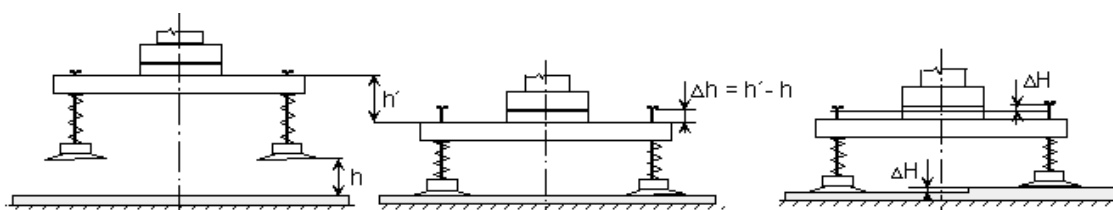


Obr. 4.43 Schéma APÚH se čtyřmi přísavkami: a – úchopná hlavice; b – upevnění s možností seřizování výšky přísavek; c – upevnění v kloubovém pouzdře

Často se používá řešení s odpruženými přísavkami (Obr. 4.44 a), kde pružina 1 zajišťuje kompenzaci polohových chyb manipulačního zařízení a navíc umožňuje kompenzovat nestejnou výšku kontaktních rovin přísavek s objektem (Obr. 4.45), vznikající síly jsou omezeny směry silami zvolených pružin. Složitější kompenzační mechanismus (Obr. 4.44 b) navíc dovoluje pomocí pružiny 2 eliminovat rázové síly při odnímání objektu. Úplné řešení kompenzačního mechanismu podle Obr. 4.43 c je vybaveno kloubovým uložením přísavky a umožňuje tak eliminovat chyby orientace roviny přísavky oproti rovině uchopení objektu.



Obr. 4.44 Kompenzační mechanismy pro připojení přísavek na rám



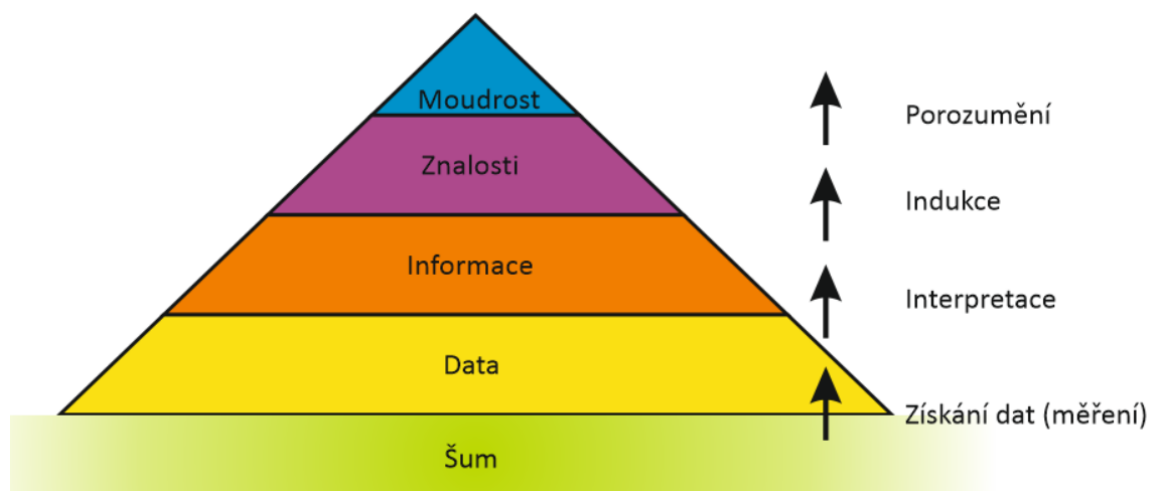
Obr. 4.45 Kompenzace polohových chyb a eliminace sil při uchopování a odkládání

Funkčnost APÚH je podmíněna úplným dosednutím přísavek na kontaktní rovinu objektu a zajištěním těsnosti. Ztráty podtlaku způsobené jednou přísavkou při jejím chybném dosednutí zpravidla způsobí nefunkčnost chapadla. Vazba manipulačního zařízení na flexibilní stroj (např. CNC řízené řezací stoly) vyžaduje vysokou míru flexibility chapadla. Tento požadavek splňují úchopné hlavice tvořené značným počtem přísavek malého průměru uspořádaných do čtvercové popř. obdélníkové matice s aplikací inteligentních ventilů.

## 5 Přehled, principy a úloha senzorů v robotice a automatických linkách

Tato část skript se věnuje rozdělení základních principů používaných senzorů v průmyslové praxi a představuje vybrané používané senzory v automatických linkách. Zvláštní pozornost je věnována obrazovým snímačům a jejich aplikaci v automatické výrobě. Text vychází z těchto publikací a podkladů: [64 – 71].

Senzory (snímače, čidla) jsou používány pro získání signálu, resp. dat (v obecnějším pojetí), která jsou následně interpretována v informace o stavu a průběhu činností v procesech. Tyto informace slouží k řízení, regulaci, sledování, kontrole, zajištění činnosti a bezpečnosti stroje, zařízení, výrobní linky nebo procesu. Postup získání a zpracování naměřených dat je zřejmý ze znalostní pyramidy na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Znalostní pyramida rozšířená o šum a procesy vedoucí k posunu o úroveň výše [71]

Získaná data z měření jsou často ve formě signálů odpovídajících fyzikálním veličinám, např. měřeným hodnotám ve sledovaném či ovládaném zařízení. Jednotky převádějící měřené hodnoty na elektrické signály jsou označovány jako měřicí čidla. Tato čidla jsou součástí senzorů a jejich výstupní signály jsou kalibrovány, tedy například převedeny na stupnici používanou pro popis daných vlastností.

Senzor může poskytovat jako výstup pouze analogový signál (nejčastěji elektrický), ale pro stroje a zařízení není většinou dále čitelný nebo přenositelný na jiný stroj (zařízení) a nemůže být snadno dále sdílený. Trendem dnešních snímačů je proto převod analogového signálu na digitální a následně na digitalizovaná data, která mohou být dále sdílena. Senzory mohou být dále připojeny do vyhodnocovací jednotky nebo ji dokonce mohou obsahovat a získaná data interpretují na informace.

Vlastnosti senzorů jsou ovlivněny sledovanou veličinou, a to elektrickou (proud, napětí, výkon, atd.) nebo neelektrickou (silou, teplotou, intenzitou záření, atd.). Senzory tak detekují svoje vlastnosti (změnu vlastností) a tyto vlastnosti jsou následně převedeny do škály dané fyzikální veličiny pro kvantifikaci (měření) vlastností sledovaného objektu. Jak vyplývá z definice, senzor detekuje své vlastnosti (změnu svých vlastností) a musí proto být nějakým fyzikálním principem propojen se

sledovaným (měřeným) objektem. V praxi toto propojení je častým zdrojem chyb a šumu v měření. Příkladem může být termočlánek, který není v dokonalém kontaktu s měřeným objektem.

Senzory obsahují měřící čidlo s elektronickým obvodem pro prvotní zpracování signálu a převádějí elektrické, mechanické, teplotní, optické a chemické veličiny na vhodné elektrické signály. Tento převod bývá většinou vícestupňový.

Senzory jsou rozděleny podle toho, chová-li se výstup senzoru jako zátěž s definovanými parametry nebo jako zdroj signálu. Rozlišujeme senzory:

- a) **Aktivní** (též generátorové), působením měřené veličiny se senzor chová jako zdroj energie (nejčastěji elektrické). Příkladem mohou být senzory pracující na principu převodu termoelektrickém, fotoelektrickém, piezoelektrickém, indukčním elektrochemickém (resp. chemicko-elektrickém) atd.
- b) **Pasivní**, působením měřené veličiny se mění některý z parametrů senzoru (často elektrická veličina, např. indukčnost, kapacita, odpor, impedance nebo optická veličina, např. změna barvy). Vlivem teploty se např. změní odpor fotorezistoru, vlivem akustického tlaku se mění kapacita kondenzátorového mikrofónu a vlivem tlaku se může změnit poloha železného jádra v cívice a tím její indukčnost. Pro další zpracování signálu pomocí elektronických obvodů je nutné veličinu dále transformovat na analogový napěťový nebo proudový signál, přičemž měřicí veličinou je amplituda, kmitočet, fáze aj. K vyhodnocení elektrických vlastností pasivních senzorů je vždy zapotřebí zdroj elektrické energie.

Další možné rozdělení senzorů je podle druhu snímané veličiny, nejčastějšími veličinami ve výrobních procesech jsou:

- tlak, síla, rychlost, zrychlení,
- poloha, hladina,
- teplota, množství odebraného tepla,
- otáčky, úhel,
- průtok, prošlé množství,
- ionizující záření,
- elektrické napětí, proud, odpor, vodivost,
- viskozita,
- hustota,
- pH,
- redox potenciál,
- vlhkost,
- a další.

Senzory lze dále dělit podle fyzického propojení s měřeným objektem/prostředím na:

- a) **Kontaktní**, které jsou v přímém kontaktu s měřeným objektem (např. termočlánek, kladkové snímače polohy, ...).



- b) **Bezkontaktní**, kde kontakt s měřeným objektem není, ale je třeba zajistit podmínky pro přechod měřeného fyzikálního pole od objektu k senzoru (např. pyrometr, triangulační snímače polohy, ...).

Rozdělení senzorů je možné také podle výstupního signálu na:

a) **Analogové:**

- jednohodnotové,
- dvouhodnotové (logické – ANO/NE),
- spojitě.

b) **Digitální:**

- dvouhodnotové – binární (logické),
- více úroňové (kvantované na určitý počet hladin, hodnotové parametry senzoru jsou uváděny v bitech).

Dělení senzorů může být také podle vstupní veličiny – druhu měřené veličiny:

- geometrických veličin (měření polohy, posunutí, atd.),
- mechanických veličin (měření rychlosti, akcelerace, síly, tlaku, průtoku, mechanického napětí),
- teplotních veličin (teplota, tepelný tok, atd.),
- elektrických a magnetických veličin,
- intenzity vyzařování (elektromagnetické, radiační veličiny ve viditelném, infračerveném a jiném spektru, zvukové, atd.),
- chemických veličin (koncentrace iontů, atd.),
- biologických veličin (koncentrace enzymů, atd.).

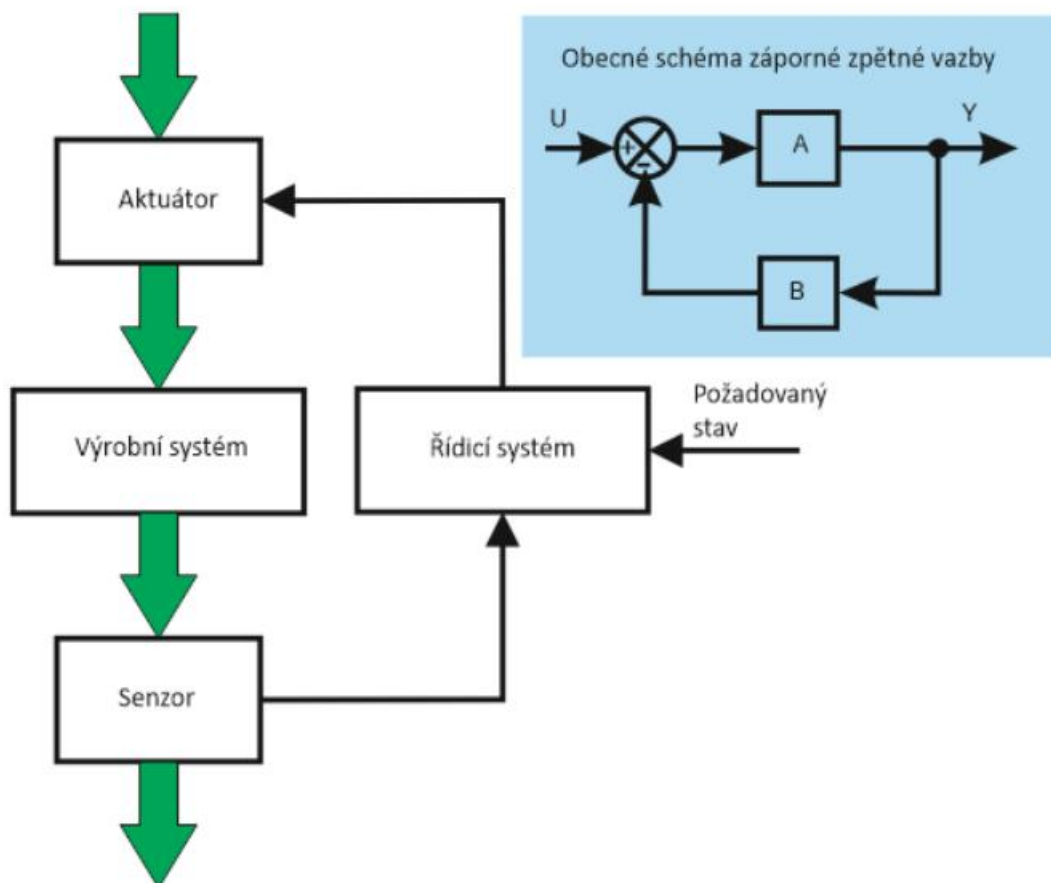
## 5.1 Funkce a charakteristiky senzorů

Senzory mají obecně tyto parametry, které je třeba znát při jejich výběru:

- rozlišení, měřicí rozsah, přesnost,
- citlivost, stabilita, linearita, doba odezvy, hystereze,
- selektivita,
- výstupní formát dat, případně formát vstupu pro ovládání senzoru,
- stav okolního prostředí pro správnou funkci senzoru,
- vliv okolního prostředí na fungování senzoru a vliv senzoru na okolní prostředí,
- životnost, hranice přetížení a zničení,
- spolehlivost,
- velikost, hmotnost,
- komfort obsluhy,
- zajištění servisu,

- cena,
- další.

Senzory jsou často používány pro řízení technologických a výrobních operací. Vedle informací o stavu systému jsou často používány v regulační technice pro udržení stálých parametrů řízených systémů. K tomuto účelu je používána záporná zpětná vazba (Obr. 5.2), která v případě výskytu výchylky od ustáleného stavu dokáže působit proti této výchylce a potlačit ji. Uvedený princip zpětnovazebného řízení je základem současné automatizace. Je nedílnou součástí automatů, robotů a obecně strojů a zařízení v průmyslové praxi.



Obr. 5.2 Zpětnovazební princip řízení výrobního procesu, záporná zpětná vazba

Senzory používané v robotech jsou zaměřeny především na zjištění stavu uvnitř robotu a vně. Často také používají zpětné vazby při interakci s objekty ve svém okolí. Snímače tak mohou být rozděleny na:

- 1) Snímače vnitřní informace, slouží ke sledování činnosti samotného robotu a poskytují data pro získání následné informace o:
  - poloze, posunutí, natočení,
  - rychlosti, síle, momentu,
  - funkčních parametrech pohonu.

2) Snímače vnější informace, slouží k zachycení a monitorování stavu okolí robotu a interakci robotu s tímto okolím, poskytují data pro získání následné informace o:

- poloze robotu v daném prostoru se souřadným systémem,
- poloze efektoru vůči objektu v prostoru,
- tvaru, rozměrech, poloze, charakteru a stavu objektů v prostoru kolem robotu.

V následujícím textu jsou uvedeny oblasti senzorů, které jsou používány v průmyslové praxi s důrazem na použití snímačů v robotice. Výběr není úplný a lze se setkat s dalšími typy senzorů. Popis také není kompletní a čtenáři lze odkázat na odbornou literaturu. V této části bylo čerpáno ze skript [67] a podkladů [53].

## 5.2 Senzory polohy a posunutí

Senzory umožňují stanovení polohy sledovaného objektu v prostoru vzhledem k referenčnímu bodu nebo v daném souřadnicovém systému. Informace o poloze (posunutí) je důležitá při následném uchopení, obrábění, změně stavu daného objektu, atd. Existuje široká škála těchto snímačů a vedle rozdělení na bezdotykové a dotykové, analogové a digitální, je možné je také rozdělit na dvoupolohové (dvouhodnotové, např. objekt před snímačem přítomen/nepřítomen) nebo spojitě.

Následující rozdělení je podle použitých fyzikálních veličin. Ke stanovení polohy se používají senzory:

1) Elektrické:

- kontaktní,
- indukční,
- kapacitní,
- resolvers,
- indukční,
- magnetické,
- odporové,
- lankové.

2) Ultrazvukové.

3) Tekutinové.

4) Optoelektrické.

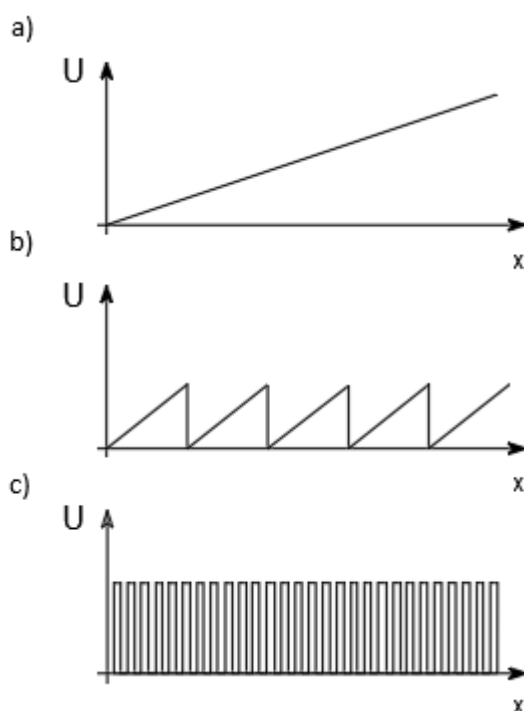
### 5.2.1 Senzory pro spojitě snímání polohy pro servomotory

U PR, servisních robotů, manipulátorů a obecně v automatizaci se často uplatňuje dráhové řízení, které vyžaduje spojitě snímání polohy. To je nutné pro zajištění skutečných hodnot polohy v polohových zpětných vazbách. Jak je zřejmé, jedná se o velmi důležité senzory pro automatizaci, a proto je v této kapitole uveden jejich princip s odkazy na fyzikální principy uvedené dále.

Tyto senzory je možné dělit podle několika hledisek:

1) Podle charakteru měřené veličiny:

- rotační,
  - posuvné (lineární).
- 2) Podle místa odměřování:
- přímé – např. snímač umístěn přímo na hřídeli motoru,
  - nepřímé – např. snímač umístěn na pohybové ose za převodovkou.
- 3) Podle charakteru měřené hodnoty:
- absolutní – každé poloze v celém měřicím rozsahu je jednoznačně přiřazen signál (Obr. 5.3 a),
  - cyklicky absolutní – čidlo je absolutní v rozsahu určitého intervalu (např. jedné otáčky), navíc se musí sčítat počet intervalů (Obr. 5.3 b),
  - vícestupňové absolutní – několik spřažených cyklicky absolutních čidel s různým intervalem,
  - inkrementální – dráha se odměřuje sčítáním elementárních přírůstků (inkrementů, např. 0,01 mm), kde každému inkrementu, odpovídá impulz (nejčastěji elektrický) určitého znaménka podle smyslu pohybu (Obr. 5.3 c).



Obr. 5.3 Snímání polohy, napětí  $U$  je přiřazena vzdálenost  $x$ : a – absolutní; b – cyklicky absolutní, c – inkrementální

- 4) Podle fyzikálního principu:
- odporové snímání (kap. 5.2.6) – snímání pomocí potenciometrů současným požadavkům většinou nevyhovuje z důvodu opotřebení potenciometrů, přechodových odporů, skokové změny napětí při přechodu ze závit na závit u drátkových potenciometrů, ...
  - induktivní princip – z hlediska aplikace v automatizační technice jde především o resolversy (kap. 5.2.7) a indukotosyny (kap. 5.2.8),

- fotoelektrický princip – u PR robotů jsou v současné době nejčastěji používána inkrementální optická čidla polohy (kap. 5.2.12.2), pro speciální aplikace i absolutní fotoelektrická čidla (odměřovací a kontrolní roboty, kap. 5.2.12.3).

### 5.2.2 Kontaktní mechanické senzory

Kontaktní mechanické senzory jsou nejčastěji založeny na sepnutí elektrického obvodu na základě mechanického kontaktu se sledovaným objektem (výrobek, část robotu nebo výrobního zařízení, prvky technologické scény, ...). Řešeny jsou nejčastěji jako jednopólové přepínače. Hystereze je u nich zajištěna mechanickým uspořádáním a pružinou, která může být uvnitř anebo vnější přes páčku nebo kladku, Obr. 5.4. Snímače se liší provedením, velikostí, spínacím proudem, stupněm krytí IP (tj. odolnosti proti prašnosti a vlhkosti) a způsobem mechanického přenosu ovládací síly na kontakt. Jejich výhodou je jednoduchost a cena. Nevýhodou je omezená životnost z hlediska počtu sepnutí, závislost funkční spolehlivosti na nastavení snímače proti dorazu a kvality této mechanické vazby.



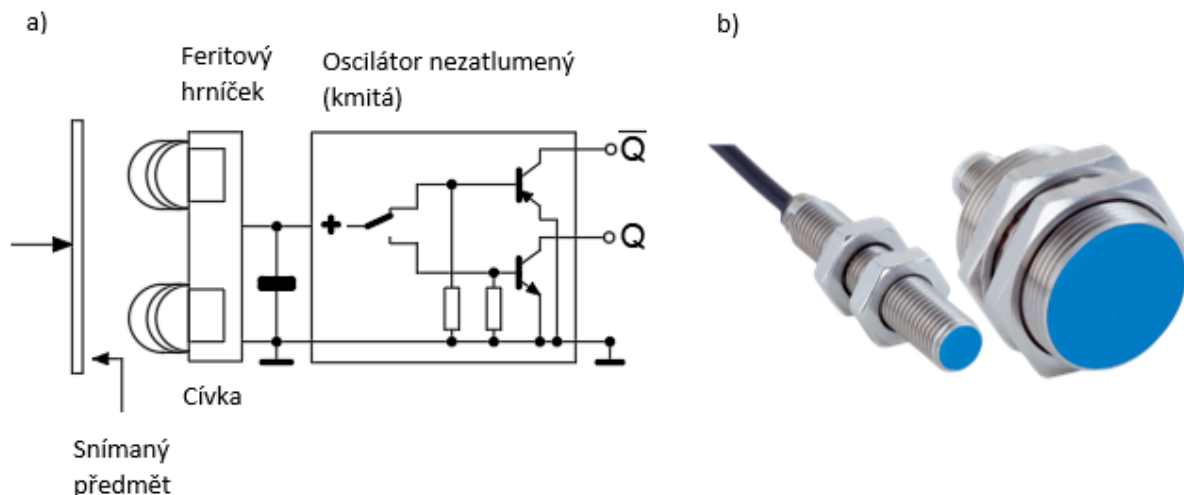
Obr. 5.4 Koncový Spínač Panasonic AM1303F 250 V/AC 10 A, zdroj: <https://www3.panasonic.biz>

### 5.2.3 Indukční senzory

Průmyslové indukční senzory přiblížení umožňují bezkontaktně detekovat, příp. měřit, přiblížení elektricky vodivých předmětů na vzdálenosti až desítek mm. Jejich hlavní výhodou je možnost bezchybně dlouhodobě pracovat v prašném nebo jinak znečištěném průmyslovém prostředí (olej, voda, vlhkost, elektromagnetické rušení, teplota). Indukční senzory přiblížení fungují na základě změny indukčnosti cívky při změně magnetické vodivosti jejího obvodu a následné změny kvality rezonančního obvodu.

Základ snímače tvoří oscilátor pracující na principu změny činitele jakosti jádra při přiblížení kovového materiálu. Oscilátor je tvořen cívkou doplněnou kondenzátorem na paralelní rezonanční obvod. Vysokofrekvenční střídavý proud, generovaný oscilátorem, protéká cívkou a vytváří magnetické pole, které vystupuje z otevřené strany hrníčku, což je aktivní plocha senzoru, Obr. 5.5 a. Jestliže se nachází v blízkosti této aktivní plochy nějaký předmět z elektricky vodivého materiálu (tlumící clonka), dojde k deformaci magnetického pole. V clonce (konstrukční ocel) se indukují vířivé proudy. Ty způsobí změnu magnetického pole, které působí vlivem vzájemné indukčnosti zpátky na

cívku tak, že změní svoji impedanci. Změna se projeví útlumem kmitů oscilátoru a oscilátor přestane kmitat. Vysazení kmitů oscilátoru vyhodnotí prahový detektor, který řídí klopný obvod ovládající výkonový koncový stupeň. Odstraněním kovového materiálu z aktivní spínací zóny oscilátor obnoví kmitu. Podle toho o jaký druh spínače jde (spínací nebo rozpínací), se výstup spojí nebo rozpojí při přiblížení kovového materiálu do aktivní zóny snímače. Příklad sensorů je na Obr. 5.5 b.



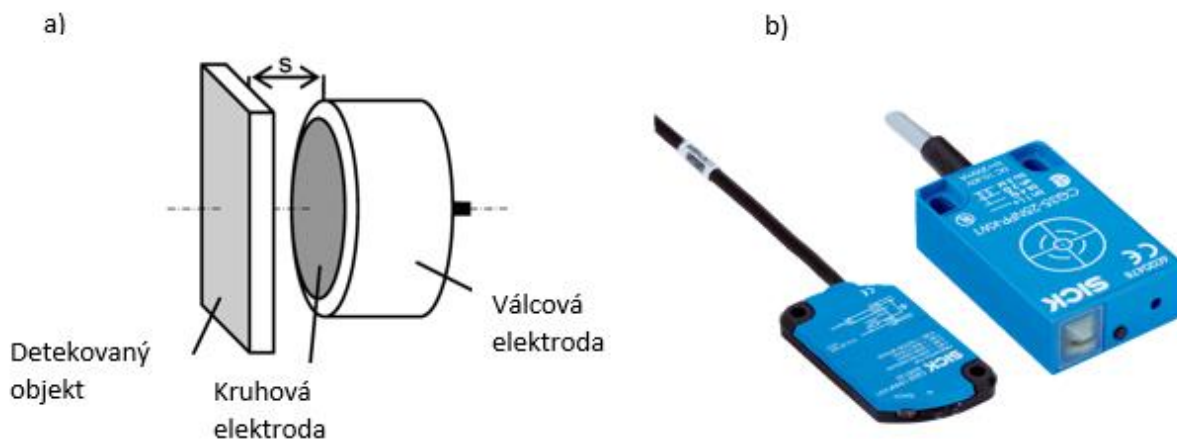
Obr. 5.5 Indukční sensor: a) schéma senzoru; b) příklad indukčních sensorů firmy SICK, zdroj: <https://www.sick.com/cz/cs/detekcni-snimace/indukcni-snimace/c/q190731>

## 5.2.4 Kapacitní senzory

Kapacitní senzory přiblížení umožňují stejně jako snímače indukční bezkontaktně detekovat, příp. měřit, přiblížení předmětů na vzdálenost až několika desítek mm. Jejich hlavní výhodou je možnost detekovat prakticky libovolný materiál a montážní provedení bude obvykle shodné s indukčními snímači.

Kapacitní snímače obsahují, podobně jako indukční senzory, oscilátor, který zde však nepracuje nepřetržitě. Hlavním aktivním prvkem kapacitního senzoru je kotoučová elektroda uvnitř válcového pouzdra, které působí i jako stínění, Obr. 5.6 a. Vytvářejí tak kondenzátor, který má základní kapacitu, která se pak dále mění se změnou dielektrika – přiblížení detekovaného objektu. Jestliže se k senzoru blíží objekt, změní se dielektrická konstanta kondenzátoru a obvod oscilátoru začne kmitat. Díky tomu pracuje kapacitní sensor právě opačně než indukční přibližovací spínač, u kterého jsou oscilace přiblížením cílového objektu tlumeny.

Kapacitní snímač je pak doplněn rezistorem, s kterým je součástí oscilátoru. Ten je tedy rozladován právě změnou kapacity aktivního senzoru. Výstupní napěťový signál oscilátoru je usměrněn a filtrován pro získání stejnosměrné složky. Ta je poté porovnávána v komparátoru s referencí a logický výstup již řídí výstupní výkonový spínací stupeň. Tento typ sensorů je obecně méně odolný proti vlhkosti a prašnosti než indukční. Příklad sensorů je na Obr. 5.6 b.



Obr. 5.6 Kapacitní senzor: a – schéma senzoru; b – příklad kapacitních senzorů firmy SICK, zdroj: <https://www.sick.com/cz/cs/detekcni-snimace/kapacitni-snimace/c/q201659>

### 5.2.5 Magnetické senzory

Magnetické senzory patří mezi základní průmyslové senzory polohy, přesněji přiblížení. Častá je aplikace senzorů pro detekci polohy válce v pneumatických obvodech, kap. 3.2.37. Magnetické senzory jsou obecně používány k bezdotykové detekci poloh v řídicí technice. Oproti indukčním senzorům mají delší spínací vzdálenosti při stejných nebo i menších rozměrech. Další výhodou je, že magnetické pole prochází všemi nemagnetickými materiály, a tak mohou tyto senzory rozpoznávat magnety, které jsou umístěny např. za stěnami z barevných kovů, austenitické nerezové oceli, hliníku, plastů nebo dřeva. Pod obecným označením "magnetický senzor" se skrývá hned několik možných provedení vykazujících zcela odlišný systém funkce a tím i odlišné některé provozní vlastnosti:

- Magneto-mechanický Reedův senzor (již historický)
- Senzory s nasycovaným jádrem cívky = magnetoindukční
- Senzory s Hallovou sondou
- Magnetorezistivní sondy

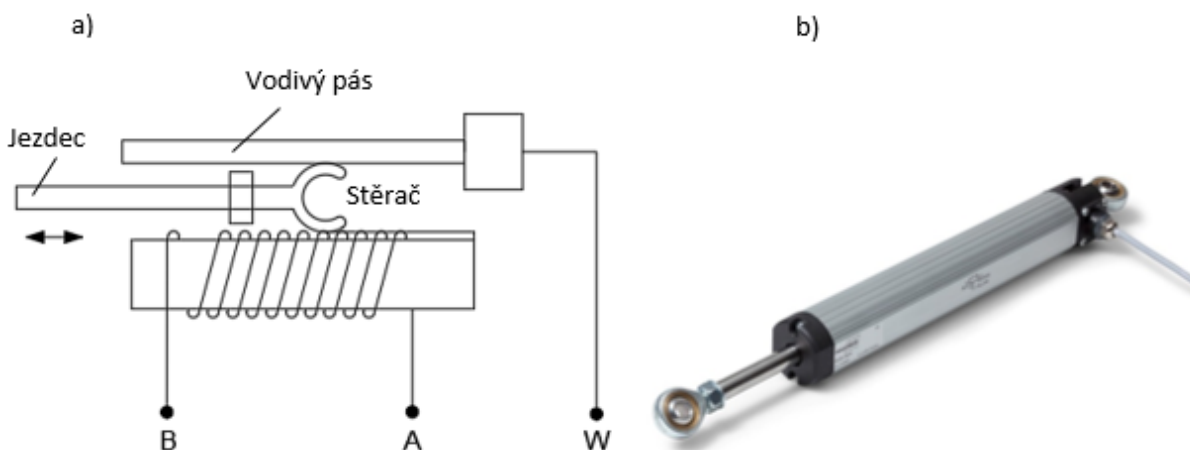
Příklad senzorů je na Obr. 5.7.



Obr. 5.7 Příklad magnetických senzorů firmy SICK, zdroj: <https://www.sick.com/cz/cs/detekcni-snimace/magneticke-snimace/mq/c/q208726>

### 5.2.6 Odporové senzory

Odporové senzory pracují na principu proměnného odporu, kde se jezdec pohybuje po odporové dráze (Obr. 5.8 a), po které je poháněn mechanickou veličinou (jedná se tak o potenciometr). Napětí odebírané z jezdcce proti jednomu z konců potenciometru je tak závislé na poloze jezdcce. Odporová dráha může být tvořena navinutým drátem na izolantu, kovovou vrstvou, cermetem (kov + keramika), elektrolytem a také vrstvou z jakostního vodivého plastu (praktická přesnost až 0,01 mm a rychlost posuvu až  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Příklad senzoru je na Obr. 5.8 b.

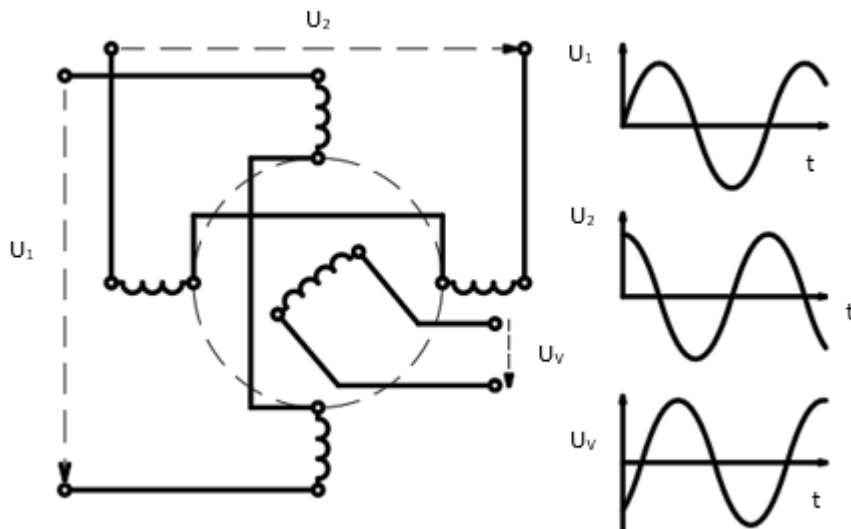


Obr. 5.8 Odporový senzor polohy: a – schéma senzoru; b – příklad odporového senzoru firmy Megatron, zdroj: <https://www.megatron.cz/linearni-snimace-polohy>

### 5.2.7 Resolvery

Resolver (fázový rozkladač), ve své podstatě se jedná o rotační polohový transformátor měřící úhel natočení, který je cyklicky absolutní v rozsahu jedné otáčky (Obr. 5.3 b). Resolver má vinutí na rotoru a dvě vinutí na statoru, Obr. 5.9. Statorová vinutí ( $U_1$  a  $U_2$ ) jsou vzájemně prostorově pootočená o  $90^\circ$ . Rotorové vinutí je napájeno ze zdroje sinusového napětí ( $U_V$ ) s frekvencí řádů jednotek kHz. Se změnou úhlu natočení rotoru vůči statoru ( $\varphi$ ) se sinusově mění i jejich vzájemná indukčnost a tedy i velikost indukovaných napětí z rotoru do obou statorových vinutí. Vzhledem ke vzájemnému posuvu statorových vinutí jsou vůči sobě posunuta i indukovaná napětí. To znamená, je-li do jednoho ze statorových vinutí indukováno napětí s maximální efektivní hodnotou (je-li tedy vzájemná indukčnost mezi tímto vinutím a rotorovým vinutím maximální), je indukované napětí ve druhém statorovém vinutí nulové díky nulové vzájemné indukčnosti mezi tímto vinutím a rotorovým vinutím. Vyhodnocování úhlu natočení resolveru se realizuje na principu vzorkování výstupních napětí resolveru, které je synchronizováno s budícím signálem resolveru. Vzorkované hodnoty závisí pouze na velikosti vzájemné indukčnosti statoru vůči rotoru, tj. na úhlu natočení [67]. Synchronizační signál, který spouští měření A/D převodníku, je vytvořen z průběhu budícího napětí rotoru pomocí komparátoru.





Obr. 5.9 Schéma zapojení resolveru, zdroj: [67]

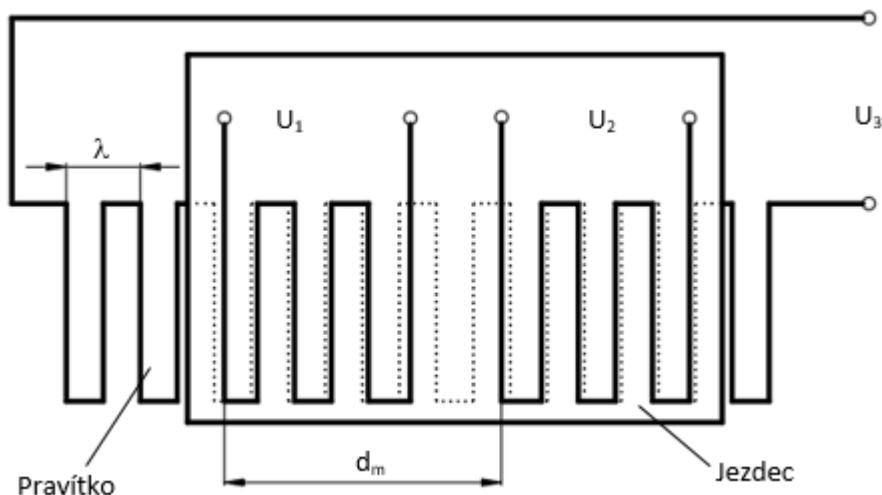
Používáno je především bezkartáčové provedení resolverů, které má vysokou spolehlivost spolu s cyklicky absolutním snímáním (je eliminováno riziko ztráty impulzu), jednoduchou vazbu na výpočetní techniku a samotný resolver neobsahuje žádnou elektroniku. (Napětí  $U_v$  je pak získáváno přes rotační transformátor.) Resolver je výhodný pro aplikace v elektrických servopohonech s BLDC motory (kap. 3.3.3), Obr. 5.10. Zde slouží k odměřování polohy rotoru pro elektronickou komutaci a také pro přesné snímání polohy (s chybou menší než  $\pm 5'$ , podle [72]) a úhlové rychlosti (snímání otáček, kap. 5.3).



Obr. 5.10 Ukázka reálného resolveru firmy LTN servotechnik GmbH, zdroj: [72]

### 5.2.8 Induktosyny

Induktosyny pracují na stejném principu jako resolvery, liší se moderní konstrukcí vinutí, možností kruhového i lineárního provedení a vyšší přesností odměřování. Opět se jedná o polohový transformátor, v tomto případě plošné konstrukce. Princip lineárního provedení je uveden na Obr. 5.11 a skládá se z pevné části (pravitka) a pohyblivé snímací části (jezdce).



Obr. 5.11 Princip induktošny

Jezdec obsahuje dvě vinutí, která jsou vzájemně posunuta o  $\frac{1}{4}$  jednotkové rozteče – jde o obdobu posunutí cívek statoru resolveru o  $90^\circ$ . Pro vzdálenost počátečních meandrů obou cívek platí:

$$d_m = \lambda \left( n_z + \frac{1}{4} \right) \quad (5.1)$$

kde  $\lambda$  je jednotkový krok a  
 $n_z$  je libovolné celé číslo 0, 1, 2, ...

Obdélníkové vinutí jezdcce má shodné parametry s vinutím pravítka, mezi oběma vinutími je nutné dodržet konstantní mezeru v celém rozsahu měření (mezera okolo 0,25 mm). Jednotkový krok u metrického induktošny bývá 2 mm a chyba měření je  $\pm 1 \mu\text{m}$ . Vinutí jezdcce je napájeno sinusovým a kosinusovým signálem, který vytváří v mezeře mezi měřítkem a jezdcem homogenní elektromagnetické pole. Do vinutí měřítka se pak indukuje napětí, jehož okamžitá amplituda nese informaci o poloze jezdcce vůči měřítku. Pro spojitě měření v rámci jednoho kroku se užívá měřič fáze, pro počítání celých kroků čítač.

Rotační induktošny se skládají z dvojice soustředného uložení kotoučů, kdy na jednom kotouči je dvojice vinutí s posunutím vinutí o  $\frac{1}{4}$  rozteče. Výhodou je oproti posuvnému provedení možnost většího počtu meandrů na straně napájení v rozsahu celého obvodu kruhu, neboť snímač není ovlivňován teplotními dilatacemi. Oproti resolverům je možné dosáhnout vyšších přesností, a to i pod  $1'$ .

### 5.2.9 Lankové senzory

Lankové senzory měří lineární pohyb použitím vysoce flexibilního ocelového lanka. Lineární pohyb vzniklý pohybem měřeného objektu je převáděn na pohyb rotační navíjení na bubínek a následně pak potenciometrem nebo endkodérem převeden na výstupní signál. Jednoznačnou výhodou lankových sensorů je, že lanko může být odkloněno přes vratnou kladku. Tato vlastnost

rozlišuje lankové senzory od ostatních měřících principů, které normálně měří pouze v jedné ose. Používají se běžně k měření vzdáleností od 50 do 50.000 mm. Příklad senzorů je na Obr. 5.12.



Obr. 5.12 Příklad lankových senzorů firmy Micro-Epsilon, zdroj: <https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/draw-wire-sensor/>

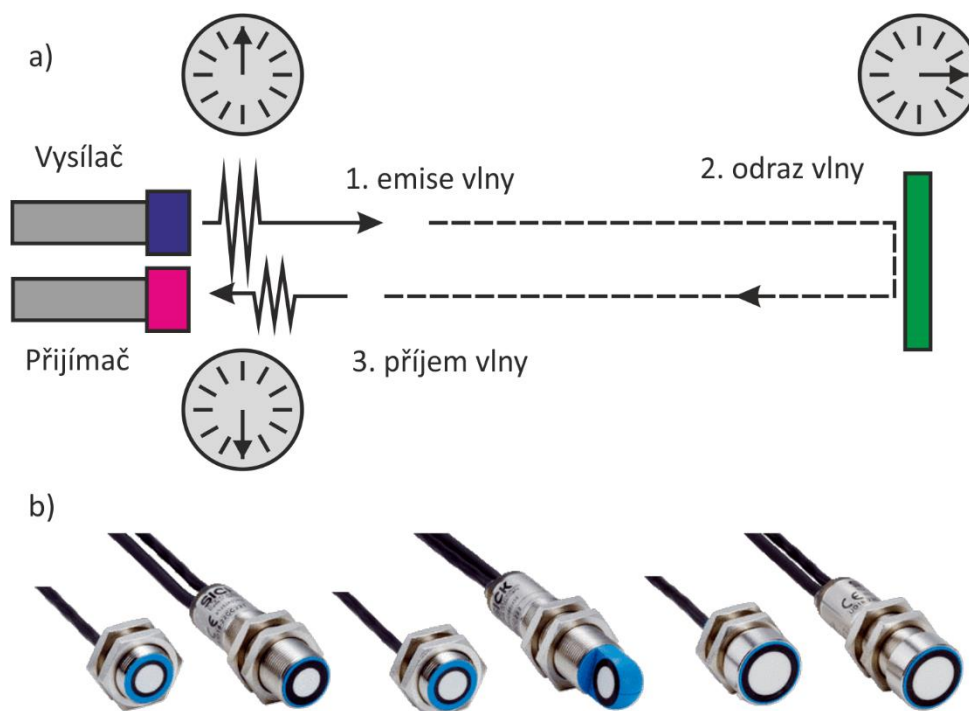
### 5.2.10 Ultrazvukové senzory

Ultrazvukové senzory vzdálenosti jsou založeny na principu time-of-flight, tedy na měření času, za který se vyslaný signál vrátí zpět do vysílače. Jako vysílače a přijímače ultrazvuku se nejčastěji používají piezoelektrické, méně často magnetostrikční, měniče. Piezoelektrický měnič se využívá v první fázi jako vysílač ultrazvukových impulzů a v druhé fázi pak jako detektor přijímané odražené ultrazvukové vlny. Pracuje se s ultrazvukem s frekvencí od 20 do 60 kHz.

Ultrazvukový vysílač je na krátkou dobu vybuzen kmitočtem, ideálně jen po dobu několika pulzů tohoto kmitočtu. Vzniklý ultrazvukový pulz se následně odráží od všech předmětů v okolí, které mají hustotu větší než vzduch, a jako část emitovaných pulzů se vrací zpět do přijímače. Čas, který uplyne mezi vysláním a příjmem, lze snadno převést na vzdálenost s pomocí známé rychlosti šíření zvuku v daném prostředí. Rychlost šíření zvukových vln ve vzduchu se liší v závislosti na teplotě prostředí, tlaku, vlhkosti či nadmořské výšce. Při pokojové teplotě (20 °C) může být jako výchozí hodnota používána konstanta  $343 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [71,73].

U těchto typů senzorů je upřednostňován kolmý kontakt s povrchem, kdy impulzy nejsou vychýleny a putují zpět, přímo k přijímači. Pokud se úhel dopadu na povrch zvětší, sníží se podíl energie pulzů odražených zpět do přijímače. Při dosažení limitní hodnoty úhlu již signál není zachycen. Pro mechanické vlnění platí stejné zákony odrazu a lomu jako pro elektromagnetické záření.

Ultrazvukové senzory jsou vhodné i pro snímání vzdálenosti od objektů z transparentních nebo lesklých materiálů. Problémem může být nutnost, aby povrch nebyl příliš odkloněn od normály měření. Příklad senzorů je na Obr. 5.13.



Obr. 5.13 Ultrazvukový senzor polohy: a – princip snímače; b – příklad ultrazvukových senzorů vzdálenosti firmy SICK, zdroj: <https://www.sick.com/cz/cs/snimace-mereni-vzdalenosti/ultrazvukove-snimace/c/q185671>

### 5.2.11 Tekutinové senzory

Tekutinové senzory pro odměřování vzdálenosti fungují na základě změny tlaku v trysce nad měřeným objektem. Podstatou funkce je převod tlaku na délkovou veličinu. Převodník je napájen vzduchem o tlaku 0,6 až 1 MPa, obvykle z běžného rozvodu vzduchu. Pomocí přesného redukčního ventilu je tlak stabilizován na 150 kPa a vzduch následně proudí stavitelnou tryskou do vlastního vzduchového měřidla. Mezi tryskou a vzduchovým měřidlem je paralelně vřazen snímač převádějící tlak na elektrický signál, který je následně pomocí A/D převodníku převeden a vyhodnocován měřícím programem v počítači. Charakteristika tlak – vzdálenost trysky od měřeného povrchu je v rozsahu 0,1 mm lineární. Přesnost měření je obvykle 1 % z měřeného rozsahu nebo 0,001mm. Vzduchová měřidla jsou poměrová, obvykle se před měřením kalibrují pomocí 2 etalonů, pomocí kterých se vytvoří převodní charakteristika. Nejmenší rozsah měření není u pneumatických měřidel prakticky omezen, reálně se však vzduchová měřidla používají pro měření v řádu mikrometrů. Problematictější bývá měření v pásmu větších rozsahů, kdy při měření v rozsahu větším než 0,3 mm dochází ke zhoršení linearit [74].

### 5.2.12 Optické senzory

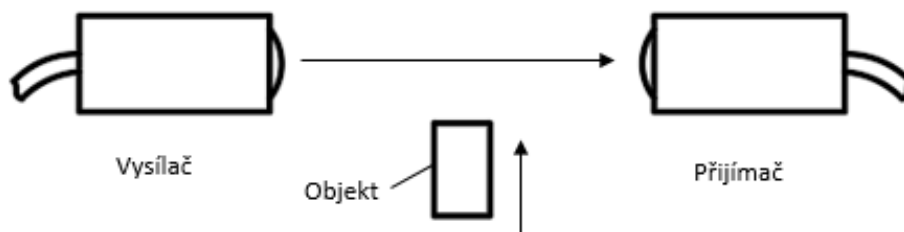
Principu detekce optického (nejčastěji viditelného, případně blízkého infračerveného nebo ultrafialového) elektromagnetického záření funguje celá škála senzorů různého provedení, využití a přesností [75]. Rozdělit je lze následujícím způsobem:

- optoelektrické senzory (světelné závory),
- inkrementální fotoelektrické senzory polohy,
- triangulační snímače vzdálenosti,
- konfokální chromatické snímače,
- snímače obrazu (kap. 5.7).

### 5.2.12.1 Optoelektrické senzory

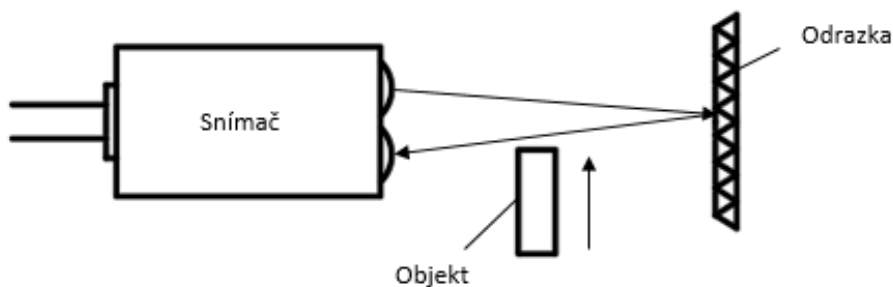
Tyto senzory bezdotykově indikují celou řadu kovových i nekovových materiálů včetně skla, keramiky, papíru, kapalin. Lze je také aplikovat i na třídění materiálů s různým indexem lomu, respektive s různou pohltivostí světla. Jejich největší výhodou je velký snímací rozsah, který v případě optických závor s laserovými diodami může přesahovat i 45 m. Podle konstrukce je možné se setkat se třemi typy.

**Jednocestná světelná závora** (optoelektrické senzory separátní) má oddělený zdroj světla (vysílače) a snímač světla (přijímač). Indikátor je objekt vložený do dráhy světelného paprsku a způsobuje jeho přerušení, Obr. 5.14.



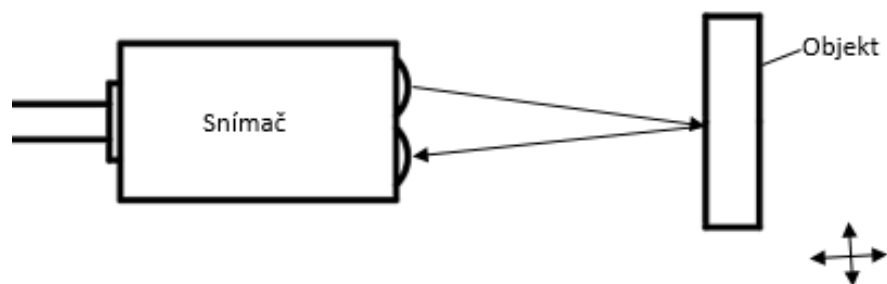
Obr. 5.14 Jednocestná světelná závora

**Reflexní světelná závora** (retroreflexní) má zdroj světla i přijímač instalován v jednom pouzdrů, ze kterého je vyslán paprsek, odrážející se od odrazky a vyhodnocován přijímačem. Pokud je paprsek přerušen objektem vloženým do dráhy, je tato změna registrována, Obr. 5.15.



Obr. 5.15 Reflexní světelná závora

**Reflexní světelný senzor** (difúzní) je založen na odrazu paprsku emitovaného z vysílače přímo od indikovaného objektu, který je vyhodnocen přijímačem, Obr. 5.16.



Obr. 5.16 Reflexní světelný senzor

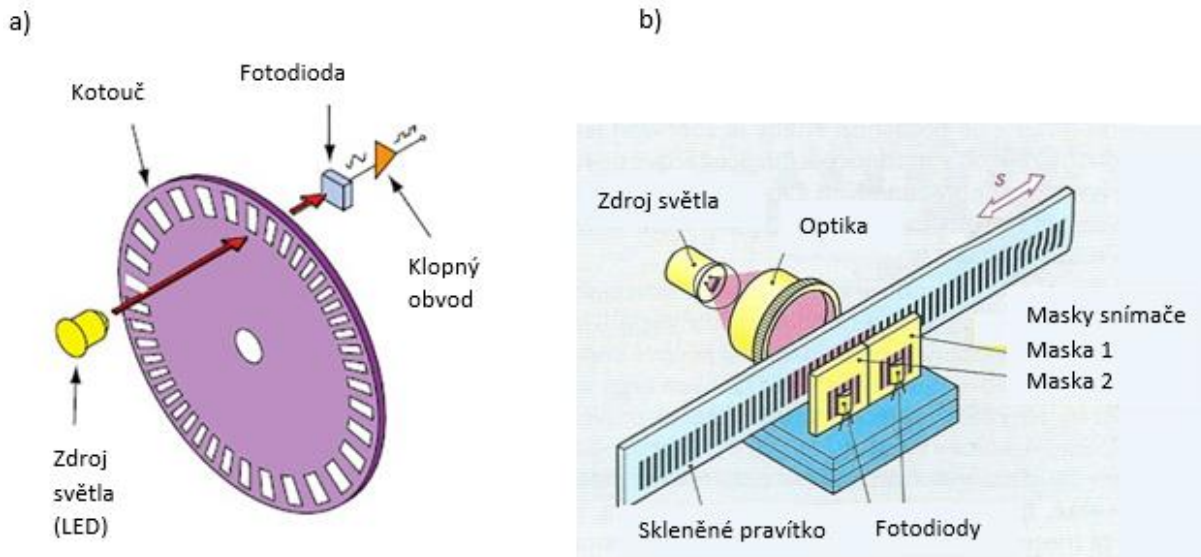
Všechny typy optoelektrických snímačů jsou založeny na emisi infračerveného záblesku fotodiody, který následně dopadá na fototranzistor.

### 5.2.12.2 Inkrementální fotoelektrické senzory polohy

Inkrementální (přírůstkové) senzory polohy se velmi často aplikují u servořízených robotů a CNC obráběcích strojů. Převážně se aplikuje fotoelektrický princip snímání, jehož hlavní výhodou je možnost přímého zpracování digitalizované informace. Vyrábějí se senzory pro lineární odměřování i senzory rotační.

Jejich základní částí je měřítko (jezdec) nebo kotouč (rotor) opatřený světlými a tmavými proužky v pravidelných roztečích  $\Delta s = \lambda$  (tzv. jednotkový krok), přičemž každá poloha je dána určitým počtem jednotlivých kroků (dráhových přírůstků) z polohy předcházející. Tento způsob je tedy přírůstkový – inkrementální. Při měření polohy ukazuje čítač hodnotu vztaženou ke zvolenému počátku, takže při pohybu v jednom směru jsou impulzy čítačem přičítány, v opačném směru odčítány.

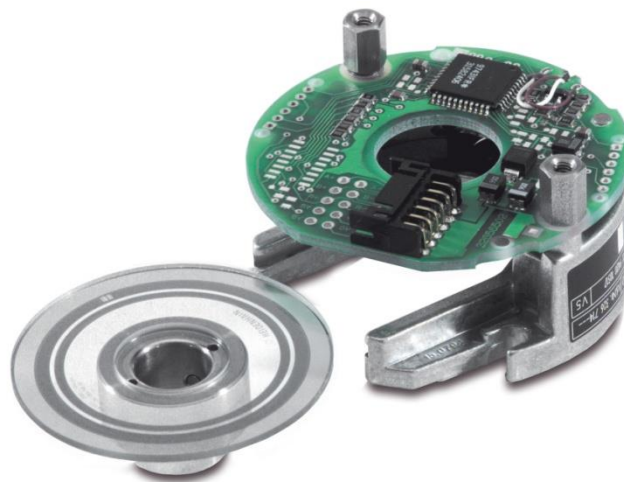
Elektrické impulzy jsou generovány optoelektrickým prvkem podle toho, zda mezi zdrojem světla a optickým prvkem (např. fototranzistorem nebo fotodiodou) je průsvitný či neprůsvitný proužek clonky (měřítko nebo kotouče). Při pohybu clonky, který je odvozen od pohybu dílu nebo součástky, dochází ke střídavému průchodu světla přes průsvitné proužky. Dochází k postupnému osvětlení a následnému zastínění světlocitlivé plošky fototranzistoru, který v rytmu změny mění svůj vnitřní odpor. Tyto změny se projevují jako změny proudu tranzistorem i změnou napětí mezi jeho kolektorem a emitorem. Proto při průchodu jednoho pruhu před paprskem záření vznikne jeden elektrický impulz, příklad pro oba způsoby odměřování je na Obr. 5.17.



Obr. 5.17 Princip inkrementálního fotoelektrického senzoru polohy: a – rotační; b – lineární

Detekce směru otáčení vyžaduje použití dvou snímačů, které jsou vůči sobě posunuty. Pro počítání počtu otáček lze použít další snímač s jedním okénkem na disku. Pro zvýšení přesnosti až o dva řády se používá tzv. nonius, který se skládá z pohyblivé stupnice (kódového kotouče) a statické stupnice (snímací mřížky).

Ukázka reálného provedení s rozlišením až 37 500 inkrementů/otáčku s předností +/- 6'' je na Obr. 5.18

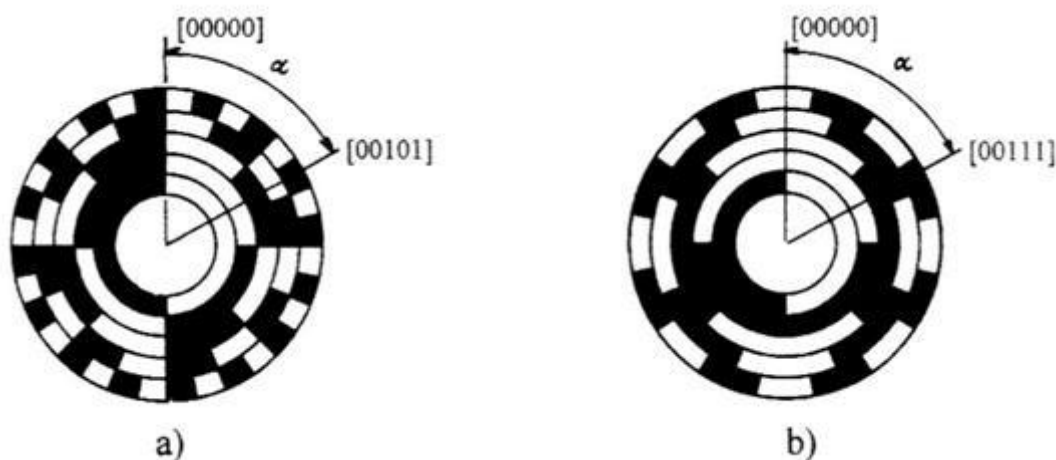


Obr. 5.18 Reálné provedení rotačního inkrementálního senzoru HEIDENHAIN ERO 1200/1400, zdroj: <https://www.heidenhain.us/resources-and-news/heidenhains-ero-miniature-modular-encoders-suited-for-many-motion-control-applications/>

### 5.2.12.3 Cyklicky absolutní fotoelektrické senzory polohy

Princip, provedení i vzhled cyklicky absolutních rotačních senzorů polohy je podobný výše uvedeným inkrementálním snímačům. Rozdíl spočívá zejména v tom, že kotouč spojený se hřídelí má jiné dělení – je uspořádán do několika sousých mezikruží, která jsou dělena na průhledné a neprůhledné proužky podle použitého kódu (obvykle jsou kódy binární a zejména Grayův, Obr. 5.19). Senzor má pro každé kódové mezikruží jeden optický snímač (IR diodu a fototranzistor/fotodiodu). Počet těchto snímačů určuje řád binárního čísla a tedy i přesnost odečítaného úhlu. Optosnímače jsou umístěny v řadě radiálně.

Grayův kód bývá užíván častěji, neboť jeho struktura zajišťuje při pootočení v ose (resp. posunutí v řadě) snímačů změnu vždy jen jednoho bitu odečítání a lze tedy snadněji odhalit chybu odečtu.

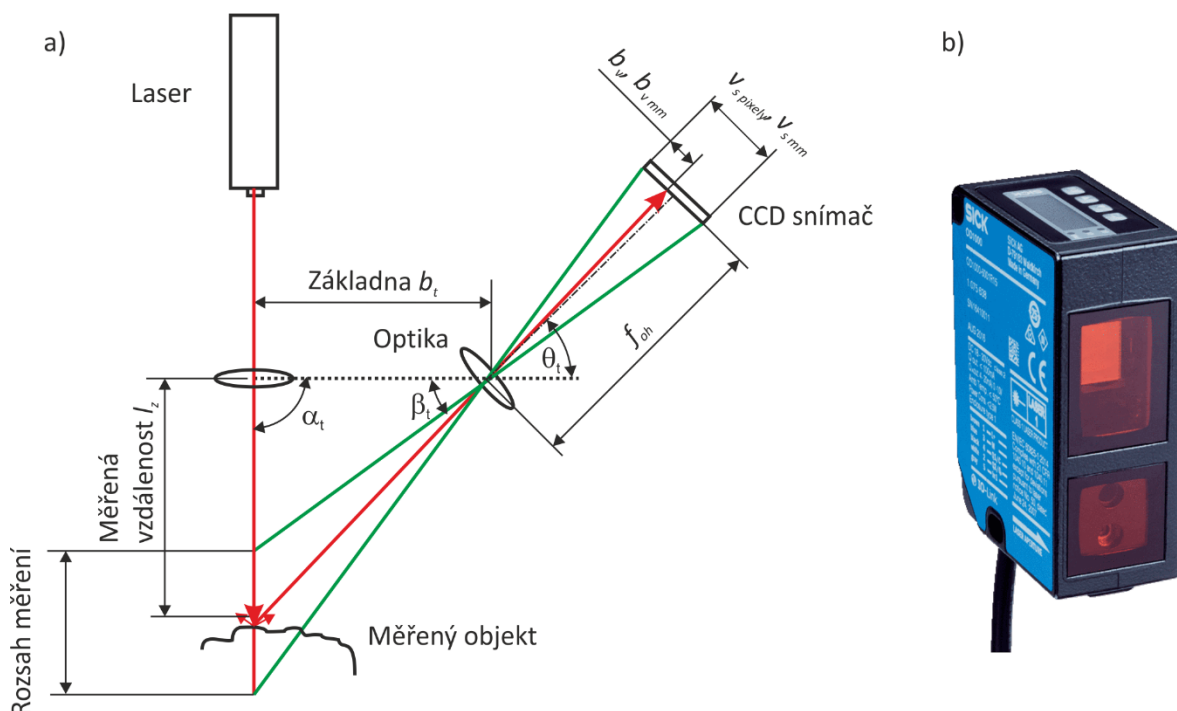


Obr. 5.19 Kódové kotouče pro absolutní odměřování polohy v 5 bitovém provedení: a – binární kód; b – Grayův kód

### 5.2.12.4 Triangulační snímače vzdálenosti

Triangulační senzory vzdálenosti (někdy nazývané optické reflexní senzory) využívají principu 1D triangulace pomocí bodového laserového triangulačního snímače [71] a patří mezi nejpoužívanější snímače v průmyslové praxi pro spojitě odměřování vzdálenosti. Princip triangulace je uveden na Obr. 5.20. Zdroj světla (bodový laserový paprsek) spolu se snímačem a osvětleným bodem na zkoumaném objektu tvoří takzvaný triangulační trojúhelník. Spojnice mezi světelným zdrojem a snímačem je základnou, která je také nazývána triangulační bází  $b_t$ . Na straně světelného zdroje je úhel svíraný triangulační bází konstantní ( $\alpha_t$ ), kdežto na straně snímače je úhel určen proměnnou pozicí osvětleného bodu na CCD snímači ( $\beta_t$ ).





Obr. 5.20 Triangulační laserový senzor vzdálenosti: a – triangulační trojúhelník u 1D triangulace; b – příklad triangulačního senzoru firmy SICK, zdroj: <https://www.sick.com/cz/cs/snimace-mereni-vzdaleni/senzory-pro-mereni-vzdaleni/c/q150251>

Z velikostí úhlů lze na základě znalosti triangulační báze spočítat měřenou vzdálenost bodu na povrchu objektu  $l_z$  [mm] (na základě pravidla součtu vnitřních úhlů, sinusové věty a goniometrických funkcí):

$$l_z = \frac{b_t \cdot \sin \beta_t \cdot \sin \alpha_t}{\sin(180^\circ - (\alpha_t + \beta_t))} \quad (5.2)$$

kde úhel  $\beta_t$  je vypočten podle:

$$\beta_t = \theta_t + \arctg\left(\frac{\frac{v_s \text{ mm}}{2} - b_v \text{ mm}}{f_{oh}}\right) \quad (5.3)$$

$\theta_t$  je úhel normály snímače,  $f_{oh}$  je ohnisková vzdálenost objektivu v mm,  $v_s \text{ mm}$  je šířka snímače v mm,  $b_v \text{ mm}$  vzdálenost projekce bodu na čipu v mm, kterou lze spočítat podle vzorce:

$$b_v \text{ mm} = \frac{v_s \text{ mm}}{v_s \text{ pixely}} \cdot b_v \quad (5.4)$$

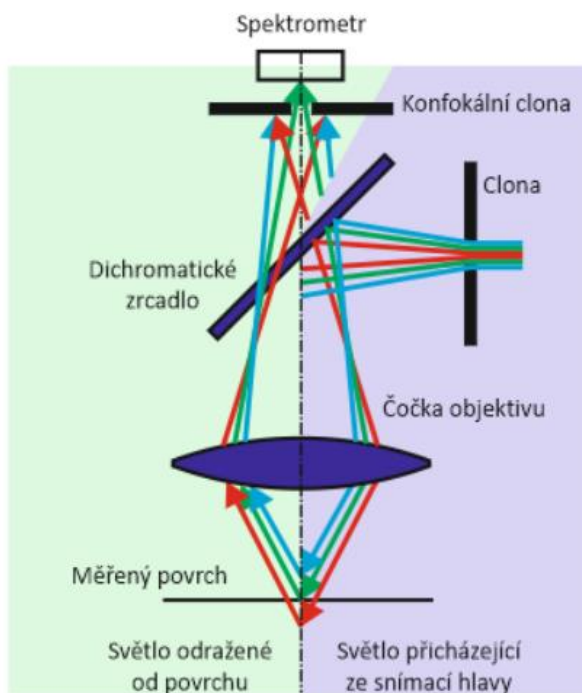
kde  $v_s \text{ pixel}$  je šířka čipu v pixelech a  $b_v$  je vzdálenost projekce bodu na snímku v pixelech v ose  $v$ . Výpočet je platný pro uvedené uspořádání a může se lišit podle geometrického uspořádání laserového paprsku a pozice CCD snímače.

Jedná se o nejběžnější a nejdostupnější zařízení s využitím triangulace. Snímače mají přesnost uváděnou v řádech  $\mu\text{m}$  (většinou v desítkách  $\mu\text{m}$  pro běžné rozsahy), vysokou frekvenci snímání v řádech kHz a širokou škálu rozsahů (od milimetrů po metry). Využívána je také 2D a 3D triangulace pro získání 3D virtuálního modelu, kap. 5.7.1.

### 5.2.12.5 Konfokální chromatické senzory

Konfokální chromatické senzory jsou bodové bezkontaktní senzory používané pro spojitě odměřování vzdálenosti, které používají pokročilou optiku. V praxi se lze setkat i s pojmem konfokální mikroskopie. V případě konfokální mikroskopie se stejně jako u konfokálních snímačů jedná o optickou metodu, která provádí měření bodově. Pokud je realizováno měření v dalších bodech zájmu, může vzniknout dvojrozměrný obraz sledovaného objektu. Posun je zajištěn pomocí rastrování nebo rotujícím diskem. Pokud je zajištěna fokusace do více rovin (pomyslných řezů), lze získat i třírozměrný obraz. Oproti konfokálním snímačům používá konfokální mikroskopie laserového paprsku a jejím primárním cílem není skenování vzdálenosti vzorku, [71, 76].

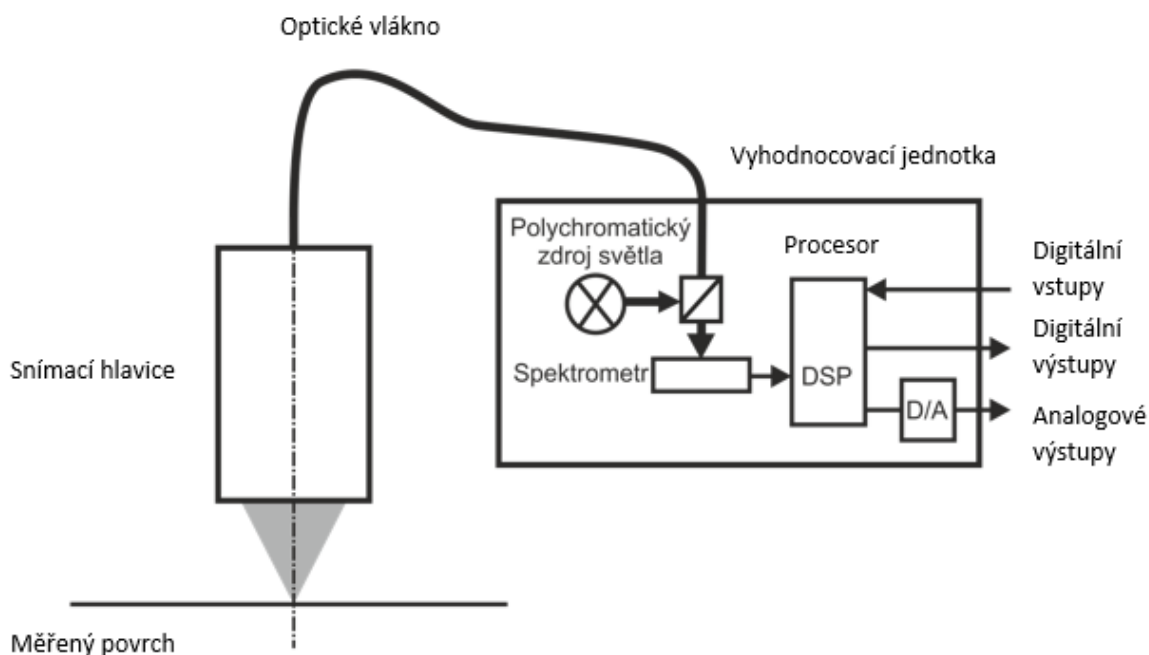
Konfokální senzory využívají bílého světla, které obsahuje všechny vlnové délky obsažené ve VIS spektru elektromagnetického záření. Bílé světlo je ve snímáči rozloženo na jednotlivé vlnové délky – monochromatické složky, které jsou díky soustavě optiky zaostřeny na různé vzdálenosti, Obr. 5.21. (To je prováděno řízenou chromatickou aberací prostřednictvím chromatické odchylky.) Monochromatická složka, zaostřená právě na měřený povrch (tzv. fokální bod čočky), je reprezentována bodem a dává ostrý obraz, který se od povrchu odráží. Od povrchu se odráží i další složky rozloženého světla, ale odraz není ostrý. Světlo odražené od povrchu se pak vrací zpět přes systém optiky. Konfokální (bodová) clona zamezí průchodu neostrého odraženého světla, tedy světla z jiné než měřené roviny. Na elektrooptický detektor (spektrometr) pak dopadá pouze ostrý odraz od povrchu v dané vzdálenosti. Detektor vyhodnotí vlnovou délku a na základě jejího přepočtu v řídicí jednotce dojde ke stanovení vzdálenosti.



Obr. 5.21 Princip konfokálního snímače

Samotný snímač je nejčastěji rozdělen na dvě části: snímací hlavici a vyhodnocovací jednotku, tzv. kontroler, Obr. 5.22. Tyto části jsou spojeny světlovodným vláknem. Vyhodnocovací jednotka generuje světelný paprsek a následně je v ní pomocí spektrometru vyhodnocena vlnová délka světla

vracejícího se zpět ze snímací hlavy prošlého konfokální clonou. V současné době se také začínají objevovat kompaktní systémy, vícebodové snímače a také liniové.



Obr. 5.22 Uspořádání konfokálního snímače

Konfokální snímače mají své nesporné výhody, mezi které patří:

- vysoká přesnost uváděná v řádu nm, pro větší rozsahy se přesnost snižuje, reálně na jednotky  $\mu\text{m}$ , což pro většinu průmyslových aplikací postačuje,
- nepatrný konstantní měřicí bod, který umožňuje měření velmi malých ploch,
- vysoce přesné měření na lesklých površích (zrcadlech) a na skle,
- jednostranné měření tloušťky transparentních materiálů (v případě dostatečné transparence materiálu a znalosti minimálně indexu lomu materiál/vzduch, ideálně i Abbého čísla),
- relativně vysoká rychlost vzorkování (běžné snímače mají frekvenci snímání do 25 kHz, špičkově do 70 kHz).

Vedle výhod existují také omezení použití konfokálních snímačů, což jsou především:

- maximální rozsah měření je v současné době do 42 mm [77], v případě měření tloušťky je možné se u běžného skla přiblížit s rozsahem až k 63 mm tloušťky skla,
- nižší je laterální rozlišení, které je u uvedených větších rozsahů v desítkách  $\mu\text{m}$ ,
- přesnost snímačů je závislá na dodržení správné pozice snímací hlavy vůči měřenému povrchu, ideálně by měla být pozice v normále vůči povrchu, ale výrobci udávají možný maximální odklon, u větších rozsahů je to jen  $\pm 2,5^\circ$  (rozsah měření 42 mm), u menších rozsahů i  $\pm 45^\circ$  (rozsah měření 1 mm),
- velké rozměry a hmotnost snímacích hlav (s větším rozsahem měření rozměry narůstají),
- vysoká cena.

### 5.2.13 Senzory náklonu

Senzory náklonu jsou inklinometry, které reagují na náklon, přičemž se využívá řada principů, příkladem může být:

- 1) Princip **fluidních článků** je založen na kapalinovém snímači, který je z velké části naplněný elektrolytem a na jeho stěnách jsou elektrody. V okamžiku, kdy se těleso a tedy i snímač nakloní, změní se výška hladiny elektrolytu nad elektrodami a tedy se zvýší či sníží vodivost mezi elektrodami. Na základě toho pak snímač dokáže vyhodnotit jak veliký je sklon s relativně vysokou přesností.
- 2) Princip **magnetického kyvadla** je založen na vychýlení kyvadla, které je uvnitř snímáno dvěma Hallovými senzory magnetického pole (každý pro jednu polaritu náklonu). Kyvadlo je často realizováno jako miniaturní drážka ve tvaru „V“, ve které se pohybuje kulička z magnetického materiálu.

## 5.3 Senzory otáček

Senzory otáček je možné dělit podle použitého principu na:

- mechanické, které jsou založené na působení odstředivé síly (klasickým příkladem je Wattův odstředivý snímač),
- indukční spojitě, které jsou založené na působení elektromagnetické indukce (např. tachometrické dynamo, tachoalternátor – kap. 5.3.1, magnetický otáčkoměr),
- impulzní, kap. 5.3.2.

### 5.3.1 Tachometrické dynamo a tachoalternátor

Klasickými indukčními snímači otáček jsou tachometrické dynamo (tachodynamo), které generuje stejnosměrný proud a tachoalternátor, který generuje střídavý proud.

Tachodynamo je precizně provedené dynamo, nejčastěji s permanentním buzením, které má velký počet lamel kvůli malému zvlnění výstupního napětí. Rychlost otáček je pak úměrná indukovanému elektrickému napětí v cívce tachodynamu. Výstupní napětí  $U = f(n)$  má v širokém rozmezí otáček linearitu menší než 1 %.

Tachoalternátor je provedením podobný tachodynamu, jen napětí není snímáno komutátorem, ale kroužky nebo jednoduchým vinutím. Získané napětí je úměrné otáčkám co do amplitudy i co do frekvence. Svoji konstrukcí připomíná jednofázový indukční motor. Na statoru má dvě cívky prostorově natočené o 90° – budící, napájenou střídavým napětím a snímací, ve které se indukuje výstupní střídavé napětí.

### 5.3.2 Impulzní senzory otáček

Impulzní senzory během otáček sejmou jeden nebo více impulzů získaných na základě různých principů (indukční, Hallovy, pneumatické, kapacitní, optické, stroboskopické). Lze tak měřit počet impulzů za jednotku času nebo čas mezi dvěma po sobě následujícími impulzy.

V průmyslové automatizaci je možné se setkat se senzory otáček již uvedenými výše. Příkladem jsou inkrementální rotační fotoelektrické senzory (kap. 5.2.12.2). Využit lze i další snímače polohy pro detekci většinou „zubů“ umístěných na otáčející se hřídeli. Použitelné jsou snímače optoelektrické, indukční, pneumatické, Hallova sonda...

#### 5.4 Senzory tlaku a síly

Měření tlaku kapalin, plynů a par je v průmyslové praxi velmi běžné. Senzory tlaku a síly využívají stejných principů, které lze obecně rozdělit na snímače: kapalinové, deformační (využívající např. membrány, trubice, vlnovce, nosníků), odporové piezorezistivní (na křemíkové membráně), odporové s tenzometry, kapacitní, piezoelektrické, rezonanční, indukčnostní, optoelektrické [67]. V současné době jsou v oblasti robotiky nejvíce zmiňovány taktilní snímače.

**Taktilní snímače** jsou zařízení, která jsou schopna snímat dotyk s objektem vnějšího prostředí a převádět ho na elektrický signál. Snímače mohou být seskupeny do matice a pak jsou získávána rastrováná (obrazová) data. Taktilní snímače mohou být založeny na několika fyzikálních principech a pak se dělí na zařízení [78]:

- *s použitím elastomeru* (nejčastěji sycená pryž grafitem nebo železným prachem), elastomer mění svůj elektrický odpor v závislosti na působící síle, lze tak spojitě měřit velikost tlaku (v procentech), snímače však mají obtížný převod na absolutní hodnotu tlaku, mohou být také řešeny maticově, např. 16 400 (128 × 128) senzorů o rozměrech 2,5 × 2,5 mm na ploše 500 × 500 mm, 1 000 fps, rozlišení 8 bitů (256 úrovní zatížení) [79],
- *s tenzometry*, což jsou většinou jen samostatné („bodové“) snímače, používány jsou drátěné, foliové a polovodičové snímače,
- *kapacitní*, která nejčastěji využívají změny společných ploch elektrod deskových nebo častěji ve tvaru sousých válců, mezi elektrody je vložen pružný člen,
- *s piezoelektrickými materiály*, která využívají piezoelektrický jev, jsou konstrukčně velmi jednoduchá, malá, ale mají velký vnitřní odpor, jsou vhodná pro snímání dynamických sil (vibrací),
- *s optickými vlákny*, v nichž vnější vlivy modulují procházející světlo (nejčastěji jeho amplitudu, dále také fázi, polarizaci nebo spektrální vlastnosti), zdrojem světla je laser, laserová dioda nebo LED, používá se nejčastěji změny amplitudy vyvolané např. mikroohybem, změnou vzájemné optické vazby, změnou tlumení, změnou přechodu a odrazu světla.

Užití taktilních snímačů je široké, od detekce objektu „hmatem“, přes hmatové úchopné senzory PR a v servisní robotice, náhrady částí těla až po bezpečnostní a naváděcí prvky.

#### 5.5 Senzory teploty

V této kapitole je uveden pouze výběr sensoriky pro měření teploty v dnešní průmyslové automatizaci. Měření teploty je děleno na kontaktní a bezkontaktní.

### 5.5.1 Kontaktní senzory teploty

Kontaktní senzory teploty mohou být založeny na několika fyzikálních principech. Obecně rozeznáváme především tyto typy teploměrů:

- 1) Kapalinové teploměry.
- 2) Plynové teploměry.
- 3) Teploměry tenzní.
- 4) Bimetalové teploměry.
- 5) Bimateriálové teploměry.
- 6) Odporové teploměry.
- 7) Termoelektrické teploměry.

Poslední dva typy teploměrů jsou elektrické. Tyto senzory pro měření teplot využívají přesné definice teplotní závislosti některé elektrické veličiny. Elektrické teploměry jsou díky svému elektrickému výstupu nejrozšířenějšími teploměry v automatizovaných systémech.

#### 5.5.1.1 Odporové teploměry

Odporové teploměry využívají závislost elektrického odporu vodiče (resp. polovodiče) na teplotě (měření se provádí např. pomocí Wheatstoneova můstku). Podle použitého principu měření teploty rozdělujeme dotykové snímače na:

- odporové kovové,
- odporové polovodičové,
- polovodičové s PN přechodem.

U **odporových kovových teploměrů** se využívá závislost změny elektrického odporu na změně teploty. Atomy krystalové mřížky kovu s rostoucí teplotou zvyšují amplitudu svých kmitů a kladou tak větší odpor průchodu elektronů. Změna elektrického odporu kovů v závislosti na teplotě

$$\Delta R = R_0 \cdot \alpha_R \cdot \Delta T \quad (6.5)$$

kde  $\alpha_R$  [ $K^{-1}$ ] je teplotní součinitel odporu,  $R_0$  odpor při teplotě  $0^\circ C$  a  $\Delta T$  je změna teploty.

Pro kovové senzory teploty se většinou využívá platina pro její chemickou netečnost, časovou stálost, vysokou teplotu tavení a také pro možnost dosažení vysoké čistoty (pohybuje se v rozmezí 99,9 až 99,999%). Kromě platiny se můžeme setkat též s niklem, mědí, molybdenem nebo některými slitinami.

Výhody odporových kovových teploměrů:

- široký teplotní rozsah,
- vysoká odolnost vůči elektrickému rušení,
- vysoká přesnost,
- dlouhá životnost,
- vynikající dlouhodobá stálost odporu.

Nevýhody odporových kovových teploměrů:

- citlivost na magnetické pole (především při nižších teplotách),
- citlivost na vibrace.

V případě **odporových polovodičových teploměrů** je změna odporu způsobena teplotní závislostí koncentrace nosičů náboje. U polovodičů je třeba k uvolnění elektronů dodat energii: elektromagnetického pole, elektromagnetickým zářením nebo formou tepla. Čím je vyšší teplota, tím se zvětšuje koncentrace volných elektronů a elektrický odpor se zmenšuje. Teplotní součinitel odporu může být pětikrát až padesátkrát větší než u kovových odporových snímačů teploty. Používají se především pro měření nízkých a středních teplot v rozmezí 4,2 K až 600 K (-268,95 °C až 326,85 °C).

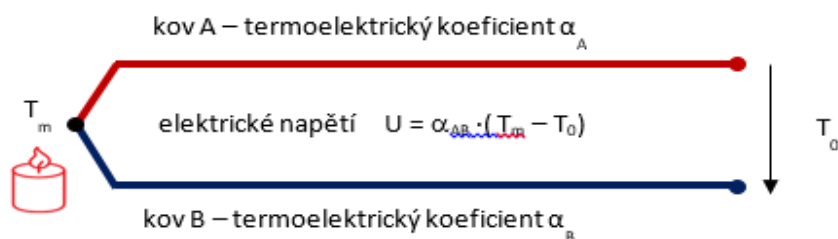
Rozdělení:

- termistory:
  - negastory (termistor NTC – Negative Temperatur Coefficient),
  - posistory (termistor PTC – Positive Temperatur Coefficient),
- monokrystalické Si snímače.

Mezi **polovodičové snímače s přechodem PN** můžeme zařadit diody a tranzistory. Používají se v rozsahu teplot 1 K až 400 K. Snímače jsou založeny na teplotní závislosti PN přechodu.

### 5.5.1.2 Termoelektrické teploměry

Princip termoelektrických teploměrů je založen na **termoelektrickém jevu**, který vychází ze Seebeckova jevu. Termoelektrický článek (termočlánek nebo také termoelement) je tvořen dvěma vodiči z odlišných materiálů, které jsou na obou koncích vzájemně vodivě spojeny (pájením, svařováním, zkroucením). Jeden spoj se nazývá měřicí a druhý srovnávací. Rozdíl teplot obou konců způsobuje termoelektrické napětí, Obr. 5.23. Rozdíl v součtu napětí v jednotlivých drátech z různých materiálů udává měřitelné napětí, které je měřítkem teplotní difference mezi místem spojení obou drátů a koncovkami měřicího přístroje. Termoelektrické napětí tedy závisí na teplotách spojů a nikoliv na rozložení teploty podél vodičů (pokud jsou materiály vodičů homogenní).



Obr. 5.23 Princip termoelektrického teploměru (termočláнку)

Materiály drátů musí mít rozdílné Seebeckovy koeficienty  $\alpha_{A,B}$ , v technické praxi jsou nazývány termoelektrickými koeficienty. Při použití drátů ze stejného materiálu bude v každém drátu stejné napětí a nelze změřit žádné diferenciální napětí. Na základě druhu kombinovaných materiálů se

stanoví reprodukovatelná závislost termoelektrického napětí na teplotní diferenci mezi vnesenou teplotou a referenčním bodem.

Na základě termoelektrického koeficientu, napětí (mV) uvedeného v tabulce normy DIN EN 60584-1 a při zohlednění teploty referenčního spoje  $T_0$  je tedy snadné určit teplotu  $T_m$ . V praxi se referenční spoj nachází buď v měřicím transformátoru nebo v rozvodu.

Nejčastější typy termoelektrických teploměrů jsou uvedeny níže:

**Platina – Rhodium-Platina (Pt-RhPt) Typ S, Typ R:** teplotní rozsah 0 – až 1 300°C, nízký koeficient teplotního napětí, velmi přesný a reprodukovatelný, odolný proti oxidaci a korozi také při vyšších teplotách.

**Nikl-Chrom – Nikl (NiCr-Ni) Typ K:** teplotní rozsah -50 až 1 000°C, nízký koeficient teplotního napětí, relativně přesný a odolný, dostatečná linearita křivky napětí, od 600 stupňů zokujeni oxidací.

**Železo – Měď-Nikl (Fe-CuNi) Typ J:** teplotní rozsah -200 až 700°C, vysoký koeficient teplotního napětí, bez stálosti termoelektrických vlastností v čase, železo je silně náchylné ke korozi.

Výhody použití termoelektrických teploměrů:

- schopné měřit teplotu v širokém rozsahu,
- velmi malé rozměry,
- rychlá odezva,
- malá hmotnost,
- ohebnost (u plášťových termočlánků),
- mechanická odolnost (drsne pracovní podmínky, rázy, otřesy, vibrace).

Nevýhody použití termoelektrických teploměrů:

- nelineární převodní charakteristika,
- velké výrobní tolerance (odchyly, nejistoty),
- ovlivňování přesnosti změnami přechodových odporů,
- potřeba kvalifikované obsluhy,
- obtížné měřit na pohybuících se objektech.

### 5.5.2 Bezkontaktní senzory teploty

Bezdotykové senzory teploty jsou dnes velmi populární. Při měření je nutno znát co měříme a jak měříme, použití senzorů se vyznačuje mnohem vyššími nároky na znalosti a zkušenosti při nastavení snímače, kalibraci a interpretaci výsledků.

Výhody použití bezdotykového měření:

- zanedbatelný vliv měřícího zařízení na měřený objekt,
- možnost měření teploty na rotujících nebo pohybuících se objektech,
- měření teploty z bezpečné vzdálenosti (elektrická zařízení, hutní provozy, ...),



- možnost měření rychlých změn (při správném nastavení),
- u termografie lze měřit a počítačově vyhodnocovat celá teplotní pole.

Nevýhody použití bezdotykového měření jsou především nejistoty měření způsobené:

- neznalostí správné hodnoty emisivity povrchu tělesa,
- neznalostí správné hodnoty propustnosti prostředí mezi čidlem a objektem,
- nepřesnou korekcí parazitního odraženého záření z okolního prostředí na měřený objekt.

Pro bezkontaktní detekci teploty jsou používány senzory dvou provedení (rozděleno podle interakce fotonů s materiálem senzorů):

- tepelné,
- kvantové [80].

Provedení snímače:

- bodové (pyrometry),
- řadové (snímání teplotních polí, termografie),
- plošné (snímání teplotních polí, termografie).

#### 5.5.2.1 Tepelné snímače

Tepelné snímače jsou založeny na absorpci fotonů, které způsobí oteplení citlivé části detektoru a pohlcená energie se vyhodnocuje nepřímo. Fungují tak na principu změny elektrických vlastností v závislosti na intenzitě dopadajícího IR záření. Snímače pak mohou být termoelektrické a pak se jedná o sériově řazené termoelektrické články, které jsou konstruovány jako tenké kovové pásky získané technologií tenkých vrstev [80]. Lze také využít pyroelektrického jevu pro pyroelektrické snímače, které jsou založeny na spontánní polarizaci při změně teploty. Měřeno je v obou případech napětí.

Pokud je princip založen na změně elektrického odporu, pak jsou snímače nazývány bolometry. V tomto případě pohlcené záření způsobí změnu teploty odporového čidla a tím i změnu jeho elektrického proudu. Intenzita dopadajícího záření může být tedy určena ze změn odporu bolometru. Aby však byla změna teploty bolometru úměrná pouze absorbovanému infračervenému elektromagnetickému záření, musí být vlastní bolometr tepelně izolován od svého okolí. Pro získání obrazových dat se používají tzv. mikrobolometry, které vytvářejí mikrobolometrické pole, což může být 2D rastr (plošný snímač) nebo 1D linie (řádkový snímač). Dnešní mikrobolometry jsou běžně složeny ze stovek tisíců bolometrů. Nejčastějšími používanými materiály senzorů detekující IR záření v mikrobolometrech jsou amorfní křemík a oxid vanadičný. Výhodou tohoto detektoru je, že detektivita není závislá na vlnové délce. Tento typ snímačů je používán pro běžné průmyslové aplikace především z důvodu jeho nižší ceny a také tyto senzory nevyžadují chlazení pro svoji funkci, čímž se zjednodušuje jejich použití a také se snižuje jejich hmotnost.

### 5.5.2.2 Kvantové snímače

**Kvantové snímače** jsou založeny na principu vnějšího nebo vnitřního fotoefektu. V praxi se v současné době uplatňují především snímače polovodičové, tedy založené na vnitřním fotoefektu. Fungují tak na stejném principu snímače pro viditelné spektrum (kap. 5.7) a mohou být také založeny buď na fotovoltaičském nebo fotovodivostním principu. Fotovodivostní snímače mají v porovnání s fotovoltaičskými snímači obvykle vyšší citlivost a větší odstup signálu od šumu, ale je nutné je obvykle chladit na velmi nízké teploty. Proto jsou častěji používány snímače na fotovoltaičském principu.

Oproti bolometrům jsou kvantové snímače citlivější, ale mají schopnost detekovat záření pouze v úzkém rozsahu vlnových délek (snímače jsou úzkopásmové). Pásmo citlivosti je odlišné v závislosti na jejich typu:

- PtSi pro pásmo 3 600 až 5 000 nm,
- InSb pro pásmo 1 000 až 5 500 nm,
- QWIP (Quantum Infrared Photon Detector) založený na substrátu GaAs pro pásmo kolem 8 000 nm,
- HgCdZnTe pro pásmo 2 000 až 12 000 nm,
- InGaAs pro pásmo 900 až 1 700 nm,
- SiAs pro pásmo 5 000 až 28 000 nm.

Všechny uvedené typy jsou založeny na fotovoltaičském principu a mohou být bodové (použití u pyrometrů), řádkové nebo plošné (termovize) a ve většině případů je nutné je aktivně chladit.

Následující tabulka Tab. 5.1 shrnuje základní odlišnosti mezi fotonovými a tepelnými snímači.

Tab. 5.1 Porovnání kvantových a tepelných snímačů, podle [81]

Vlastnost	Kvantový snímač	Tepelný snímač
Spektrální citlivost	Omezená	Široká
Citlivost	Vysoká	Nízká
Časová konstanta	Velmi krátká (cca $\mu$ s)	Střední (cca ms)
Nejčastější typ	PtSi a InSb, QWIP	Mikrobolometr
Pracovní teplota	Nízká (nutné chlazení)	Pokožová (lze chladit)
Cena	Vysoká	Nížší

## 5.6 Další senzorka

Existuje celá škála senzorů. V této části jsou uvedeny jen heslovitě s případným komentářem významu v automatizaci.

**Zvukové senzory** (zpravidla mikrofony) detekují mechanické vlnění v látkovém prostředí (zvuk), čímž generují napětí úměrné hladině akustického tlaku. Jednoduchý robot může být navržen tak, aby

se pohyboval na základě zvuků, které obdrží. Komplexní roboty mohou používat stejné mikrofony i pro rozpoznávání řeči a hlasu. Implementace zvukových sensorů není tak jednoduchá jako u světelných čidel, protože zvukové senzory generují velmi malý rozdíl napětí, který musí být značně zesílen, aby se vytvořily měřitelné změny.

**Senzory pro navigaci** jsou využívány pro určení polohy robotu, některé pro vnitřní nasazení (v rámci pracoviště), jiné pro venkovní účely. Lze rozeznávat:

- **GPS** (Global Positioning System) – nejčastější systém určení venkovní polohy, ale uvnitř budov nevhodný. Satelity na oběžné dráze vysílají signály a přijímač na robotu tyto signály získá a zpracuje. Zpracované informace mohou být použity k určení polohy, příp. rychlosti pohybu. Podobně fungují další systémy jako je GLONASS, Galileo, BeiDou a další.
- **Digitální magnetický kompas (magnetometr)** – poskytuje navigační měření pomocí zemského magnetického pole, ale neposkytuje zpětnovazebnou informaci o dané poloze.
- **Lokalizátor** – určení polohy na základě orientačních bodů (vysílačů), které generují signál (Wi-Fi, Bluetooth, ultrazvuk, IR, rádiové vlny apod.).

**Akcelerometr** je přístroj, který měří vibrace nebo zrychlení při pohybu struktur (konstrukcí, části strojů apod.). Síla způsobující vibrace nebo změnu pohybu (akceleraci) působí na hmotu snímače, která pak stlačuje piezoelektrický prvek generující elektrický náboj úměrný stlačení. Protože je elektrický náboj úměrný síle a hmotu snímače je konstantní, je tedy elektrický náboj také úměrný zrychlení – akceleraci. Akcelerometry mohou být například:

- **Piezoelektrické akcelerometry** – využívají piezoelektrický krystal, který generuje náboj úměrný působící síle, která při zrychlení působí.
- **Piezoresistivní akcelerometry** – využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu.
- **Akcelerometry s proměnnou kapacitou** – využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně kapacity.

**Gyroskop** obsahuje setrvačnick, který zachovává polohu osy své rotace v inerciálním prostoru, tj. pomáhá udržovat orientaci na principu momentu hybnosti. Přesnost gyroskopu závisí na stabilitě udržení jeho otáček. Precizní gyroskopy při regulaci otáček pohonu setrvačnicku využívají i optických snímačů založených na Sagnacově jevu v kruhovém laseru nebo v cívce optického vlákna.

**Inerciální měřící jednotka (IMU)** je elektronické zařízení, které pomocí kombinace gyroskopů a akcelerometrů, příp. magnetometru, podává informace o zrychlení a orientaci v prostoru. IMU je základní součástí všech inerciálních měřících systémů, které slouží k dopravním měřením.

Další senzory v průmyslové praxi mohou být:

- napěťové senzory,
- proudové senzory,
- senzory měření vlhkosti,
- senzory detekce plynů,
- potenciometry (využitelné v mnoha různých aplikacích),
- magnetické senzory,

- senzory hustoty,
- senzory viskozity,
- senzory pH,
- atp.

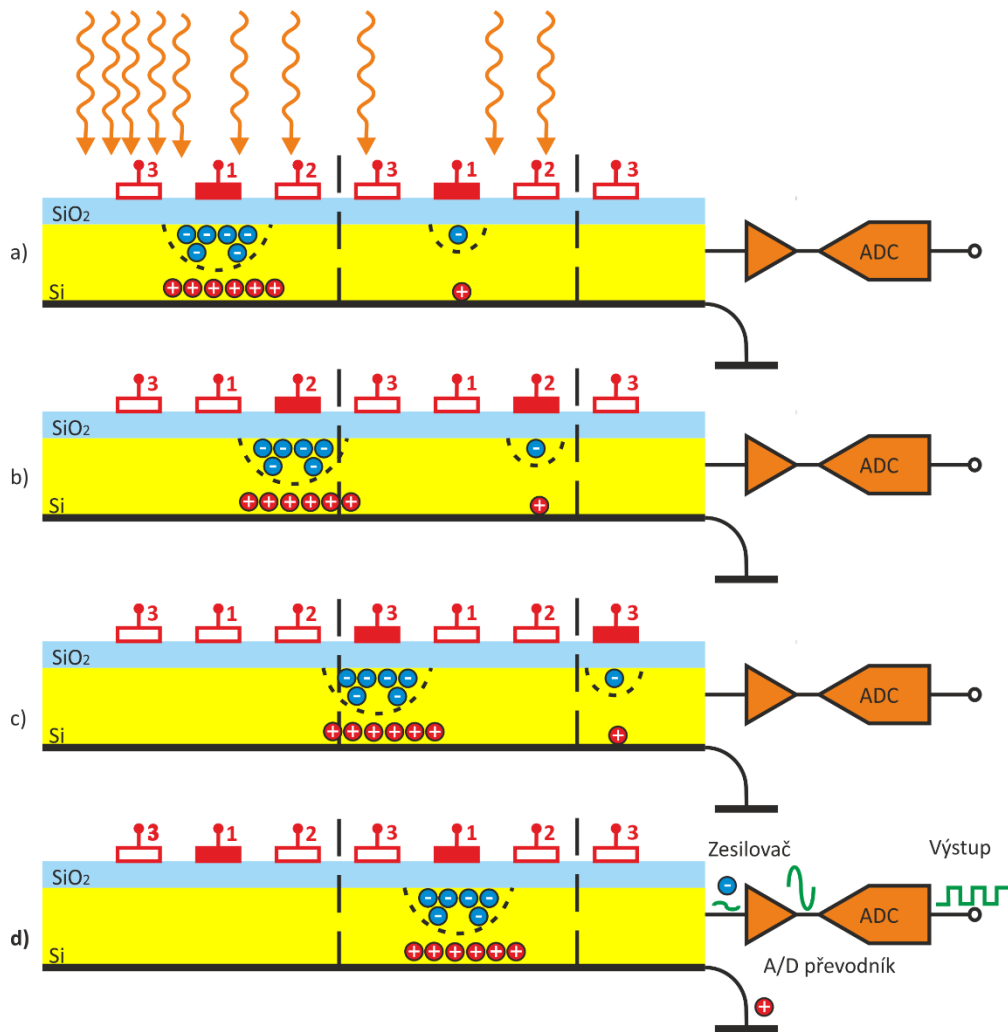
## 5.7 Senzorika pro vizualizaci technologické scény

Vizualizací technologické scény je myšleno použití (nejčastěji) snímačů obrazu (průmyslových kamer) pro detekci objektů v rámci výroby a technologického postupu pro řízení, regulaci, kontrolu a sledování činnosti strojů, zařízení a výrobního procesu. Jedná se například o umístění kamery pro zjištění polohy výrobků v bednách pro jejich automatické vybírání (tzv. bin picking, kap. 5.8) nebo zjištění úplnosti výrobku, jeho vad, polohy nebo jeho rozpoznání. U servisní robotiky může pomocí kamer docházet k detekci objektů a osob v okolí stroje, atd.

Samotné získání obrazových dat pomocí optického elektromagnetického záření je ve své podstatě radiometrické měření za použití vhodných snímačů, které jsou citlivé na sledované spektrum záření. Podmínkou zůstává uspořádání jednotlivých buněk v senzoru do vhodného rastru, ten je nejčastěji volen ve dvojrozměrném maticovém uspořádání. Jednotlivé „buňky“ snímače (pixely) měří dopadající záření v daném časovém intervalu. Nejčastěji je snímači pro optické záření měřena intenzita a vlnová délka elektromagnetického záření.

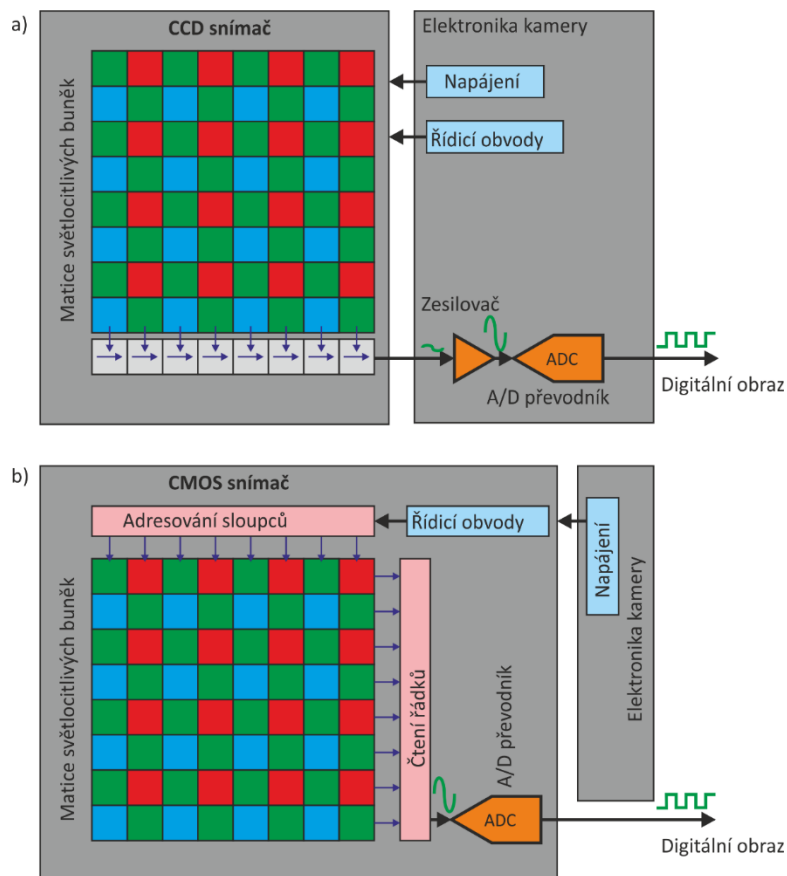
Kamery (snímače obrazu) získávají obrazová data, která jsou následně sdílena a interpretována na informace. V praxi jsou dnes nejčastěji používány snímače CMOS APS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Active Pixel Sensor) spolu s CCD (Charge-coupled device, Obr. 5.24) snímači. Oba pracují na stejném principu vnitřního fotoelektrického jevu. Foton po interakci s atomem dokáže přemístit některý z jeho elektronů ze základního do excitovaného stavu. V polovodiči je možno uvolněný valenční elektron přitáhnout k přiloženým kladným elektrodám, které jsou ale od polovodiče izolovány. Vznikají tak potenciálové jamky (miniaturní obrazové buňky), které jsou následně vyčítány, zesíleny a digitalizovány.

Rozdíl mezi CCD a CMOS APS je ve vyčítání elektronů, Obr. 5.25. U CCD snímače je použit posuvný registr a buňky jsou postupně vyčítány, zesilovány a pomocí A/D převodníku je signál digitalizovaný. U CMOS APS jsou buňky snímače vyčítány přímo. Snímač funguje na principu použití tranzistoru, kdy každá buňka má svůj zesilovač a A/D převodník. Může být díky tomu přímo adresována a čtena pomocí jejích X, Y souřadnic na snímači. Obecně, CCD snímače mají vyšší citlivost, vyšší dynamický rozsah, menší šum a vyšší fill factor. CMOS APS snímače mají menší spotřebu, jsou rychlejší a levnější, Tab. 5.2. Více informací lze najít v odborné literatuře [68, 70].



Obr. 5.24 Princip činnosti CCD snímače: a – expozice obrazu, na elektrody 1 se přivede kladné napětí a otevře se závěrka (na snímač se nechá působit světlo); b – snímání obrazu, na každé buňce jsou umístěny další dvě elektrody (2, 3), na elektrodách 2 se začne pozvolna zvyšovat napětí, zatímco na elektrodách 1 se souběžně snižuje; c – pokračování snímání obrazu, na elektrodách 3 se začne pozvolna zvyšovat napětí, na elektrodách 2 se souběžně snižuje; D – zesílení signálu a převod na digitální výstup

Digitalizace signálu představuje kvantování podle požadované datové hloubky, tedy na požadovaný počet úrovní jasu. Jestliže je pro získání obrazových dat o obrazovém elementu (pixelu) použito  $b$  bitů, je počet úrovní jasu  $k_j = 2^b$ . Jedná se o radiometrické rozlišení. V současné době většina kamer pracuje s 10 až 12 bity na pixel. U 10 bitů, respektive 12 bitů monochromatického obrazu lze na jednom pixelu získat 1 024, respektive 4 096 úrovní jasu. Pro většinu aplikací ovšem postačuje u monochromatického obrazu 8 bitů na pixel, což představuje 256 hodnot.



Obr. 5.25 Rozdíl v architektuře základních snímač, které fungují na principu vnitřního fotoelektrického jevu: a – CCD snímač; b – CMOS APS snímač

Tab. 5.2 Porovnání snímačů CCD a CMOS APS

Parametr	CCD	CMOS APS
Signál vystupující z pixelu	Paket elektronů	Napětí
Signál vystupující z čipu	Napětí (analogový signál)	Bits (digitální signál)
Rychlost	Nízká, sekvenční čtení	Vysoká, maticově adresované buňky
Citlivost	Velmi dobrá, lze dosáhnout kvalitního obrazu, lepší barevná věrnost snímků	Za snížených světelných podmínek může být problém dosáhnout kvalitního zobrazení, horší rozlišení barev
Dynamický rozsah	Vysoký	Průměrný
Šum	Malý, velká kvalita obrazu	Je větší s ohledem na nižší fill factor (část světlocitlivé buňky je zakryta elektronikou)
Odběr energie	Odebírá více (uvádí se až 50 x více než CMOS APS)	Relativně malý
Složitost čipu a náklady na vývoj	Menší	Velké
Složitost systému	Velká, mnoho obvodů je mimo čip	Menší, většina obvodů je přímo na čipu
Cena	Vysoká, jedná se o specializovanou výrobní technologii	Levnější, je využíváno standardní technologie výroby logických obvodů

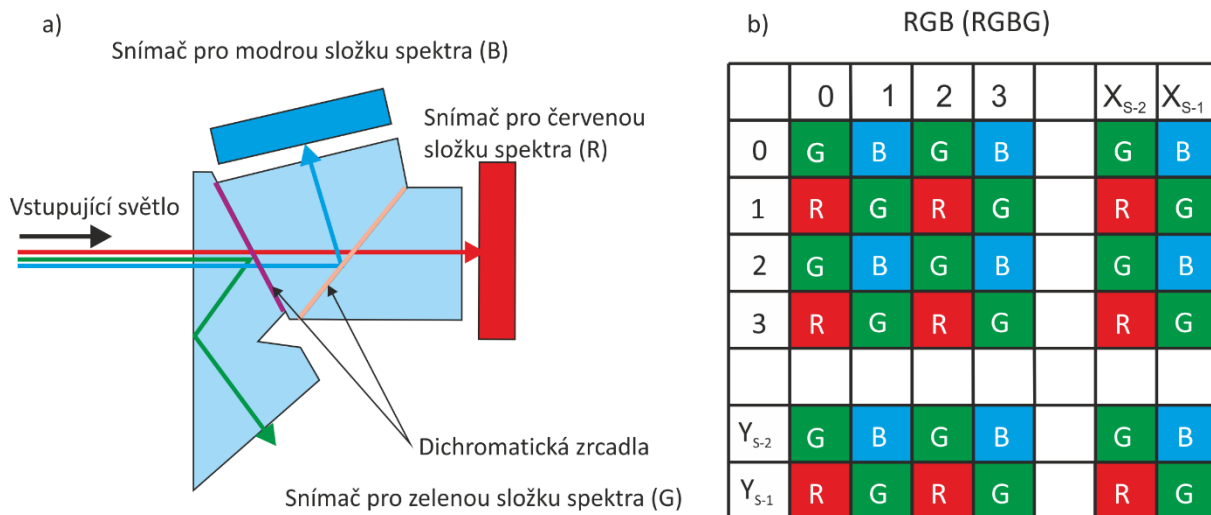
Uvedený fyzikální princip, který využívá polovodičů na bázi křemíku, má širší rozsah detekovaných vlnových délek než má lidské oko. Konkrétně je uváděn rozsah spektra 300 až 1 000 nm. Blízké infračervené elektromagnetického záření (NIR) ve vlnových délkách 750 až 1 000 nm není viditelné lidským okem, v pořízeném obrazu se tak mohou objevit nečekané odrazy. Pro záznam pouze ve VIS oblasti spektra (390 až 750 nm) je proto používán IR-cut filtr, který odfiltruje záření z NIR oblasti a zabrání infračervené složce, aby se uplatnila v získaných obrazových datech. IR-cut filtry mohou výrobci umístit přímo na ochranné sklíčko umístěné před senzorem (u monochromatických kamer) nebo na barevné filtry u kamer pro snímání v barevné škále. Tyto filtry mohou být také umístěny v optice objektivu. Podobně je možné řešit přesah do blízkého ultrafialového záření (300 až 390 nm, NUV), ale ve většině případů je vliv NUV mizivý a filtry se nepoužívají.

Dalším důležitým pojmem je závěrka, která je většinou dvojího typu. Celková závěrka (global shutter) se vyznačuje tím, že senzor je vystavován světlu v jediném časovém okamžiku. Obrazová data z horní, střední a dolní části senzoru jsou přenášena téměř současně. Rolovací závěrka (rolling shutter, Line scan) je většinou levnější a na rozdíl od celkové závěrky dochází k načítání jednotlivých řádků s buňkami (celého snímku) postupně shora dolů. Protože je snímek načítán postupně v řádcích, ale je zobrazován vcelku, mohou být kolmé hrany pohybujícího se objektu zobrazené na výsledném snímku jako šikmé. Sensory s rolovací závěrkou jsou levnější, ale nejsou vhodné pro úlohy s pohybem kamery nebo při pohybu ve snímané technologické scéně.

V současné době je v průmyslové praxi nejrozšířenější využití monochromatických kamer (kamer snímajících v šedé škále). Vedle měření jasu je možné získat i informace o vlnové délce, přesněji získat barevnost sledovaných objektů v podobném vyjádření tak, jak je vnímá lidské oko. Pro získání barevného obrazu je možné využít dvou základních principů: tříčipové uspořádání a jednočipové s barevným filtrem.

**Tříčipové uspořádání** je založeno na rozložení bílého denního světla na primární barvy červenou (R), zelenou (G) a modrou (B) soustavou optických hranolů se dvěma polopropustnými (dichromatickými) zrcadly s nanesenými barevnými filtry, Obr. 5.26 a. Tato optická soustava rozdělí obraz na obrazy pro tři CCD snímače, které zaznamenávají jednotlivé barevné složky obrazu. Výsledkem je tak prostorová matice o třech hladinách.

Výhody tohoto řešení jsou plné rozlišení RGB snímků a vysoká citlivost, protože světlo je zpracováno v původní podobě jeho jednoznačnými charakteristikami. Naopak nevýhodami jsou vysoká cena, větší rozměry a hmotnost, v neposlední řadě požadavek speciální (dražší) optiky.



Obr. 5.26 Získání barevného obrazu: a – tříčipové uspořádání; b – Bayerův filtr pro jednočipové snímání

**Jednočipové snímání s barevným filtrem** je používáno častěji a je založeno na umístění šachovnicového vzoru přímo před jednotlivé pixely jediného snímače. Většinou je využíváno tři základních barev modelu RGB, kde problém s uspořádáním do matice je řešen pomocí barevných filtrů, nejčastěji tzv. Bayerova filtru, Obr. 5.26 b. Filtr má dvojnásobný počet zelených buněk oproti buňkám červeným a modrým. Důvodem je, že lidské oko je nejcitlivější na žlutozelenou barvu a informace o této barvě je tak pro lidské oko nejdůležitější. Obraz se načte běžným způsobem a teprve dalším zpracováním se plnohodnotné barvy jednotlivých pixelů interpolují z nejbližších pixelů jednotlivých barev RGB, nejčastěji ze sousedních 4 pixelů. Při detailním pohledu jsou pak drobné detaily „rozpité“. Pokud by se interpolace neprovedla, je výsledné rozlišení jen třetinové. S tím je spojena i nižší citlivost, protože 2/3 spektra jsou na každé buňce odfiltrovány (např. modrá a zelená pro červený filtr). Pro redukci tohoto problému je možné využít rozložení na tzv. doplňkové barvy (komplementární), což jsou azurová, purpurová a žlutá (CMY). Filtr z doplňkových barev odfiltruje 1/3 spektra (např. modrou pro žlutý filtr), proto je tento senzor dvakrát citlivější. Na druhou stranu je výpočet hodnot R, G, B poněkud složitější, což zvyšuje míru šumu. Existují i další řešení, která jsou zmíněna v [68].

Parametry současných kamer umožňují široké uplatnění v praxi, a to i s ohledem na klesající ceny. Mezi základní charakteristiky kamer s plošným senzorem patří typ snímače (nejčastěji CCD nebo CMOS APS). Dalším parametrem je již zmíněná **datová hloubka snímače** (radiometrické rozlišení).

Velmi důležitým a často přehlíženým parametrem je **velikost snímače**, tento parametr významně ovlivňuje citlivost a tím i míru šumu. Větší snímač při stejném rozlišení má větší buňky, na které dopadá více záření, což vede k nižšímu šumu a obraz je tak kvalitnější. Na druhou stranu je nutné počítat s vlivem ohniskové vzdálenosti objektivu představeného před snímač na zorný úhel a tím i na zorné pole. Velký snímač potřebuje, pro dosažení stejného zorného úhlu, objektiv s delší ohniskovou vzdáleností. S prodlužováním ohniska objektivu také klesá hloubka ostrosti, což v některých technických aplikacích může být nežádoucí. Velikost snímače je uváděna v palcích a jedná



se o hodnotu, která nekoresponduje přímo s velikostí snímače, pro přepočítání je potřeba použít tabulky, Tab. 5.3. Obecně je u průmyslových aplikací trend ke zvětšování velikosti snímače při stejném plošném rozlišení (běžně 1/2" až 2/3", postupně se uplatňují i senzory velikosti 1"). Pro praktické využití je potřeba si uvědomit, že senzory s menší světlocitlivou buňkou vyžadují intenzivnější osvětlení.

Tab. 5.3 Velikosti běžně užívaných optických snímačů

Typ	Poměr š:v [-]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Diagonála [mm]
1/6"	4:3	2,300	1,730	2,878
1/4"	4:3	3,200	2,400	4,000
1/3.6"	4:3	4,000	3,000	5,000
1/3.2"	4:3	4,536	3,416	5,678
1/3"	4:3	4,800	3,600	6,000
1/2.7"	4:3	5,270	3,960	6,592
1/2"	4:3	6,400	4,800	8,000
1/1.8"	4:3	7,176	5,319	8,932
2/3"	4:3	8,800	6,600	11,000
1"	4:3	12,800	9,600	16,000
4/3"	4:3	18,000	13,500	22,500

**Plošné rozlišení**, tedy vzorkování, je vzdálenost mezi nejbližšími snímanými (vzorkovacími) body v obraze (obrazovými buňkami, pixely). Otázku plošné vzorkovací frekvence (vzdálenosti vzorkovacích bodů) řeší Shannonova věta o vzorkování [70]. Z věty vyplývá, že vzorkovací frekvence musí být alespoň dvakrát větší než nejvyšší zajímavá frekvence ve vzorkovaném signálu. V případě použití nižší vzorkovací frekvence (nižšího rozlišení) může dojít k tzv. aliasingu. O rozlišení snímače tak primárně rozhoduje požadovaná přesnost měření. Vzhledem ke zmíněným podmínkám musí být rozlišení alespoň dvakrát vyšší než požadovaný nejmenší měřitelný rozměr. Nicméně tato teoretická přesnost a s ní související opakovatelnost měření je snižována vlivem šumu v obraze, ztrátovou kompresí obrazových dat a dalšími vlivy. Je tak třeba počítat s rezervou, která závisí jak na snímaném objektu, tak nabídce senzorů s patřičným rozlišením. Zkušenost ukazuje, že pro zpracování obrazu je třeba vzorkovat minimálně 5krát jemněji, než je teoretická mez daná vzorkovací větou. Rozlišení by tak mělo být minimálně pětkrát větší než je teoretická mez. Běžné průmyslové kamery dnes mají plošné rozlišení okolo 5 Mpx, existují ovšem i kamery s rozlišením 47,5 Mpx (7 920 x 6 004 pixelů), [82]. Při tomto rozlišení je třeba řešit přenos velkého objemu dat z kamery do vyhodnocovací jednotky, což je řešeno několikanásobným rozhraním Camera Link nebo CoaXPress. V současné době je špičkou v rozlišení kamera shr411CCX, která má plošné rozlišení 150 Mpx (14 192 x 10 640 px), velikost senzoru 53,36 x 40,01 mm [83], při rychlosti snímání 6,1 fps pro 4 linie CoaXPress.

**Časové rozlišení** snímačů nebo také frekvence či rychlost snímání je důležitý parametr při získávání snímků z relativně rychlých procesů. Při volbě kamery je tak třeba znát rychlost procesu, který bude snímán a s rezervou zvolit příslušnou kameru. Frekvence snímání se uvádí v počtu snímků za sekundu (fps – frames per second). V současné době se běžně hodnoty pohybují od 3 fps (barevné kamery s 16 Mpx CCD senzory, např. u kamery JAI AB-1600CL) až po 750 fps („rychlomkamery“ s rozlišením VGA, výhradně CMOS APS snímače). Běžná frekvence snímání u kamer s plošným rozlišením 5 Mpx se pohybuje v současné době od 10 do 250 fps, což je postačující pro většinu průmyslových aplikací. Některé kamery umožňují rychlý záznam pouze ve zvolené oblasti zájmu (ROI, Region of Interest). Příkladem může být kamera Basler acA2500-60um s větším snímačem (1“), která při specifikaci ROI 640 x 480 může zaznamenat až 978 snímků za sekundu.

Dalším důležitým parametrem je použité **rozhraní (interface)** pro komunikaci kamery s vyhodnocovací jednotkou. Dostupných je několik typů rozhraní, každý nabízí trochu jiné vlastnosti a hodí se pro jiný typ aplikací. Výběr kamery do jisté míry závisí na možnostech komunikace se systémem pro zpracování obrazu. Někdy výrobce kamer nabízí stejný model ve dvou a více variantách lišících se právě typem připojení, o jeho volbě rozhoduje především:

- rychlost přenosu dat, tedy objem dat, který je odeslán do počítače za danou časovou jednotku,
- latence, tedy zpoždění mezi pořízením snímku a jeho zobrazením/doručením ke zpracování,
- vzdálenost, na kterou mají být data přenesena (vzdálenost mezi počítačem a kamerou),
- způsob napájení (komunikační rozhraní může zajistit i napájení kamery),
- zpoždění příkazů (přicházejících z počítače do kamery a obráceně, důležité především při snímání rychlých procesů),
- možnost připojení více kamer (je-li vyžadována),
- zatížení procesoru CPU nebo GPU,
- cena a další.

Dnes se používají tyto typy rozhraní: USB 3.0, Gigabit Ethernet (GigE Vision), Camera Link a CoaXPress. Starší rozhraní jsou: USB 2.0, FireWire (IEEE 1397 a/b) a analogové.

Dalším parametrem snímačů je **rozsah detekovaného spektra**, protože, jak již bylo zmíněno, používané snímače zasahují do blízké UV oblasti (NUV) a blízké IR oblasti (NIR). Omezení se provádí pomocí filtrů na kameře a/nebo v/na objektivu.

Dalšími parametry je rozsah **expozičních časů, formát výstupních dat, možnosti řízení kamery** (vstupy), **závit objektivu, způsob upevnění kamery, napájení, odolnost vůči okolním vlivům** (krytí, odolnost proti vibracím, odolnost proti mechanickému namáhání, rozsah teplot a vlhkosti okolí kamery při provozu, ...) a další (výrobce kamery a senzoru, ...), [68].

Průmyslové kamery jsou pomocí uvedeného rozhraní připojeny k **vyhodnocovací jednotce**, nejčastěji k PC. Samotné získávání obrazu není většinou automatické po připojení kamery, ale je třeba mít nainstalovány potřebné ovladače a základní software od výrobce kamery. Základní software často umí jen zobrazit obraz z kamery, ovládat parametry kamery, pořídit snímek, případně i záznam. Úprava, zpracování a analýza obrazu jsou již záležitostmi programování nebo parametrizace v uživatelsky přívětivém prostředí.

Místo PC může být použit kompaktní a odolný systém uzpůsobený pro průmyslové aplikace (Compact Vision System, CVS). Kompaktní systém je vlastně počítač optimalizovaný pro zpracování obrazu s minimalizací mechanických prvků, které významněji limitují užití klasických počítačů v průmyslové praxi. Takovéto systémy jsou pak snadno propojitelné a obsahují širší škálu nástrojů pro práci s pořízeným obrazem, která nevyžaduje znalost programovacích jazyků. Nutno je ovšem počítat s vyšší cenou.

**Objektiv** představuje systém optických elementů tzv. čoček a soustředí obraz na snímač, Obr. 5.27. U převážné většiny objektivů pro spektrum VIS, NIR a NUV je možné pomocí kroužku na objektivu obraz zaostřit.



Obr. 5.27 Ukázka průmyslových kamer s objektivy

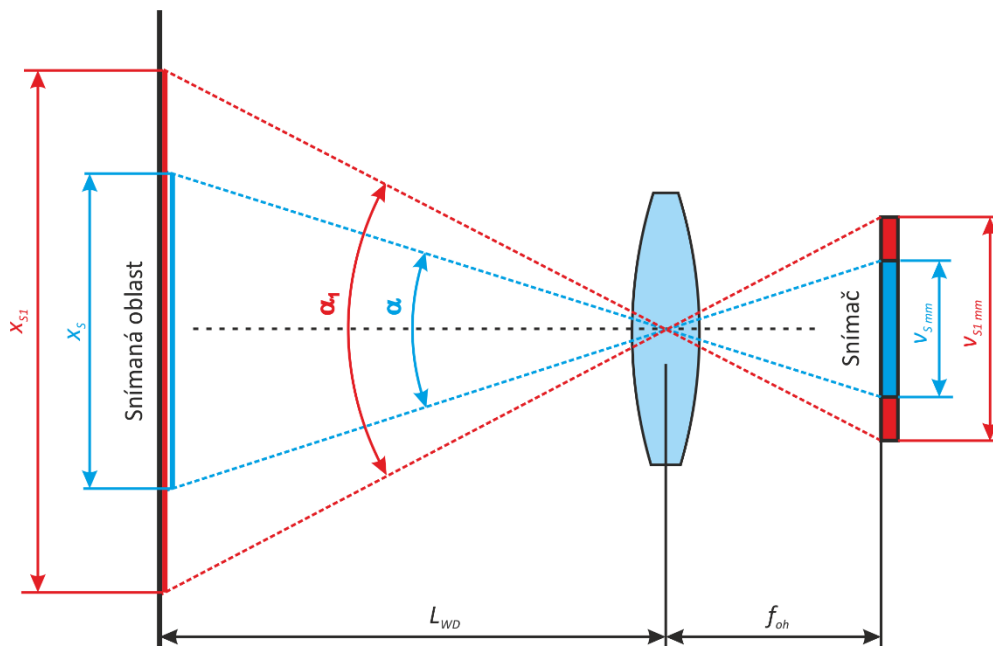
Hlavním parametrem je **ohnisková vzdálenost**, která určuje pro danou velikost čipu úhel záběru. Většina objektivů pro průmyslové aplikace má pevnou ohniskovou vzdálenost. Pro daný typ kamery s danou velikostí snímače je třeba určit objektiv, který bude mít vhodný úhel záběru, umožňující snímání celé scény z požadované vzdálenosti. Vychází se z velikosti oblasti zájmu, která je určena maximální velikostí předpokládaného snímaného objektu (bez nutnosti výměny objektivu). Oblast by měla být s rezervou nakonec větší, a to i s ohledem na pokles rozlišení a kontrastu objektivu směrem k okrajům. Vztah mezi velikostí oblasti zájmu ( $x_s$ , [mm]), velikostí snímače ( $v_s$  mm, [mm]), pracovní vzdáleností kamery ( $L_{WD}$ , [mm]) a ohniskovou vzdáleností ( $f_{oh}$ , [mm]) je zřejmý z Obr. 5.28. Matematicky je pak možno vyjádřit vztah z poměrů:

$$\frac{v_s \text{ mm}}{x_s} = \frac{f_{oh}}{L_{WD}} \quad (5.6)$$

Z uvedeného lze pak odvodit vztah pro ohniskovou vzdálenost [mm]:

$$f_{oh} = L_{WD} \cdot \frac{v_s \text{ mm}}{x_s} \quad (5.7)$$

Velikost snímače je uváděna v palcích, je tak třeba použít tabulku, která uvádí velikosti optických snímačů v mm (běžné jsou v Tab. 5.3).



Obr. 5.28 Vztah mezi zorným úhlem, ohniskovou vzdáleností a velikostí snímače [68]

V objektivěch bývá zabudována **mechanická clona**, která dovoluje regulovat množství světla procházející objektivem. Je to velmi důležitý nástroj pro ovlivnění expozice.

Vedle správného zaostření, nasvětlení scény, volby vhodného objektivu, snímače a dalších faktorů, je třeba na snímač přivést požadované množství světla a vzniklý signál správně zesílit. O tom rozhoduje expozice, která je závislá v optickém spektru elektromagnetického záření na třech hlavních faktorech: doba expozice (čas expozice, rychlost závěrky), clona a zisk (gain, kontrast, ISO).

**Doba expozice** určuje, jak dlouho je otevřena závěrka a snímač je tak vystaven působení světla přicházejícího ze scény.

**Clona** je průměr otvoru, kterým prochází světlo, tedy je to fyzické omezení množství světla přicházejícího na snímač. Clona je většinou součástí objektivu,  $N_c$  je clonové číslo [-] a platí pro ně vztah:

$$N_c = \frac{f_{oh}}{C} \quad (5.8)$$

kde  $f_{oh}$  je ohnisková vzdálenost [mm] a  $C$  je průměr otvoru clony [mm]. Ze vztahu vyplývá závislost clonového čísla na průměru otvoru clony a ohniskové vzdálenosti. Je tím ovlivněno i množství dopadajícího světla procházející optikou kamery, tedy expozice.

Zesílení signálu ze senzoru neboli **zisk** (anglicky označováno gain) ovlivňuje u snímačů přímo míru šumu. U fotoaparátů na kinofilmy se vyjadřuje jako *ISO* citlivost. V technické praxi nemá smysl normovat vlastní zesílení pro digitální snímače – kamery, protože citlivost senzorů na světlo je různá.

Pomocí tří uvedených parametrů lze nastavovat expozici. Platí, že stejné expozice lze dosáhnout kombinací všech tří faktorů, ale nezíská se stejný obraz. Pro rychle se měnící scénu je nutné snímat v kratších časech. Pak je nutné otevřít clonu (nastavit malé clonové číslo) nebo více zesílit vystupující signál ze snímače. Otevřením clony se sníží hloubka ostrosti. Vzdálenější a bližší části scény od zaostřeného objektu jsou pak rozostřené, což může v některých případech úlohu v průmyslové praxi být nežádoucí. Druhá možnost zesílit vystupující signál zase zvyšuje relativní míru šumu v získaném snímku.

Vedle těchto tří faktorů lze ovlivnit expozici pomocí osvětlovačů (zdrojů záření dané vlnové délky nebo častěji v daném rozsahu vlnových délek).

**Osvětlení** technologické scény a sledovaného objektu je další důležitou součástí hardware kamerového systému. Problematika je velmi náročná na řešení, protože neplatí jednoduchá pravidla a osvětlení pro daný typ technologické scény a sledovaného objektu nemusí být vhodné pro jiný. O volbě správného osvětlení rozhodují vlastnosti tří prvků zařízení pro strojové vidění:

- 1) Vlastnosti snímače (rozsah vlnových délek elektromagnetického záření, na kterou je citlivý, velikost snímače, možnosti zesílení signálu, ...).
- 2) Vlastnosti snímané scény, což je objekt a pozadí (odraz záření od povrchu pro dané vlnové délky, absorpce záření, emise záření, záření prošlé objektem, poloha snímaných objektů atd.).
- 3) Vlastnosti záření (intenzita osvětlení, pozice zdroje, vlnová délka emitujícího záření, míra difúze záření a směrovosti, ...).

U vlastností snímané scény je důležité respektovat, k jakým jevům dochází při dopadu optického záření dané vlnové délky do prostoru scény. U optického záření má elektromagnetické vlnění charakter vlnový a fotony nemají vysokou energii. Dochází tak, mimo jiné, k jevům jako je odraz a lom záření.

Při volbě osvětlení je třeba především znát:

- jaká vlnová délka se bude od povrchu objektu odrážet, při dopadu se vždy část záření absorbuje, absorpce může být v celém snímaném spektru stejná nebo větší v určitých vlnových délkách (u VIS se jedná pak o barvy objektů),
- kde mezi extrémními případy se nachází povrch sledovaného objektu a pozadí (dokonale zrcadlový a Lambertovský povrch – dokonale difúzní), tedy zda odraz bude více zrcadlový nebo difúzní v daném sledovaném pásmu elektromagnetického záření,
- pokud je objekt transparentní, je důležité vědět, jaká vlnová délka je více absorbována a která objektem prochází (což způsobí pokles intenzity procházejícího světla a případně i změnu barvy procházejícího záření ve VIS spektru), dále zda při průchodu záření dochází k rozptylu záření (např. vystupující světlo je více difúzní),
- zda objekt emituje záření ve spektru, na které je citlivý použitý snímač (např. roztavené sklo, tedy sklovina, emituje viditelné záření),
- v jaké poloze je sledovaný objekt a objekty pozadí vůči snímači a zdroji záření.

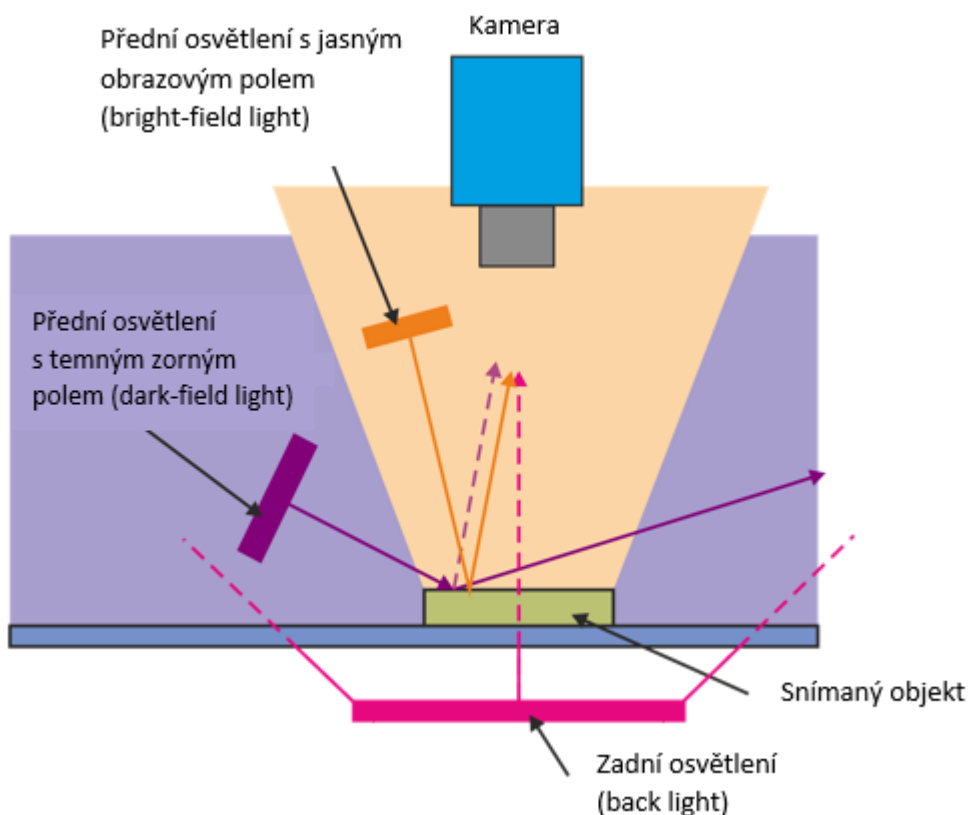
Správná volba typu osvětlení technologické scény dokáže nejen velmi zrychlit a zjednodušit následnou analýzu obrazu, ale také rozhodnout, zda je možné danou scénu vůbec snímat. Zvláště je-li

scéna tvořena transparentními, lesklými nebo reliéfně nevýraznými objekty, je návrh osvětlení pro celkový úspěch klíčový.

Zdrojem záření může být například sluneční světlo, zářivka, žárovka, výbojka, ale u profesionálních průmyslových řešení se jako zdroj záření používají LED diody a laser. LED nepotřebují vysoké napětí a jejich světelný tok může být regulován. Vlastnosti záření těchto osvětlovačů se s časem mění jen málo a mají dlouhou životnost.

U LED zdrojů (i zdrojů na bázi zářivek a výbojek) lze rozdělit základní geometrii osvětlení podle (Obr. 5.29):

- 1) Přední osvětlení s jasným obrazovým polem (bright-field lighting) – světlo se od povrchu sledovaného objektu odráží do objektivu kamery. Využívá se ve spojení s rozptýleným světlem pro vytvoření kontrastů na základě rozdílné absorpce objektu a pozadí. Používá se i světlo směrové, ale mnohem méně, například pro vytvoření kontrastu lesklých ploch.
- 2) Přední osvětlení s tmným zorným polem (dark-field lighting) – světlo se odráží od struktury na povrchu sledovaného předmětu. Vytvoří se kontrastní obraz členitostí povrchu v tmném poli – z této vlastnosti je odvozen i název, používá se směrové světlo. Využití má při detekci reliéfů a struktury na povrchu objektů.
- 3) Zadní osvětlení (back lighting) – tzv. podsvětlení, osvětlení prochází kolem objektu (tvoří siluety) a v případě transparentního objektu prochází jím samým. Používá se k vytvoření obrazu obrysu objektu, typicky v úlohách měření rozměrů. Nutné je rovněž pro vytvoření kontrastního obrysu objektu za průhlednou lesklou překážkou. Nejčastěji se používá rozptýlené světlo.

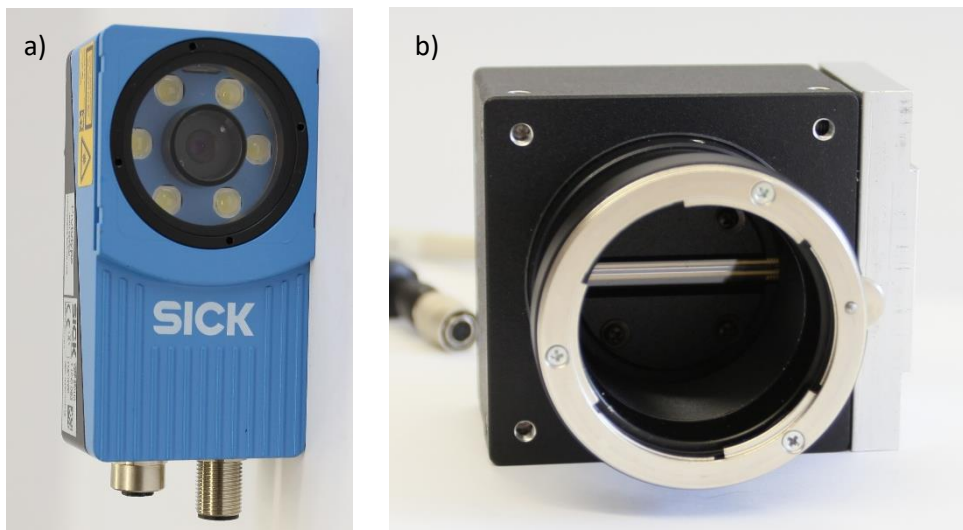


Obr. 5.29 Základní geometrie osvětlení při návrhu strojového vidění

Samotné záření z osvětlovačů může být více rozptýlené (difúzní) nebo směrové až koncentrované. Obecně platí, že rozptýlené záření snižuje kontrasty způsobené členitostí objektu a strukturou povrchu a zvýrazní kontrasty způsobené absorpcí. Naopak, při snaze kontrastně zobrazit členění objektu, je voleno světlo směrové.

**Kamery lze obecně dělit podle tvaru snímacího prvku na:**

- 4) Plošné kamery, které mají snímací body umístěné v matici:
  - a) standardní (běžné kamery, probrány v předchozím textu);
  - b) inteligentní (kamera v sobě zahrnuje pokročilý hardware a software pro zpracování snímků a výstupem jsou vedle obrazu výsledky obrazové analýzy), Obr. 5.30 a;
  - c) kamerové senzory (kamera v sobě zahrnuje jednoduchý hardware a software pro zpracování snímků, ale výstupem je jen logický výstup – ano/ne, tedy například výrobek přítomen/nepřítomen nebo kvalitní/nekvalitní).
- 5) Řádkové kamery (liniové nebo také lineární kamery), které mají snímací body v jedné až čtyřech liniích, Obr. 5.30 b.
- 6) 3D kamery.



Obr. 5.30 Kamery: a – inteligentní kamera; b – řádková kamera

Digitální fotoaparáty mají logicky výhradně plošné senzory. Naproti tomu skenery mají liniové uspořádání.

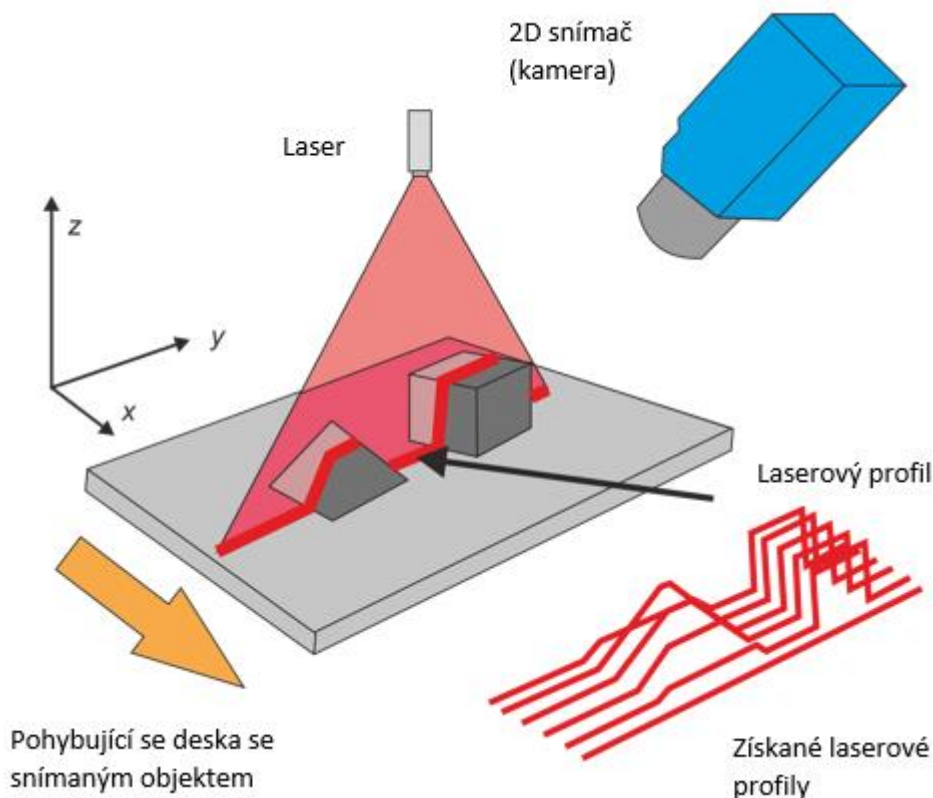
### 5.7.1 3D kamery

Problematikou, která je v současné době vysoce aktuální, je interpretace dat za účelem získání informací o třírozměrném prostorovém uspořádání (3D informace). Využití informací o 3D uspořádání sledované (technologické) scény je pro rozpoznání 3D předmětů (pro třídění, následnou manipulaci, např. bin picking a montáž, zajištění bezpečnosti, navigaci), získání 3D virtuálního modelu snímaného objektu, hodnocení jakosti (rozměrové přesnosti, kontrola povrchu) a obecně v

průmyslové a servisní robotice. Existuje mnoho principů, které se dají použít. V průmyslové praxi se ale nejvíce používají tyto tři:

- a) 2D triangulace pomocí liniového laseru.
- b) Stereo vidění.
- c) Time of flight (měření doby letu modulovaného laserového paprsku).

V průmyslové praxi je v současné době **2D triangulace pomocí liniového laseru** nejčastějším způsobem získání 3D virtuálního modelu. Princip 1D triangulace pro odměřování vzdálenosti je uveden v kap. 5.2.12. V tomto případě se využívá promítání laserového paprsku ve formě linie při definovaném (přesně načítaném) pohybu objektu nebo kamery s laserem. Jedná se o profilové laserové skenery, které jsou založeny na generaci profilů, Obr. 5.31. 3D obraz je poté složen z takto nasnímaných profilů, které definují samostatně rozměr v ose  $y$  a  $z$ . Objekt nebo kamera se musí pohybovat ve směru osy  $x$  a pohyb musí být svázán s pořizováním jednotlivých snímků. Jedná se tedy o propojení obrazových dat s daty enkodéru nebo jiného snímače polohy.



Obr. 5.31 Princip triangulačních 3D laserových skenerů s 2D triangulací

K výhodám triangulační metody patří nízká závislost na okolním osvětlení (při detekci objektů s difúzním povrchem), relativně vysoká přesnost měření a vysoká rychlost pohybu snímaného objektu. Tento typ kamer se používá na malé vzdálenosti a relativně malé předměty (běžně od desítek až po tisíce mm).



**Stereo vidění** (stereovize, stereovizní vidění, binokulární stereo) je metoda založená na softwarové fúzi (multisenzorice, kap. 1.5), která využívá dvou a více 2D senzorů. Metoda vychází z lidského vnímání světa pomocí zraku. Efekt prostorového vidění je umožněn schopností lidského zraku skládat v mozku dva obrazy téhož předmětu viděného z rozdílného místa. Princip metody se (mimo jiné) využívá k projekci 3D obrázků a snímků (stereoskopie).

Metoda stereo vidění je založena na pořízení dvou a více snímků, v tomto případě je použito dvou a více totožných 2D snímačů, následném nalezení společných bodů a výpočtu jejich vzdálenosti. Ukázka zařízení je na Obr. 5.32.

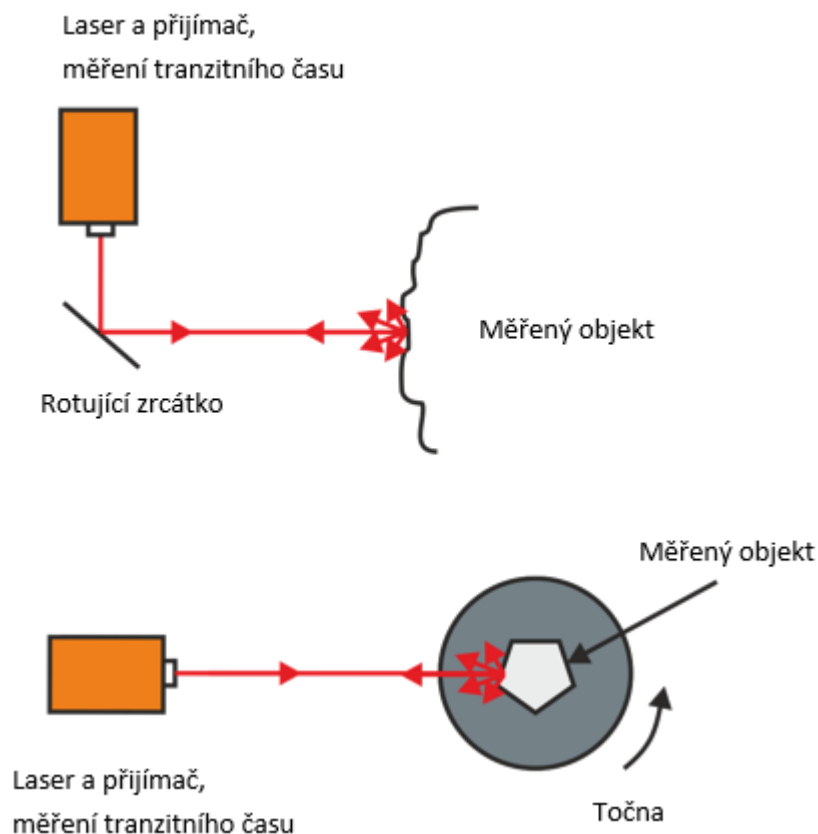


Obr. 5.32 Ukázka systému stereo vidění (od firmy LIMESS), zdroj: <https://www.limess.com/>

Princip **Time of Flight** (ToF) je založen na měření vzdálenosti bodu objektu  $P$  (v ose  $z$ ) z doby letu  $t_p$  paprsku elektromagnetického záření od jeho vyslání, odražení od objektu, až po jeho opětovné zachycení senzorem podle vztahu:

$$z_P = c \frac{t_p}{2} \quad (5.9)$$

kde  $c$  je rychlost světla. Princip metody je podobný jako u využití mechanického vlnění – ultrazvuku (kap. 5.2.10), v tomto případě je sledován čas návratu modulovaného světelného paprsku. Nevýhodou této metody je skutečnost, že rychlost světla  $c$  je extrémně vysoká, z čehož vyplývají velké nároky na přesnost měřicího zařízení. Schéma s možnými principy provedení měření jsou na Obr. 5.33. Laserový paprsek má většinou vlnovou délku v NIR oblasti (od 850 až 950 nm). Zásadní rozdíl od klasických laserových dálkoměrů (používaných na velké vzdálenosti, jako je mapování terénu) je ve větším množství změřených bodů v relativně krátkém okamžiku.

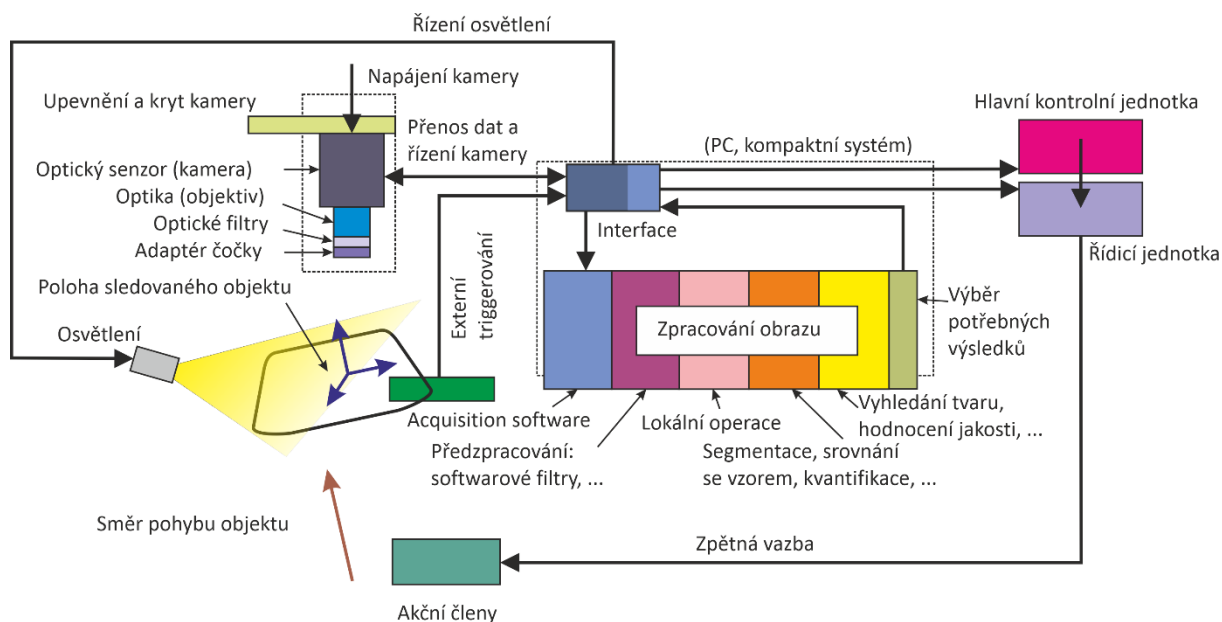


Obr. 5.33 Princip skenovacích laserových systémů na principu ToF

## 5.8 Základní principy strojového vidění, robot vision, bin picking

**Strojové vidění** je vědní obor, který se technickými prostředky snaží napodobit některé schopnosti lidského vidění. Kromě vlastních obrazových vjemů hraje při vyhodnocování obrazové informace podstatnou roli inteligence člověka a jeho předchozí zkušenosti. Podobně funguje i strojové vidění. Samotné získání, přenos a zobrazení obrazu nepřináší v automatizaci prakticky nic. Až zpracováním obrazu (jeho interpretací) je možné získat určitou, vůči člověku omezenou, „inteligenci“ daného zařízení. Interpretace získaných obrazových dat umožňuje získat potřebné informace z daného obrazu pro daný typ úlohy. Tyto informace jsou následně využity nadřazeným řídicím systémem zařízení pro rozhodování (např. robotem u robot vision).

Z pohledu hardwaru se jedná o vcelku komplikovaný systém, obsahující mnoho prvků. Základní schéma uspořádání jednotlivých (i doplňujících) prvků obrazové analýzy je znázorněno na Obr. 5.34.



Obr. 5.34 Schéma systému pro obrazovou analýzu

K dosažení potřebné kvality snímání a tedy následně i vyhodnocení je nutné splnit mnoho podmínek, které se navzájem ovlivňují. Specifickými požadavky pro aplikaci v průmyslové praxi jsou především tyto:

- osvětlení musí být vhodné pro snímání daného materiálu, v některých případech je nutné zvolit správnou kombinaci několika typů osvětlení;
- poloha sledovaného objektu musí být přizpůsobena osvětlení a pozici kamery anebo osvětlení a kamera musí být přizpůsobena poloze snímaného objektu;
- adaptéry čoček mohou být použity místo (nebo spolu) s osvětlením pro lepší zobrazení objektu (adaptér polarizovaného osvětlení, souosé kolmé osvětlení, adaptér difúzního osvětlení,...);
- filtry mohou být užity pro separaci určité vlnové délky ze snímané scény;
- optika (objektiv) včetně clony;
- snímací prvek – snímač včetně potřebné elektroniky (kamera) zvolený podle typu sledovaného objektu a jeho pohybu (lineární nebo plošná kamera) a požadovaného rozlišení;
- upevnění kamery a případně její kryt včetně izolace od nežádoucích vibrací, prachu, nízké nebo vysoké teploty okolí;
- požadované napájení kamery (podle výrobce a typu kamery);
- přenos dat do zařízení pro zpracování obrazu (kabely, A/D převodník) a řízení kamery;
- volitelné zařízení a kabely pro spouštění (triggerování) kamery;
- interface podle typu zvolené kamery (USB, Camera Link, GigE Vision, CoaxPress...);
- acquisition software (software pro získávání snímků z kamery);
- zpracování obrazu, které musí být spolehlivé, výsledky musí být získány včas a ve vhodné formě;

- n) předzpracování: softwarové filtry, které mohou nahrazovat nebo doplňovat filtry fyzické na kameře a jsou důležité především pro následné zpracování obrazu;
- o) lokální operace: oblasti, hrany, měřítko, textura, ...;
- p) segmentace, srovnání se vzorem, kvantifikace povrchu, ...;
- q) vyhledání tvaru, hodnocení jakosti, ...;
- r) výběr potřebných výsledků;
- s) přenos dat do hlavní vyhodnocovací jednotky a (nebo) řídicí jednotky (rozšířená o zpětné vazby na akční členy).

Kroky  $k$  až  $n$  jsou prováděny ve vyhodnocovací jednotce, což může být klasický počítač, ale i kompaktní a odolný systém uzpůsobený pro průmyslové aplikace.

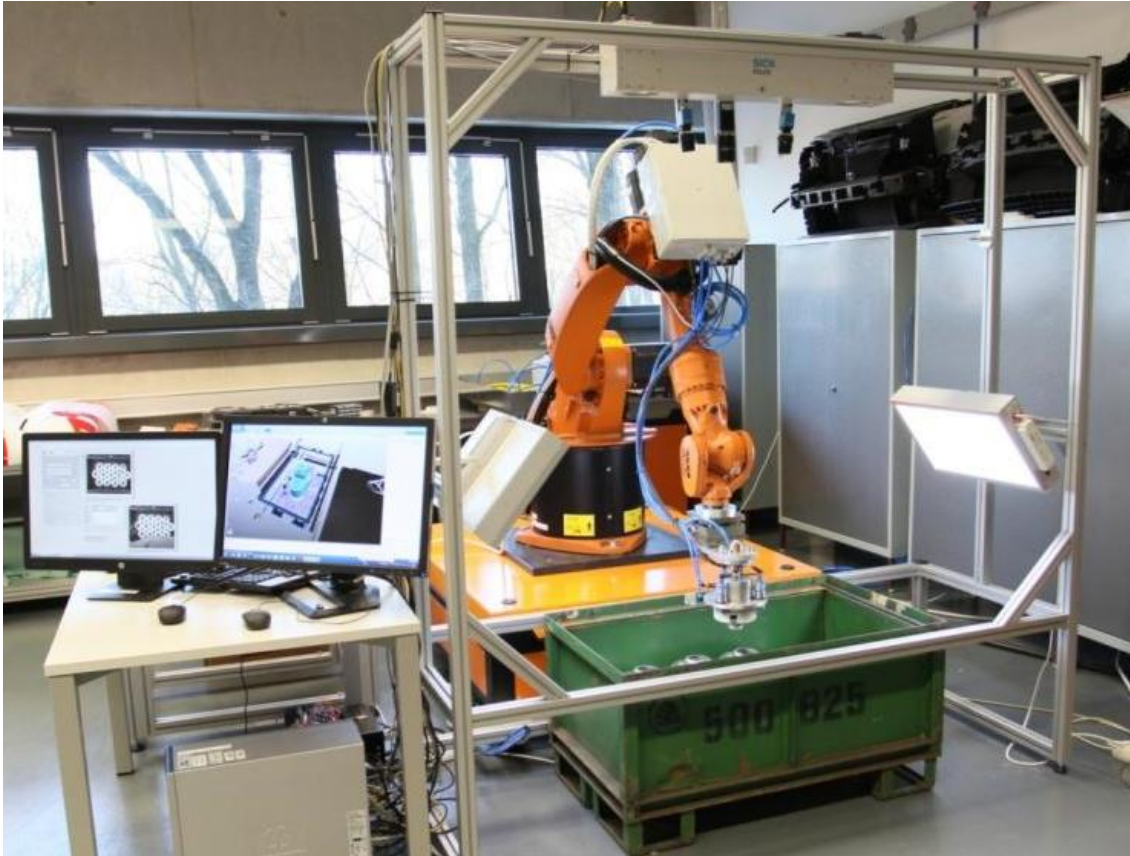
**Robot vision** je propojením robotu se strojovým viděním. Propojení vyžaduje vzájemnou komunikaci obou zařízení: robotu a systému vidění. Systémem vidění je kamera (2D nebo 3D) spolu s vyhodnocovací jednotkou (často PC nebo CVS) nebo přímo inteligentní kamera. Toto propojení není v současné době často triviální. Pro správné fungování robot vision je důležité také sjednotit souřadné systémy obou zařízení.

Aplikací robot vision u průmyslových robotů je především nalezení objektu pro následné uchopení a manipulaci, což je například vybírání beden (tzv. bin picking, uvedený níže) [84]. Cílem může být také technologická operace např. sváření (nalezení místa pro svar a jeho kontrolu, kap. 4.1.1), lepení (nanesení lepidla), nanášení barev, montáž atd. V případě servisní robotiky jsou aplikace ještě širší a lze je důsledněji spojit s prvky učení a umělé inteligence.

**Aplikace bin picking** jsou žádanou aplikací s vysokým potenciálem úspory pracovních sil a s ohledem na sofistikovaný princip řešení je jasným aplikačním prostředkem v rámci realizace záměrů koncepce Průmyslu 4.0 v robotizaci výroby. Problematika vybírání beden je studována již více než 25 let a řešení je již několik let nabízeno výrobcům. Na odborných veletrzích se lze setkat s mnoha ukázkami a je tak navozen dojem již vyřešeného problému. Nasazení bin picking není ovšem v průmyslové praxi zatím příliš rozšířeno. Jak se ukazuje, je třeba překonat a vyřešit několik problémů. Vedle technických je to i cena a s tím spojená návratnost.

Jedná se o aplikaci, která pro své bezproblémové fungování potřebuje několik správně zvolených, nastavených (naprogramovaných) zařízení, která musí zajistit bezproblémovou komunikaci (Obr. 5.35). Jedná se o:

- robot,
- kamerový systém (případně další senzory) s řídicí jednotkou (většinou na bázi PC),
- efektor (chapatlo),
- periferní zařízení,
- systém osvětlení,
- bezpečnostní prvky,
- komunikace s okolím atd.



*Obr. 5.35 Pohled na experimentální pracoviště na TUL*

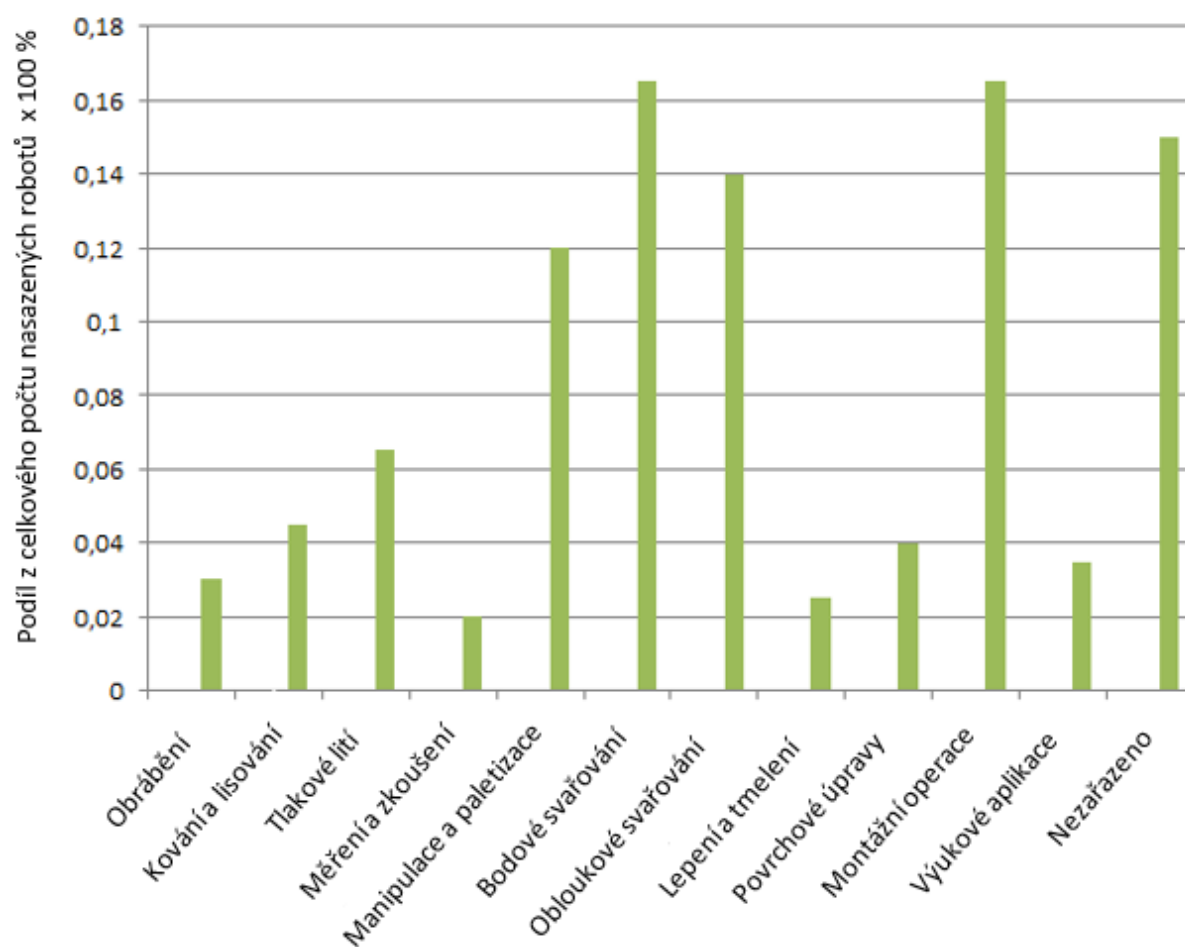
Jak je zřejmé, tak problematika bin picking nemůže být redukována jen na propojení kamerového systému s robotem. Velmi důležitý je také efektor, který musí umět redukovat odchylky od získaných souřadnic manipulovaného objektu. Schopnost redukovat tyto nepřesnosti má zpětně vliv na požadovanou přesnost získaných souřadnic a otočení objektu v prostoru a tedy má vliv i na cenu kamerového systému. Pochopení tohoto vztahu je klíčové pro úspěšný návrh spolehlivého, robustního a cenově optimalizovaného systému pro vybírání beden.

Pro aplikace bin picking jsou většinou používány angulární roboty [84]. V případě aplikací vyžadujících spolupráci s člověkem jsou dnes voleny kooperující roboty, které jsou relativně bezpečné a nevyžadují uzavření robotu do zabezpečených prostor. Požadavky na robot pro bin picking jsou, vedle potřebného manipulačního prostoru a nosnosti (včetně hmotnosti efektoru), také vhodné komunikační rozhraní a řídicí systém umožňující komunikaci s dalšími zařízeními atd.

## 6 Aplikační oblasti průmyslových robotů

V dnešní době prakticky není odvětví průmyslu, které by nebylo zasaženo fenoménem robotizace [85]. Roboty se ve stále větší míře prosazují i v nevýrobním nasazení, v terciární sféře – sektor služeb, ve zdravotnictví, v sociálních službách atd., kde se tyto roboty označují jako roboty servisní.

Pokud jde o aplikační nasazení průmyslových robotů, je možné rozdělit jednotlivé průmyslové oblasti a podíl realizovaných robotizovaných technologických pracovišť (RTP) v souladu s [86] takto (Obr. 6.1).



Obr. 6.1 Průmyslové oblasti a podíl realizovaných technologických pracovišť [86]

V tomto studijním materiálu je podán pouze triviální přehled hlavních odvětví nasazení a pro jednotlivá vybraná odvětví je provedena charakteristika, ukázány požadavky na manipulační zařízení (robot) a požadavky na technologická zařízení a pomocné prostředky, tzv. periferie. Postupně jsou ukázány tyto oblasti:

- 1) Robotizovaná manipulace u obráběcích strojů.
- 2) Robotizované výrobní systémy pro oblast tváření.
- 3) Robotizace v oblasti objemového tváření.

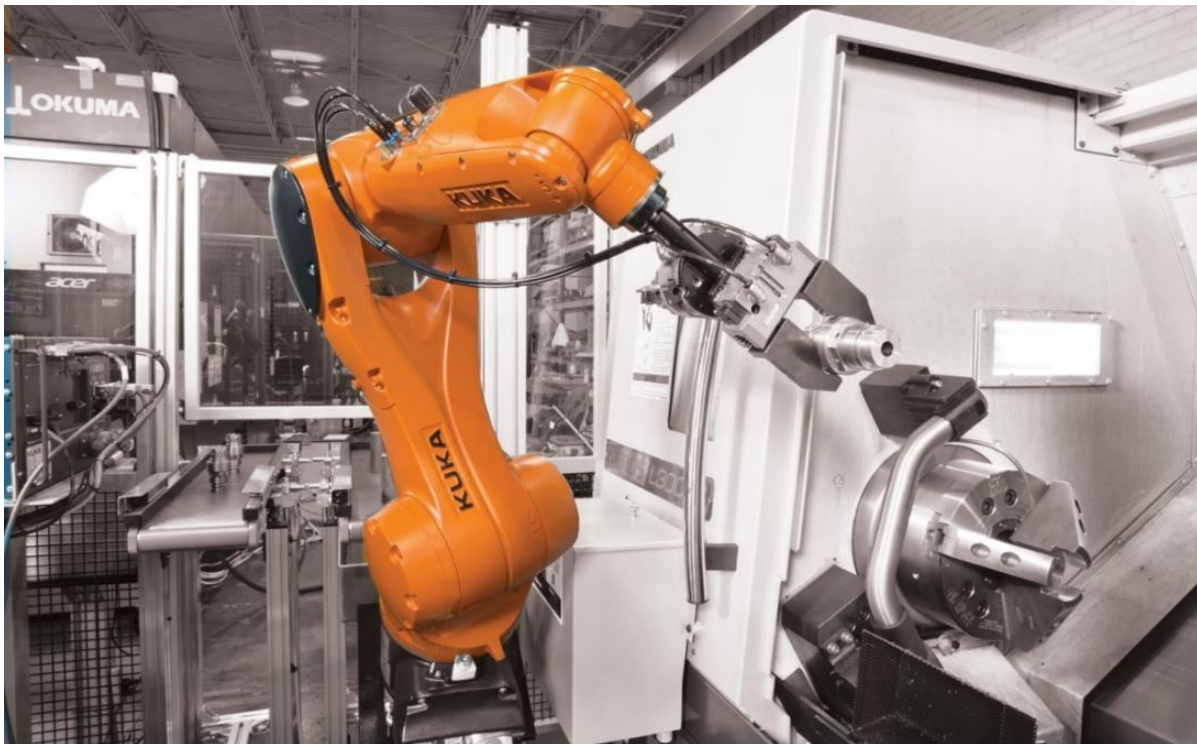
- 4) Robotizace obloukového svařování.
- 5) Robotizace bodového svařování.
- 6) Robotizace pro povrchové úpravy.
- 7) Robotizované výrobní systémy v montáži.

### 6.1 Robotizovaná manipulace u obráběcích strojů

V tomto případě se jedná o manipulační úlohu, příklad je na Obr. 6.2 a problematika byla také zmíněna v kap. 4.1.3 a kap. 4.5.

#### Specifika robotizovaných výrobních systémů v procesech obrábění:

- málo čtená manipulace, kdy technologické časy převyšují 20x až 50x dobu automatické manipulace,
- robotizovaná manipulace u obráběcích strojů je náročná na periferie a to i v případech, kdy se jedná o CNC obráběcí centrum (zásobníky, systémové palety apod.),
- zahrnuje širokou škálu PR, které svými parametry musí vyhovovat konkrétní aplikaci, tj. konfigurace, způsob řízení, velikost pracovního prostoru, opakovatelná přesnost polohování, nosnost atd., jsou v souladu s parametry obráběcího stroje nebo obsluhovaného obráběcího centra,
- jsou kladené vysoké nároky na úchopnou hlavici, která musí svými parametry umožnit eliminaci nepřesnosti polohování manipulačního zařízení a zajistit spolehlivé upnutí objektu v době manipulačního cyklu; úchopné hlavice jsou často konstruovány jako dvojchapadla s cílem eliminovat dobu manipulace.



Obr. 6.2 Manipulace robotem u CNC obráběcího centra

**Tři základní typy flexibilních výrobních systémů (Flexible Manufacturing System , FMS) pro obrábění:**

- 1) Fázové (dávkové) struktury RTP – výrobní proces je organizovaný podle technologické podobnosti výrobních zařízení, skladba sortimentu se velmi často mění.
- 2) Skupinová struktura RTP – tvoří se skupiny podobných součástek z hlediska technologického postupu a popřípadě sledu manipulačních operací.
- 3) Proudová struktura RTP – charakteristická je specializace na jeden nebo několik málo výrobků, rozmístění pracovišť odpovídá výrobnímu toku s minimalizací čekací doby (mezioperačních zásob).

**Strukturální typy RTP:**

- systémy s integrovanou strukturou RTP – PR je součástí obráběcího stroje (centra) – velmi moderní trend,
- pilotové (hnízdové) uspořádání, kdy robot vykonává více obsluhu výrobních strojů a periférií umístěných na radiálních paprscích – v zásadě již překonaná koncepce,
- pojezdové uspořádání PR – robot obsluhuje výrobní zařízení z pojezdového ústrojí většinou shora (PR zavěšen na pojezdu) – efektivní z hlediska spotřeby místa.

**TRENDY:**

- obráběcí centra s účelovými roboty zabudovanými do konstrukce stroje,
- modulární stavba účelových robotů a manipulátorů,
- systémové palety a modulární periferie (především dopravníky a zásobníky),
- obrábění na jedno upnutí (sdružování soustružnických a frézařských a dalších obráběcích operací do jednoho stroje), což vede k vyšší přesnosti – trendem **je eliminace manipulačních operací!!!**

Vedle automatizace manipulačních operací CNC obráběcích center se dnes roboty aplikují také jako systémy pro obrábění méně rozměrově náročných výrobků (přesnost 0,05 ÷ 0,1 mm) větších rozměrů. Více v kap. 4.1.3.

## **6.2 Robotizované výrobní systémy pro oblast tváření**

Tvářecí procesy z hlediska automatizace výrobních systémů je vhodné rozdělit na:

- a) výrobní systémy pro plošné tváření (poněkud nepřesně lisování plechů);
- b) výrobní systémy pro objemové tváření.



**a) Robotizace v oblasti plošného tváření**

**Charakteristické problémy v oblasti plošného tváření:**

- vysoká kadence strojů a krátký výrobní cyklus,
- jednoduchá manipulační úloha často s rovinným charakterem,
- omezený pracovní prostor tvářecích lisů,
- vysoké nároky na rychlost manipulačního zařízení,
- malé nároky na přesnost,
- vysoké nároky na spolehlivost úchopné hlavičky atd.

**Požadavky na manipulační zařízení:**

- přes 80 % operací lze zabezpečit manipulátory s 2° volnosti (DOF),
- možnost uplatnění PR s jednoduchým PTP (sekvenčním, point to point) řízením,
- rychlost pohybu v horizontální rovině v intervalu  $0,5 \div 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , maximálně až  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- důraz na zkrácení pohybové sekvence – pracovního cyklu,
- časté jsou struktury integrálních manipulátorů s vnějším pohonem od tvářecího lisu,
- velmi častá jsou pracoviště s parciální vazbou PR (postupové výlisky),
- nosnost PR nejčastěji 1 – 5 kg, výjimečně až desítky kg,
- opakovatelná přesnost polohování 0,5 až 1,0 mm bývá postačující,
- pneumatické a elektro – pohony.

**TRENDY:**

- automatické linky s modulárními manipulátory,
- víceramenné manipulátory s vnitřním pohonem,
- automatizované tvářecí lisy se zabudovaným účelovým manipulátorem.

**b) Robotizace v oblasti objemového tváření (kování) a ve slévárnách (Obr. 6.3)**

**Charakteristické problémy robotizace objemového tváření:**

- velmi těžké pracovní podmínky s teplenou expozicí a exhalacemi,
- tepelné zatěžování mechanismů PR a úchopných hlavic,
- značný rozsah hmotností výrobků,
- značné rozdíly ve specifických požadavcích jednotlivých aplikací.

**Požadavky na PR a komponenty RTP:**

- PR s 3 až 6° volnosti v prostoru,
- ochrana mechanismů PR proti tepelné zátěži a proti znečištění,
- robustnost a odolnost úchopných a technologických hlavic.



Obr. 6.3 Těžký robot pro odpichování ve slévárně

### 6.3 Robotizace obloukového svařování

Svařovací procesy byly již zmíněny v kap. 4.1.1, která je věnována efektorům. Ukázka pracoviště je na Obr. 6.4.

#### **Charakteristické problémy RTP pro obloukové svařování**

- jedná se o nejrozšířenější oblast technologického nasazení PR,
- je nutné respektovat technologické zvláštnosti:
  - vysoká rozmanitost objektů svařování,
  - požadavky na přesnost svařovaných dílů,
  - přístupnost svařovaného místa,
  - nutnost stanovení referenčních bodů,
  - omezení tvarů objektů,
- nutnost svařování v ochranné atmosféře (MIG, MAG, TIG metody).



Obr. 6.4 RTP pro obloukové svařování pod ochrannou atmosférou s polohovadly obrobků

**Požadavky na PR a pomocná zařízení:**

- vysoké nároky na pohybové a orientační schopnosti PR,
- nároky na adaptivitu PR,
- nároky na periferie – **polohovadla**,
- vysoké nároky na kvalitu svářecího zařízení atd.,
- využívají se především antropomorfní (angulární) struktury PR s min. 6° volnosti.

**Přednosti RTP obloukového svařování:**

- vysoká kvalita svarů s vyloučením subjektivních vlivů,
- vysoká produktivita práce (2 –3 směnný provoz),
- snížení provozních nákladů,
- vysoká míra flexibility pracoviště,
- možnost využívání typových projektů RTP,
- možnost efektivního navrhování izolovaných pracovišť,
- vysoká míra bezpečnosti a ochrany zdraví obsluhy atd.

**Značná pozornost je věnována stanovování výrobnosti:**

- a) stanovení délky svarů,
- b) návrh rychlosti svařování (např. pro tl. 1 až 2 mm  $v = 1000$  mm/min, tl. 10 až 20 mm  $v = 300$  mm/min),
- c) stanovení počtu svarků,
- d) porovnání s ručním svařováním, což je základ hodnocení ekonomické efektivity.

**TRENDY:**

- zavádění nových technologických postupů,
- široká nabídka typových polohovadel,
- zavádění a automatizace kontrolních činností,
- rozšiřování možností adaptivity PR,
- uplatňování nových typů senzorů (využívání laserů).

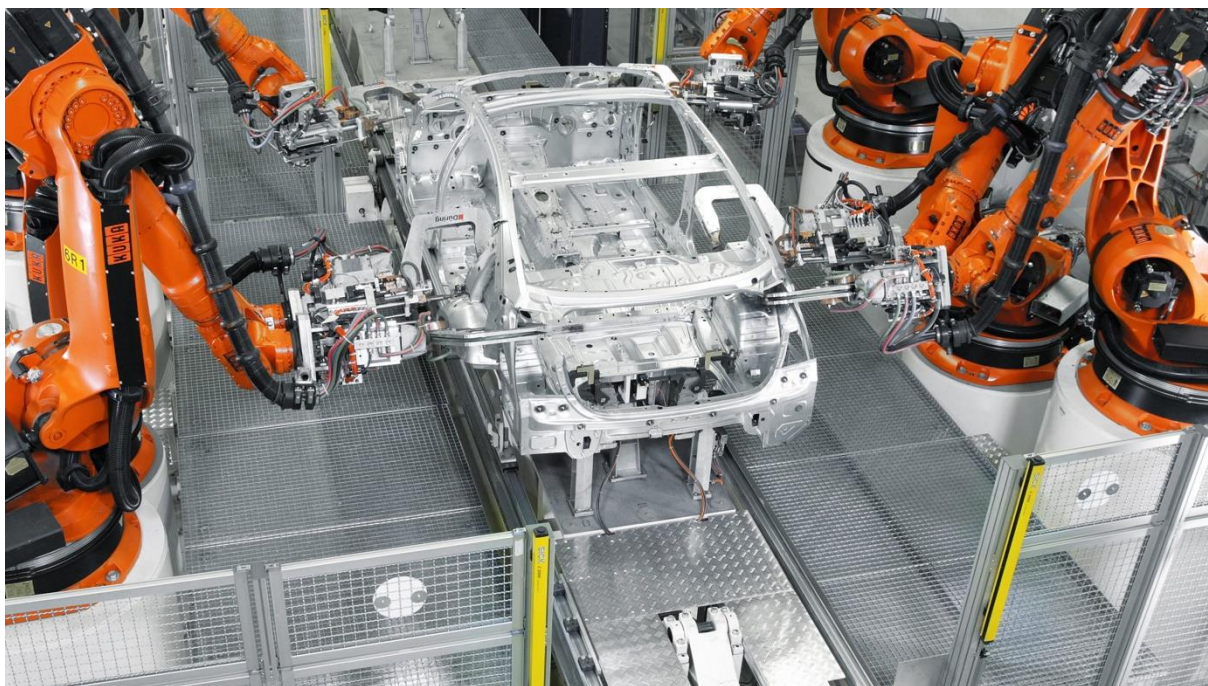
## 6.4 Robotizace bodového svařování

Svařovací procesy byly již zmíněny v kap. 4.1.1, která je věnována efektorům. Příklad robotizovaného pracoviště z autoprávního je na Obr. 6.5.

**Charakteristika problémů RTP bodového svařování:**

- svařence jsou členité rozměrné objekty s rozmanitým tvarem a velikostí,
- nejčastější aplikace je svařování automobilových karoserií a jejich komponent,
- vysoké požadavky na přesnost svařenců,
- malá tuhost objektů (plechy mají velmi malou příčnou tuhost),
- vysoké nároky na přípravky,

- značná hmotnost svařovacích kleští,
- značné problémy s mezioperační manipulací (nárůst objemu svařenců oproti dílům).



Obr. 6.5 Bodové sváření robotem na lince výroby karoserií automobilů

**Požadavky na PR a pomocná zařízení:**

- velký pracovní prostor a pohybové schopnosti PR (zejména angulární struktury),
- vysoká požadovaná nosnost 40 – 60 kg (často 120 kg i více),
- vysoké zatížení zápěstí robotu 120 – 150 Nm,
- vysoká síla na kontakty řádově několik kN,
- opakovatelná přesnost polohování 0,5 až 1,0 mm,
- bodovací frekvence až 60 bodů/min,
- nutnost přivádění vysokých proudů (až 1 000 A periodicky),
- často se využívají výměnné systémy bodovacích kleští a úchopných hlavic (možnost kombinace technologických a manipulačních funkcí),
- vysoké nároky jsou kladeny na přípravky a kontrolní systémy.

**TRENDY:**

- zdokonalování technologických podmínek svařovacího procesu,
- zvyšování rychlosti a tuhosti PR,
- postupný přechod od konveyorové dopravy k automaticky řízeným a autonomním systémům, jedná se často o aplikace mobilních robotů – AGV (automated guided vehicles – automaticky řízené vozíky) a AMR (autonomous mobile robots – autonomní mobilní roboty).

## 6.5 Robotizace pro povrchové úpravy

Stříkácí a lakovací hlavice byly již zmíněny v kap. 4.1.2. Ukázka pracoviště je na Obr. 6.6.

### **Charakteristika problémů RTP povrchových úprav:**

- široká škála aplikací (smaltování, nanášení barev, ochranné povlaky, glazování apod.),
- váže se na řadu rozličných technologických postupů,
- vysoké nároky na flexibilitu pracovišť,
- nutnost ochrany mechanismů robotů oproti nanášeným médiím.



Obr. 6.6 Stříkání plastových nárazníků robotem (firma Magna)

### **Požadavky na PR a periferie:**

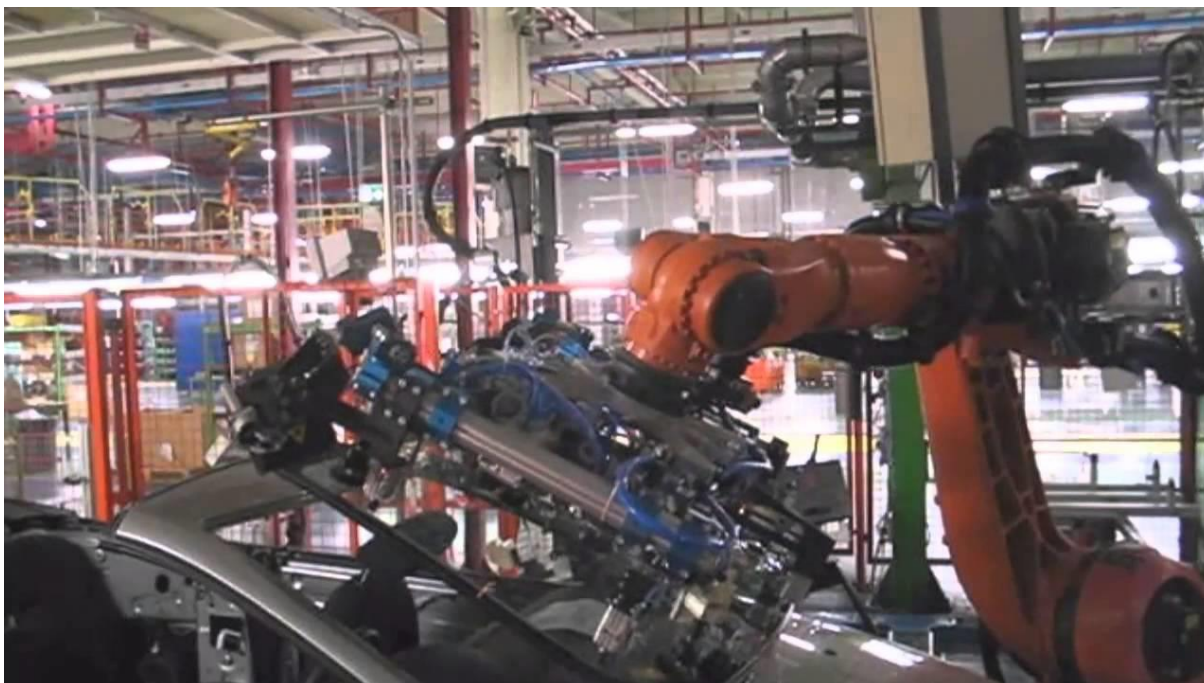
- PR s 5 až 6° volnosti, objem pracovního prostoru 6 – 12m<sup>3</sup>,
- pracovní rychlosti 1 – 3 m/s,
- nosnost robotů 12 – 30 kg,
- přesnost polohování 3 – 5 mm,
- Programování: přímý TEACH IN (play back).

## 6.6 Robotizované výrobní systémy v montáži

Montážní hlavice byly popsány v kap. 4.2. Příklad automatické montáže je na Obr. 6.7.

### Charakteristické problémy robotizované montáže:

- automatizovaná montáž zahrnuje řadu manipulačních a montážních operací propojených v jeden organický celek,
- jsou kladeny mimořádně vysoké nároky na přesnost PR i periferií,
- značné problémy jsou s odebíráním, polohováním a orientací široké škály objektů,
- některé montážní operace jsou spojeny s působením technologických sil na objekt,
- značné rozdíly v hmotnosti součástí a montážní sestavy,
- součásti se dělí na:
  - základní – nosné,
  - funkční a
  - spojovací.
- často je nutná rekonstrukce výrobku s respektováním požadavků na usnadnění automatické montáže:
  - Minimalizace počtu prvků montážní sestavy (zejména funkční a spojovací součásti),
  - Priorizace a zachování tzv. hlavního montážního směru (eliminují se spojovací příčně montované prvky – šrouby, čepy, kolíky apod.),
  - Musí se vytvořit možnost jednoznačného a přesného upnutí základní součásti;
  - Často se vytváří zámkové a nerozebíratelné spoje atd.



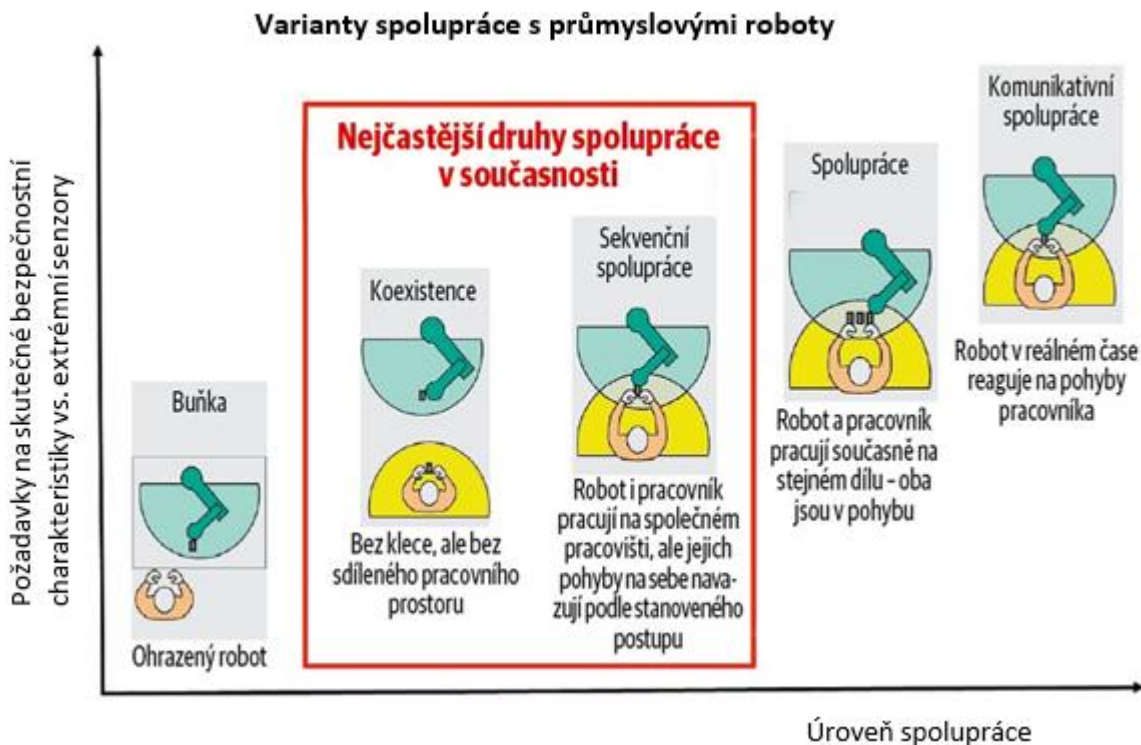
Obr. 6.7 Příklad automatické montáže čelních automobilových skel

**Je vhodné robotizovanou montáž rozdělit do pěti základních etap:**

1. **ETAPA – odebrání objektu montáže ze vstupního místa**, popř. identifikace tvaru a polohy objektu.
2. **ETAPA – orientace objektu v prostoru**, její charakteristiky mají často pravděpodobnostní charakter, nároky na orientaci rostou s rostoucím počtem prvků asymetrie.
3. **ETAPA – vkládání objektu do pracovní polohy**, při čemž nesmí dojít ke ztrátě orientace.
4. **ETAPA – vlastní montážní operace**, její úspěšnost je podmíněna zejména přesností součástí, zde se rozlišují dva případy:
  - montáž je realizovatelná bez nutnosti korekčních pohybů,
  - montáž vyžaduje korekční pohyby a informace z vision systému.
5. **ETAPA – přemístění montovaného výrobku z montážního místa**, zde je kritická hmotnost výrobku; často se provádí pomocí dalšího manipulačního zařízení.

**TRENDY:**

- velmi intenzivní rozvoj kvantitativně i kvalitativně,
- častá aplikace robotů typu SCARA a robotů s kartézskou konfigurací polohovacího ústrojí,
- častá je aplikace systémů automatické výměny efektorů (chapadel i technologických hlavic),
- vytvářejí se modulární montážní buňky,
- častá je kombinace automatické montáže a pracovišť s ruční obsluhou v rámci FMS,
- právě zde se začíná prosazovat bezbariérová komunikace robotů s člověkem, Obr. 6.8 (tzv. kolaborativní robotika).



Obr. 6.8 Ukázka postupného zvyšování nároků na úroveň kooperace člověka a robotu (původce Bauer et al. (2016), překlad <https://technickytydenik.vshcdn.net/obrazek/5cee1557af592/1.jpg>)

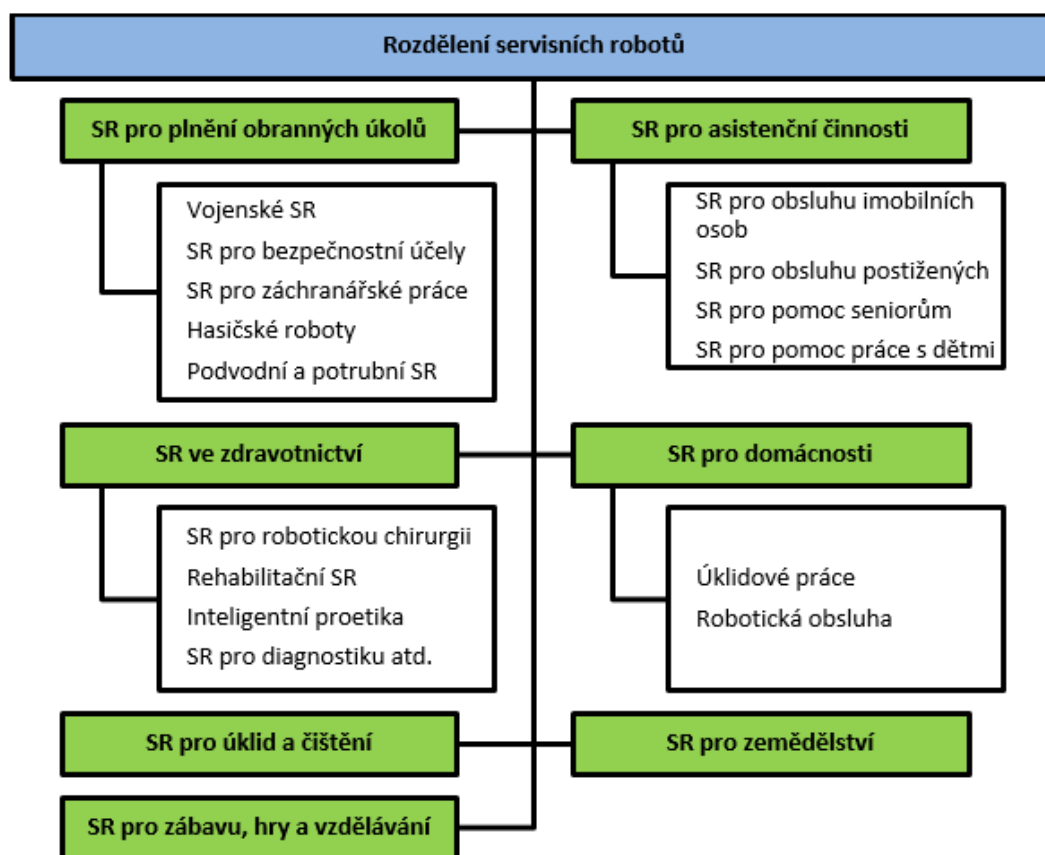
## 7 Přehled a charakteristika mobilních a servisních robotů

Servisní roboty (SR) jsou v současné době předmětem extrémně rychlého vývoje, kdy dopady aktivit Industry 4.0 se rychle přenášejí do nevýrobní sféry a roboty se prosazují do běžného života [81].

V roce 1994 definoval prof. R. D. Schraft servisní robot jako: „ Pohyblivé manipulační zařízení, které je volně programovatelné a vykonává úlohy a služby částečně nebo zcela automaticky. Tyto úlohy a služby nemusí být nutně spojeny s průmyslovou výrobou a nemusí jít nutně o práci s materiálními prostředky, jak je tomu u typických průmyslových robotů. Doménou činnosti servisních robotů jsou zejména služby lidem a služby při správě a údržbě nemovitostí.“ Tato poměrně stará, ale trefná definice se prosadila v souladu s návrhy Fraunhoferova institutu IPA (Institut pro výrobní techniku a automatizaci) a mezinárodní federace IFR, do návrhu definice servisního robotu podle normy ISO 8373:2012:

„**Servisní robot** je volně programovatelné mobilní zařízení, jež částečně nebo plně automaticky vykonává úkony, které nejsou určené přímo k průmyslové výrobě produktů, nýbrž poskytují lidem a zařízením služby [21].“ Norma přitom rozlišuje dvě kategorie – *osobní servisní roboty* a *profesionální servisní roboty*.

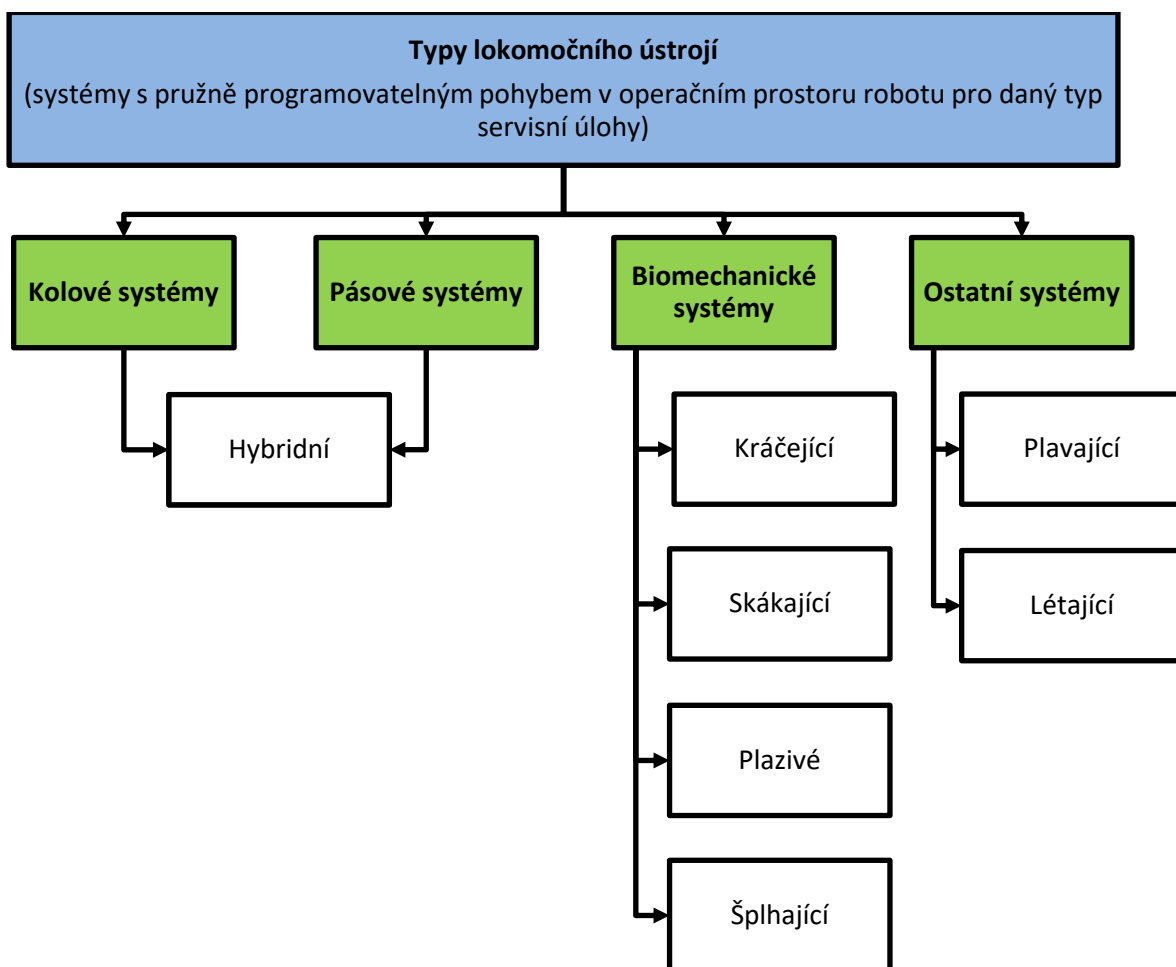
Servisní robotika byla již zmíněna v kap. 2. Rozdělení servisních robotů dle aplikací je na Obr. 7.1.



Obr. 7.1 Rozdělení servisních robotů podle převažujících aplikací



Servisní roboty jsou částečně nebo plně autonomní a vesměs jsou vybaveny mobilní platformou s různými typy lokomočního ústrojí, zajišťující jeho pohyb v obslužném prostředí (přehled na Obr. 7.2) [21].



Obr. 7.2 Přehled typů lokomočního ústrojí servisních robotů

### 7.1 Trendy vývoje a aplikační oblasti nasazení servisních robotů

Servisní roboty se uplatňují v nevýrobních procesech a jejich největší nárůst byl zaznamenán v oblasti servisních bezobslužných robotů pro plnění obranných úkolů, a to buď ryze vojenského a obraného charakteru (Obr. 7.3, Obr. 7.4 a Obr. 7.5) anebo pro bezpečnostní účely, záchranné akce a boj s ohněm (Obr. 7.14).

V současné době má vysoký potenciál použití servisní robotiky ve formě asistenční techniky pro seniory, postižené a nemohoucí osoby (Obr. 7.6). Další významnou oblastí nasazování SR je využití v domácnosti. V profesionální oblasti servisní robotiky jsou to roboty pro zásobování, sklady a logistiku. Servisní roboty se prosazují do tzv. kolaborativní robotiky, kde dochází k bezprostřední interakci mezi člověkem a robotem. Klíčová je zde otázka bezpečnosti – proto těmto robotům říkáme také soft-roboty, popř. HRC roboty (Human-robot collaboration).

Servisní roboty postupně ovládají oblasti s požadavkem vysoké přesnosti nebo tam, kde je nutné ulehčit pracovní proces pracovníkům, zde je typickým příkladem zdravotnictví. V oblasti lékařství a zdravotnických služeb mají roboty široké uplatnění. Časté využití servisní robotiky je v tzv. robotické chirurgii, tedy v chirurgii vedené či asistované robotem (např. roboty Da Vinci americké společnosti Intuitive Surgical Inc, Obr. 7.7).

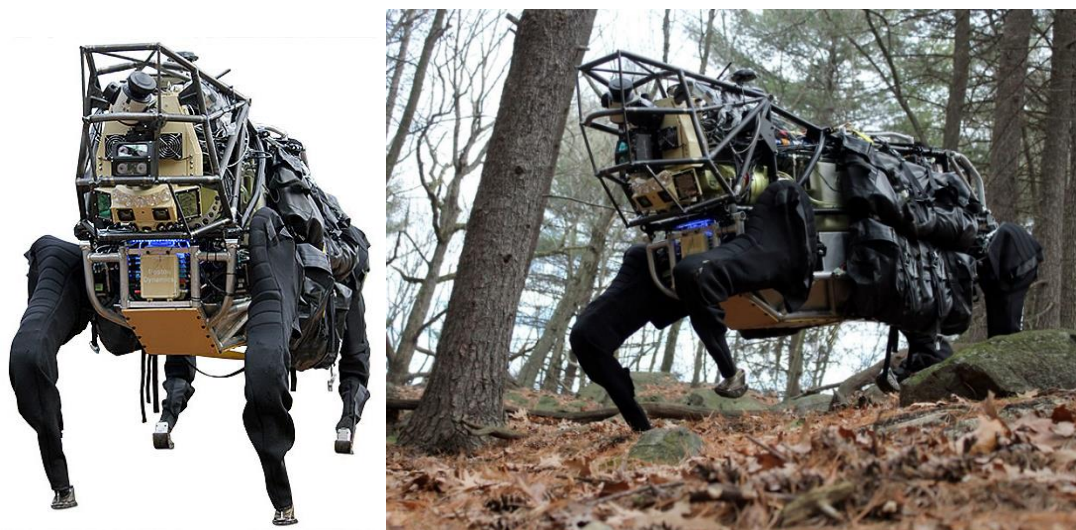
Trendem jsou servisní roboty, pro komunikaci s lidmi (Obr. 7.8), určené na pomoc seniorům a lidem se zdravotním postižením (Obr. 7.9). SR slouží často pro rehabilitační účely s cílem zlepšit fyzické a kognitivní funkce klientů. Dnes je časté využití SR jako inteligentní protězy – exoskeletony (Obr. 7.10). Značný rozvoj je také v oblasti humanoidních robotů, které mohou mít mnoho účelů a vedle pomoci v domácnosti, prezentačních a zábavních funkcí mohou mít také účely bezpečnostní a vojenské.

Profesionální servisní roboty jsou rovněž široce využívány v zemědělství a při úklidu a čištění. Rychle rostou i počty servisních robotů používaných ke zcela automatizované sklizni – zatím ale jen vybraných zemědělských plodin (Obr. 7.11). Zemědělské roboty představují více než 1/3 celé profesionální robotiky. Roboty by sice mohly převzít v zemědělství a lesnictví velké množství úkolů, jako jsou např. sklizeň, postřik, výsadba nebo prořezávání stromů, avšak tyto požadavky jsou příliš komplexní a výsledná řešení dosud velmi drahá.

Roste poptávka po stavebních a demoličních systémech, robotech pro profesionální čištění (Obr. 7.12), kontrolu a údržbu systémů (Obr. 7.13), robotech určených pro záchranářské práce a podvodní systémy.

V případě servisních robotů pro domácnost již zdaleka nejde pouze o robotické vysavače, sekačky trávy, čističky bazénů, ale zejména o roboty pro zábavu a hry a vzdělávací roboty.

Na vzestupu jsou autonomní dopravní prostředky bez řidiče určené pro intralogistiku, pro ně je určující vospělost navigační techniky, která umožňuje mobilním robotům autonomní pohyb v nestrukturovaném prostředí, kde pro dané objekty plní úlohy: rozpoznat, interpretovat, klasifikovat a bezpečně sledovat.



Obr. 7.3 Vojenský robot firmy Boston dynamics pro transport vojenského nákladu



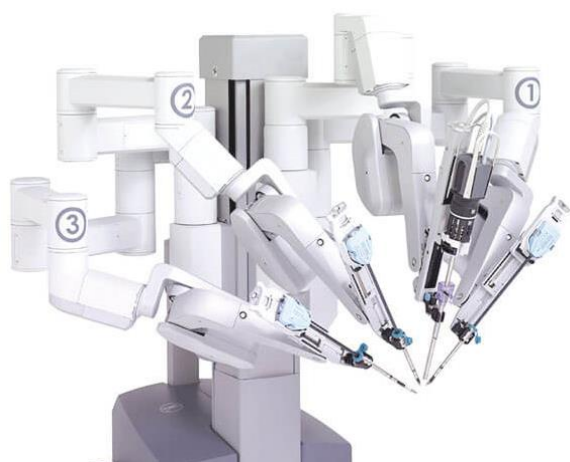
*Obr. 7.4 Vize vojenského robotu*



*Obr. 7.5 Současné možné provedení vojenského robotu*



Obr. 7.6 Servisní robot jako vozík pro invalidy, zdroj: <https://www.gennymobility.com>



Obr. 7.7 Servisní robot pro zdravotnictví – chirurgický robot Da Vinci



Obr. 7.8 Obslužný robot do domácnosti a pro barové provozy



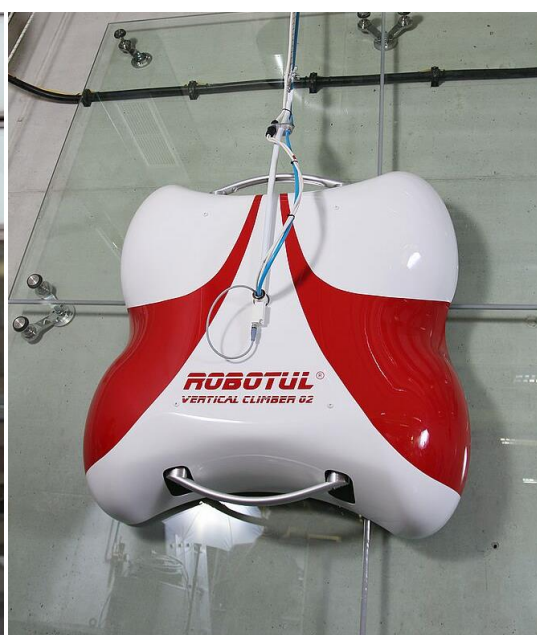
Obr. 7.9 Servisní robotika pro rehabilitace, zdroj: <https://www.omicsonline.org/open-access/a-brief-review-on-robotic-exoskeletons-for-upper-extremity-rehabilitation-to-find-the-gap-between-research-porotype-and-commercial-2168-9695-1000177.pdf>



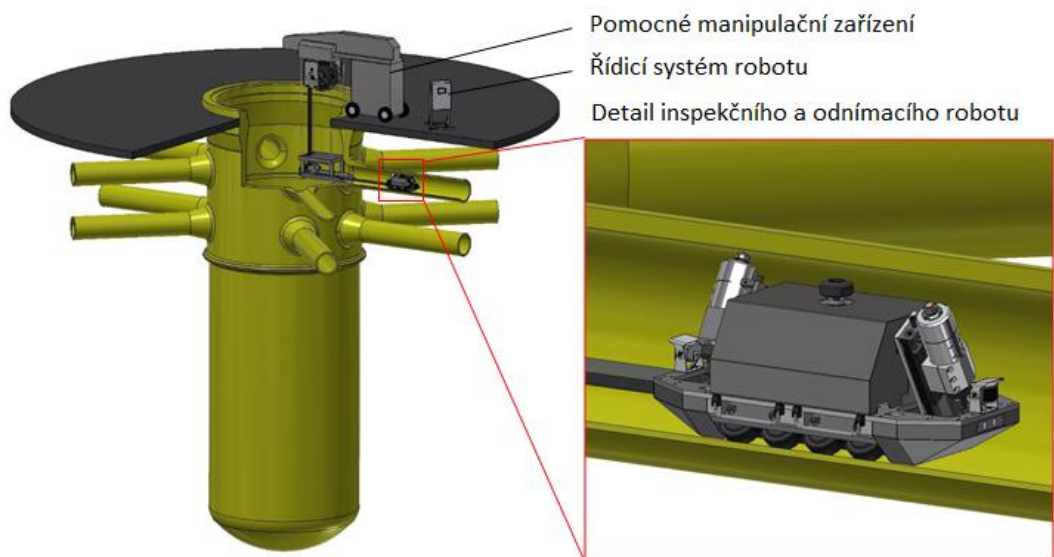
*Obr. 7.10 Servisní robot ve formě exoskeletonu*



Obr. 7.11 Zemědělské servisní roboty



Obr. 7.12 Roboty pro práci na vertikálních stěnách (kontrola a čištění)



Obr. 7.13 Robot pro inspekci a odebrání kontaminovaných vzorků z primárního potrubí vyřazovaného jaderného reaktoru



Obr. 7.14 Hasičský robot



## 8 Závěr

Soustavné zlepšování technologií, výrobních postupů, nástrojů a v posledních staletích i strojů probíhá nepřetržitě od dob, co člověk začal cíleně vykonávat práci. Současná doba není v tomto jiná a lze se v tomto z historie poučit. Přestože stroje „berou práci“ lidem, stále více kvalifikovanější činnosti zbývá na člověka. Člověk pracuje méně, ale bohatství společnosti se exponenciálně zvyšuje. Průmyslové a servisní roboty a obecně automatizaci je tak vhodné brát jako další stupeň evoluce výroby, která přináší nové výzvy, mění svět kolem sebe a mění také nás.

Znalosti spojené se současným stavem a trendy v problematice robotiky a automatizace jsou proto velmi cenné a důležité pro moderní konstruktéry a technology. Jsme si vědomi, že tyto studijní texty jsou vcelku rozsáhlé, ale ve své podstatě jsou jen základem pro další studium. Jednotlivé oblasti je dobré dále studiem rozvíjet, a to i nad rámec studia na univerzitě, především pak v praxi, při řešení konkrétních úkolů a výzev.

Neustálé vzdělávání je proto důležité pro podchycení nových trendů a nových řešení, která vyžadují mnohem více než jindy vzájemnou komunikaci lidí napříč týmy i průmyslovými firmami. Potřebné je tak rozumět i oblastem, které nejsou vyhrazeny pro technology nebo konstruktéry. Těmito oblastmi je například také mechatronika, která je s uvedenou problematikou úzce spojena a v tomto předmětu v mnoha oblastech zmiňována.

Moderní strojařina je výzvou a je úžasné být při tom a podílet se na současné překotné evoluci.

## 9 Literatura

- [1] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU. Iniciativa průmysl 4.0, [online]. MPO, © 2019 [cit. 2019-08-25]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/53723/64358/658713/priloha001.pdf>
- [2] KOVANDA, L. KOMENTÁŘ: Blamáž jménem Průmysl 4.0. In: iDnes [online]. 26. 8. 2017 [cit. 2018-09-25]. Dostupné z: [https://ekonomika.idnes.cz/prumysl-4-0-ctvrta-prumyslova-revoluce-iniciativa-mpo-komentar-kovanda-13i-/ekonomika.aspx?c=A170825\\_144424\\_ekonomika\\_ane](https://ekonomika.idnes.cz/prumysl-4-0-ctvrta-prumyslova-revoluce-iniciativa-mpo-komentar-kovanda-13i-/ekonomika.aspx?c=A170825_144424_ekonomika_ane)
- [3] Citace. In: Wikipedia: Industrial Revolution [online] 15. 9. 2019, last modified 7. 2. 2020 [cit. 2018-11-15]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial\\_Revolution](https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_Revolution)
- [4] ZAVORAL, P. Druhý věk strojů, třetí platforma aneb čtvrtá průmyslová revoluce. In: Hospodářské noviny [online]. 25. 4. 2016 [cit. 2017-09-25]. Dostupné z: [http://ictrevue.ihned.cz/c3-65264050-0ICT00\\_d-65264050-druhy-vek-stroju-treti-platforma-aneb-ctvrta-prumyslova-revoluce](http://ictrevue.ihned.cz/c3-65264050-0ICT00_d-65264050-druhy-vek-stroju-treti-platforma-aneb-ctvrta-prumyslova-revoluce)
- [5] ROSER, M. Economic Growth. In: Our World in Data [online]. [cit. 2017-09-25]. Dostupné z: [ourworldindata.org/economic-growth#output-per-capita-of-the-uk-economy](http://ourworldindata.org/economic-growth#output-per-capita-of-the-uk-economy)
- [6] HOTAŘ, V. Jak může změnit sklářský průmysl 4. průmyslová (r)evoluce? Sklář a keramik. 2017, roč. 67, č. 9–10, s. 191–197.
- [7] HOTAŘ V., J. ŠAVKA a O. MATÚŠEK. Současné trendy 3D tisku ze skla. Sklář a keramik. 2018, roč. 68, č. 7–8, s. 147–152.
- [8] IFR. World Robotics Report 2016: European Union Occupies Top Position in the Global Automation Race [online]. 29. 9. 2016 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: [ifr.org/img/uploads/2016-09-29\\_Press\\_Release\\_IFR\\_World\\_Robotics\\_Report\\_2016\\_ENGLISH.pdf](http://ifr.org/img/uploads/2016-09-29_Press_Release_IFR_World_Robotics_Report_2016_ENGLISH.pdf)
- [9] ISO. Terms and definitions. Basic principles. ISO.org [online]. 2015 [cit. 2019-01-23]. Dostupné z: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>
- [10] Citace. In: Wikipedia: Big Data [online] 15. 11. 2019, last modified 5. 2. 2020 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Big\\_data](https://en.wikipedia.org/wiki/Big_data)
- [11] PROCHÁZKA, M. Data mining: jiný pohled na problém. In: VTM [online]. [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://vtm.e15.cz/aktuality/data-mining-jiny-pohled-na-problem>
- [12] Citace. In: Wikipedia: Sensor Fusion [online] 15. 11. 2019, last modified 18. 12. 2019 [cit. 2019-01-12]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor\\_fusion](https://en.wikipedia.org/wiki/Sensor_fusion)
- [13] MORGAN, J. A Simple Explanation Of 'The Internet Of Things', In: Forbes [online]. 13. 5. 2014 [cit. 2017-09-25]. Dostupné z: [www.forbes.com/sites/jacobmorgan/2014/05/13/simple-explanation-internet-things-that-anyone-can-understand/#575715911d09](http://www.forbes.com/sites/jacobmorgan/2014/05/13/simple-explanation-internet-things-that-anyone-can-understand/#575715911d09)
- [14] PÁNEK, F. Jaká bude podle Bosche čtvrtá průmyslová revoluce?, In: iDnes . 13. 5. 2014 [cit. 2017-09-25]. Dostupné z: <https://sdeleni.idnes.cz/jaka-bude-podle-bosche-ctvrta->

prumyslova-revoluce-fso-/budejovice-sdeleni.aspx?c=A151015\_140451\_budejovice-sdeleni\_ahr

- [15] ZELENÝ, M. Mysleme globálně, jednejme lokálně, Téma na červen: Masová customizace. In: MM Průmyslové spektrum [online]. 8. 6. 2016 [cit. 2017-09-25]. Dostupné z: [www.mmspektrum.com/clanek/mysleme-globalne-jednejme-lokalne-tema-na-cerven-masova-customizace.html](http://www.mmspektrum.com/clanek/mysleme-globalne-jednejme-lokalne-tema-na-cerven-masova-customizace.html)
- [16] MATERNA J.: Deep Learning: budoucnost strojového učení? In: Sblog [online]. 9. 3. 2013 [cit. 2017-09-25]. Dostupné z: <https://blog.seznam.cz/2013/01/deep-learning-budoucnost-strojoveho-uceni/>
- [17] BRDIČKA, B. Co dokáží stroje schopné hlubokého učení. In: RVP Metodický portál [online]. 25. 4. 2016 [cit. 2017-09-25]. Dostupné z: [spomocnik.rvp.cz/clanek/20855/](http://spomocnik.rvp.cz/clanek/20855/)
- [18] KOLÍBAL, Z. et al. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Akademické nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [19] IFR. World Robotics Service Robots [online]. 19. 9. 2019 [cit. 2019-10-25]. Dostupné z: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/service-robots-global-sales-value-reaches-12.9-billion-usd>
- [20] BARTOŠÍK, P. Co je to servisní robotika a jaké jsou její perspektivy? AUTOMA [online]. 2014, č. 5. [cit. 2019-12-19]. Dostupné z: [https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/52496.pdf](https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52496.pdf)
- [21] HOTAŘ, V. et al. In: Youtube [online]. 31. 7. 2013 [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=ySBbWUhbHn0>
- [22] HOTAŘ, V. Základy robotiky - video [DVD]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006.
- [23] NOF, S. Y. Handbook of industrial robotics. 2nd ed. New York: Wiley, 2007. ISBN 0471177830.
- [24] SKAŘUPA, J. a V. MOSTÝN. Teorie průmyslových robotů. Košice: Edícia vedeckej a odbornej literatúry – Strojnícka fakulta TU v Košiciach, 2000. ISBN 80-88922-35-6.
- [25] TALÁCKO, J. a R. MATIČKA. Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů. Praha: ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01291-3
- [26] NOVOTNÝ, F. a M. HORÁK. Konstrukce robotů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN: 978-80-7494-216-7.
- [27] SKAŘUPA, J. Průmyslové roboty a manipulátory I. Ostrava: VŠB-TU v Ostravě, 2007. ISBN:978-80-248-1522-0.
- [28] LENARCIC, J., T. BAJD a M. M. STANIŠIĆ. Robot Mechanisms. Springer, 2013. ISBN 978-94-007-4521-6.
- [29] SKAŘUPA, J. Roboty a manipulátory I. Ostrava: VŠB-TU v Ostravě, 2002. ISBN 80-248-0044-6.
- [30] TAGHIRAD, H. D. Parallel Robots: Mechanics and Control. CRC Press, 2013. ISBN 978-1-4665-5576-1.

- [31] TSAI, L-W. Robot Analysis – The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. Wiley, 1999. ISBN 0-471-32593-7.
- [32] BURKOVIČ, J. a J. BABJAK. Výroba, provoz a zkoušení PR. Ostrava: VŠB-TU v Ostravě, 2009. ISBN 978-80-248-2127-6.
- [33] SKAŘUPA, J. a V. MOSTÝN. Metody a prostředky návrhu průmyslových a servisních robotů. Košice: Edícia vedeckej a odbornej literatúry – Strojnícka fakulta TU v Košiciach, 2002. ISBN 80-88922-55-0.
- [34] CRAIG, J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Pearson, 2005. ISBN 0-13-123629-6.
- [35] NOVOTNÝ, F. a M. HORÁK. Efektory průmyslových robotů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN: 978-80-7494-195-5.
- [36] KOPÁČEK, J. Pneumatické mechanismy Díl II, Řízení pneumatických systémů. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-24-80880-3.
- [37] Pneumatické řídicí systémy, Učebnice FESTO Didactic. Praha: ČVUT, 2016.
- [38] CERHA, J. Hydraulické a pneumatické mechanismy I. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006. ISBN 80-7372-067-1.
- [39] SMC. SMC training: Využití stlačeného vzduchu [CD]. Brno [cit. 2014-02-23].
- [40] Úvod do pneumatiky: Učebnice FESTO Didactic. Praha: ČVUT, 2016.
- [41] NOVOTNÝ, F. a M. HORÁK. Základy pneumatiky (Úvod do pneumatiky a Elektropneumatika) [DVD]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016.
- [42] SCHMID, D. et al. Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku. Praha: Europa-Sobotáles, 2005. ISBN 80-86706-10-9.
- [43] SPONG, M. W., S. HUTCHINSON a M. VIDYASAGAR. Robot Modeling and Control. Wiley, 2005. ISBN-13 978-0-471-64990-8.
- [44] SOUČEK, P. Pohony výrobních zařízení (Servomechanismy). Praha: ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01159-3.
- [45] GIRI, F. AC Electric Motors Control: Advanced Design Techniques and Applications. Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-33152-1.
- [46] JAULIN, L. Automation for Robotics. Wiley, 2015. ISBN 978-1-84821-798-0.
- [47] SOUČEK, P. Servomechanismy ve výrobních strojích. Praha: ČVUT, 2004. ISBN 80-01-02902-6.
- [48] NIKU, S. B. Introduction to Robotics – Analysis, Control, Applications. 2nd Ed. Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-60446-5.
- [49] FIROOZIAN, R. Servo Motors and Industrial Control Theory. Springer, 2014. ISBN 978-3-319-07274-6.

- [50] BARTOS, F. J. Lineární polohování s přímým pohonem dosahuje zralosti [on-line]. [cit. 2019-09-25]. Dostupné z: [www.controleng.com](http://www.controleng.com)
- [51] XIE, M. Fundamentals of Robotics. Singapore: World Scientific, 2003. ISBN 981-238-313-1.
- [52] MONKMAN, G., J. et al. Robot grippers. Weinheim: Wiley, 2007. ISBN 978-3-527-40619-7.
- [53] NOVOTNÝ, F. Podklady pro předmět robotika. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2016.
- [54] PALKO, A. a J. SMRČEK. Robotika – Koncové efektory pro priemyselné a servisné roboty. Košice, 2004. ISBN 80-8073-218-3.
- [55] MAREK, P. Robot pro pětiosé obrábění [online]. In: MM Průmyslové spektrum [online]. 22. 6. 2010 [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/robot-pro-petiose-obrabeni.html>
- [56] KUKA. Automatizační systémy od firmy KUKA [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/odvėtví/solutions-database?filters=2C7D2354B3354288B1842A90A60E6E96D9A046D7E4BD4787A06FF9C3ABE430AD>
- [57] TAČR, EPSILON: TH01031152. Nová technologie matování a prototyp strojního zařízení pro opracování povrchu skla. 2015 – 2017.
- [58] JARKOVSKÝ, T. Robotické obrábění prostorových dílů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. Bakalářská práce.
- [59] JÄGER. Katalog obráběcích vřeten: Chopper 2300-40 HSK S5 [online]. [cit. 2019-04-28]. Dostupné z: <https://www.alfredjaeger.de/en/chopper/11503003>
- [60] HORÁK, M. a F. NOVOTNÝ. Materials Having a High Degree of Adhesion for Gripping Elements Designing, Applied Mechanics and Materials. Applied Mechanics and Materials. 2014, vol. 613, s. 220-225.
- [61] HORÁK, M. Dynamická manipulace s plochým sklem. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008.
- [62] WOLF, A., R. STEINMANN a H. SCHUNK Grippers in Motion. Springer, 2005. DOI: 10.1007/3-540-27718-8
- [63] Horák, M. a F. Novotný. Suction Gripping Element. IPC: B 65 G 47/91, B 65 H 5/14, B 60 R 9/058. Česká Republika. Patent, CZ 302 959. 2011.
- [64] KREIDL, M. a R. ŠMÍD. Technická diagnostika: senzory - metody - analýza signálu. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-158-6.
- [65] FORMÁNEK J. Základní charakteristika a demonstrování základních principů měření veličin [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2015 [cit. 2019-08-23]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka/Data/ivk-mt-soubory/01-F.pdf>
- [66] FRADEN, J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs and Applications. 5th ed. Cham: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-19302-1.

- [67] KLOBOUČEK, J. Snímače v průmyslu. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. ISBN 978-80-7372-828-1.
- [68] HOTAŘ, V. Úvod do problematiky strojového vidění, část 1: Základní principy a hardware. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN: 978-80-7494-156-6.
- [69] HOTAŘ, V. Úvod do problematiky strojového vidění, část 2: Základy zpracování obrazu. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN: 978-80-7494-202-0.
- [70] HLAVÁČ, V. a M. SEDLÁČEK. Zpracování signálu a obrazu. 2. vydání. Praha: ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03110-0.
- [71] HOTAŘ, V. Pokročilé metody získání, interpretace obrazových dat a jejich aplikace v průmyslové praxi. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. Habilitační práce.
- [72] LNT SERVOTECHNIK. Resolvers [online]. Dostupné z: <https://www.ltn-servotechnik.com>
- [73] CURTIS, K. Použití ultrazvukových měničů pro měření vzdálenosti. In: DPS Elektronika od A do Z [online]. 2015 [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/mereni/id:20858/pouziti-ultrazvukovych-menicu-pro-mereni-vzdalenosti>
- [74] AEROPAN. Vzduchové měřicí přípravky [online]. [cit. 2018-01-11]. Dostupné z: <http://www.aeropan.eu/vyroby/vzduchova-meridla>
- [75] AUTOMATIZACE. Optické senzory přiblížení [online]. 2005 [cit. 2019-11-08]. <https://automatizace.hw.cz/clanek/2005121901>
- [76] HOTAŘ, V. a O. MATÚŠEK. Konfokální chromatické snímače pro aplikace ve sklářském průmyslu. Sklář a keramik. 2017, roč. 67, č. 3–4, s. 62–63.
- [77] STIL. Products [online]. 2017 [cit. 2019-01-05]. Dostupné z: <http://products.stil-sensors.com/?lang=EN>
- [78] VOLF, J. Taktilní senzory pro automatizaci. AUTOMA [online]. 2008, [cit. 2018-09-25]. Dostupné z: [https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf\\_articles/37544.pdf](https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/37544.pdf)
- [79] VOLF, J. et al. Pressure Distribution Measurement System PLANTOGRAF V12 and its Electrodes Configuration. Agronomy Research [online]. 2015, vol. 13, iss. 3, s. 732–738. [cit. 2018-01-22]. Dostupné z: [https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2015/05/13\\_3\\_11\\_B5.pdf#abstract-3470](https://agronomy.emu.ee/wp-content/uploads/2015/05/13_3_11_B5.pdf#abstract-3470)
- [80] KREIDL, M. Měření teploty – senzory a měřicí obvody. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 9788073001452.
- [81] TERMOKAMERA. Konstrukce termokamery [online]. [cit. 2017-08-01]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [82] ADEPT TURNKEY. High resolution camera Flare 48MP30-CX [online]. [cit. 2017-07-28]. Dostupné z: [http://www.adept.net.au/cameras/ioi/flare\\_48m.shtml](http://www.adept.net.au/cameras/ioi/flare_48m.shtml)
- [83] SVS–VISTEK. SVCam industrial cameras shr411CCX [online]. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.svs-vistek.com/en/industrial-cameras/svs-camera-detail.php?id=shr411CCX>

- [84] HOTAŘ, V. et al. In: Youtube [online]. 6.4.2018 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=s4x0AyEMhzc&feature=youtu.be>
- [85] HOTAŘ, V., M. HORÁK, a F. NOVOTNÝ. In: Youtube [online]. 6. 4. 2018 [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=b55jLUaAUAA&feature=youtu.be>
- [86] IFR. IFR World Robotics Presentation [online]. 18. 9. 2019 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://ifr.org/free-downloads/>

## ÚVOD DO AUTOMATIZACE A ROBOTIZACE VE STROJÍRENSTVÍ

Výukový text vznikl na základě zkušeností z výuky odborných předmětů na katedře sklářských strojů a robotiky. Skripta představují úvod do poměrně široké problematiky a je možné je chápat jako vhodný podklad pro znalosti, které budou studenty rozvíjeny v dalších letech. Text se opírá o současné poznatky z oboru a zmiňuje trendy v automatizaci a robotice.

Skripta jsou určena pro studenty Fakulty strojní Technické univerzity v Liberci i pro širokou odbornou veřejnost. Jsou doplňkovým studijním materiálem pro předměty bakalářského i navazujícího studijního programu. Skripta naleznou uplatnění během studia předmětu Automatizace a robotizace ve strojírenství pro studenty 1. ročníku bakalářského studijního programu B0715A270008 Strojírenství na Fakultě strojní Technické univerzity v Liberci.

© doc. Ing. František Novotný, CSc., Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D., Ing. Marcel Horák, Ph.D., Ing. Marie Stará, Ph.D., Ing. Michal Starý, Ph.D.

Recenzent	Doc. Ing. Radovan Holubek, Ph.D.
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci Studentská 1402/2, Liberec
Schváleno	Rektorátem TUL dne 26. 11. 2020, čj. RE 38/20
Vyšlo	V prosinci 2020
Počet stran	215
Vydání	1.
Rok prvního vydání	2020
ISBN	978-80-7494-545-8
Č. publikace	55-038-20



Název	Úvod do automatizace a robotizace ve strojírenství
Autoři	Doc. Ing. František Novotný, CSc., Ing. Vlastimil Hotař, Ph.D., Ing. Marcel Horák, Ph.D., Ing. Marie Stará, Ph.D., Ing. Michal Starý, Ph.D.
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci Studentská 1402/2, Liberec
Schváleno	Rektorátem TUL dne 26. 11. 2020, čj. RE 38/20
Vyšlo	V prosinci 2020
Počet stran	215
Vydání	1.
Rok prvního vydání	2020
ISBN	978-80-7494-545-8
Č. publikace	55-038-20

---

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou

