Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Základy automatizace

učební text

Jiří Tůma, Renata Wagnerová, Radim Farana, Lenka Landryová

Ostrava 2007

Recenze: prof. RNDr. Alena Lukasová, CSc.
Ing. Jaromír Škuta, Ph.D.

Název: Základy automatizace
Autor: Jiří Tůma, Renata Wagnerová, Radim Farana, Lenka Landryová
Vydání: první, 2007
Počet stran: 283
Náklad: -
Vydavatel a tisk: Ediční středisko VŠB – TUO

Studijní materiály pro studijní obor Bakalářské strojírenství fakulty strojní
Jazyková korektura: nebyla provedena.

Určeno pro projekt:
Operační program Rozvoj lidských zdrojů
Název: E-learningové prvky pro podporu výuky odborných a technických předmětů
Číslo: CZ.O4.01.3/3.2.15.2/0326
Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava
Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© Jiří Tůma, Renata Wagnerová, Radim Farana, Lenka Landryová
© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-1523-7

POKYNY KE STUDIU

Základy automatizace

Pro předmět 3. semestru oboru Bakalářské strojírenství jste obdrželi studijní balík obsahující

- integrované skriptum pro distanční studium obsahující i pokyny ke studiu
- CD-ROM s doplňkovými animacemi vybraných částí kapitol

Prerekvizity

Pro studium tohoto předmětu se předpokládá absolvování předmětů teoretického základu 1. ročníku BS na strojní fakultě v ČR.

Cílem předmětu

je seznámení se základními pojmy z oblasti automatizace.

Pro koho je předmět určen

Modul je zařazen do bakalářského studia studijního programu Bakalářské strojírenství, ale může jej studovat i zájemce z kteréhokoliv jiného oboru, pokud splňuje požadované prerekvizity.

Skriptum se dělí na části, kapitoly, které odpovídají logickému dělení studované látky, ale nejsou stejně obsáhlé. Předpokládaná doba ke studiu kapitoly se může výrazně lišit, proto jsou velké kapitoly děleny dále na číslované podkapitoly a těm odpovídá níže popsaná struktura.

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:

Čas ke studiu: xx hodin

Na úvod kapitoly je uveden **čas** potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.

Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat ...
- definovat ...
- vyřešit ...

Ihned potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.

VÝKLAD

Následuje vlastní výklad studované látky, zavedení nových pojmů, jejich vysvětlení, vše doprovázeno obrázky, tabulkami, řešenými příklady, odkazy na animace.

Shrnutí pojmů 2.1.

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.

Otázky 1.1.

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.

Úlohy k řešení 1.1.

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v databázové praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavní význam předmětu a schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti při řešení reálných situací hlavním cílem předmětu.

KLÍČ K ŘEŠENÍ

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek výše jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli.

Úspěšné a příjemné studium s touto učebnicí Vám přejí autoři výukového materiálu

Jiří Tůma, Renata Wagnerová, Radim Farana, Lenka Landryová

Obsah

1. LOGICKÉ ŘÍZENÍ 8

1.1 Úvod 8

- Booleova algebra 9
- Zadání logické funkce 9
- Základní logické funkce 11
- Zákony Booleovy algebry 14
- Syntéza kanonického tvaru kombinační logické funkce 15
- Sestavení logické funkce pomocí Karnaughovy mapy 17

1.2 Realizace kombinačních logických obvodů 21

- Kontaktní schémata 22
- Bloková schémata 23
- Programovatelné logické automaty 26

1.3 Časové operace v logickém řízení 37

- Sekvenční logické obvody 38

1.4 Klopné obvody 41

- Klopný obvod typu RS 41
- Klopný obvod typu D 43
- Klopný obvod typu JK 43

1.5 Zapojení klopných obvodů v sekvenčních obvodech 45

- Použití klopného obvodu typu RS 45
- Použití klopného obvodu typu JK pro čítání impulsů 46

1.6 Sekvenční funkční diagramy 48

- Příklad na sestavení sekvenčního funkčního diagramu 51

1.7 Programovatelné logické automaty 53

- Galvanické oddělení PLC od vnějších obvodů 54
- Funkce sběrnice pro komunikaci 55
- Vnitřní struktura PLC 56
- Vstupy a výstupy PLC 56
- Paměti PLC 57
- Programování PLC 57
- Provedení PLC 58
- Sběrnice PROFIBUS 58

1.8 Laboratorní úlohy na logické řízení 60

- Zařízení na ochranu před úrazem (Bezpečnostní zařízení) 61
- Řízení pásových dopravníků (Dva dopravníky, R-S klopný obvod) 63

2. SPOJITÉ SYSTÉMY 69

2.1. Základní pojmy 69

- Příklad sestavení blokového schématu. 70
- Základní činnosti se systémy 71

2.2. Laplaceova transformace 77

2.3. Matematický popis statických a dynamických vlastností spojitých systémů 86

- Statická charakteristika 86
- Diferenciální rovnice 87
- Obrazový přenos 87
- Přechodová funkce 88
- Impulsní funkce 90
- Kmitočtový přenos 92

2.4. Logaritmické kmitočtové charakteristiky 99

- LKCH základních zapojení 100
- Základní členy přenosu 103

2.5. Základní rozdělení spojitých dynamických členů 110

❑ Proporcionální systémy ... 113
❑ Derivační systémy ... 116
❑ Integrační systém ... 118
❑ Dopravní zpoždění ... 120
2.6. Algebra blokových schémat ... 125
❑ Základní přenosy RO ... 132
2.7. Stabilita ... 137
❑ Hurwitzovo kriterium stability ... 139
❑ Routhovo-Schurovo kriterium stability ... 141
❑ Nyquistovo kriterium stability ... 144
2.8. Regulátory ... 148
2.9. Kvalita regulačního pochodu ... 152
2.10. Syntéza regulačních obvodů ... 155
❑ Jednoduché aproximační metody ... 164
3 TECHNICKÉ PROSTŘEDKY ŘÍZENÍ ... 168
3.1. Základní pojmy ... 168
3.2. Pneumatické a hydraulické systémy pro řízení a ovládání ... 171
❑ Hydraulické a pneumatické obvody ... 171
3.3. Analogové regulátory pro zpětnovazební řízení ... 175
❑ Elektronické regulátory ... 175
❑ Mechanické regulátory ... 178
3.4. Pneumatické regulátory ... 180
3.5. Hydraulické zesilovací prvky ... 183
❑ Příklad provedení proporcionálního ventilu (rozváděče) ... 185
❑ Servoventily ... 186
3.6. Snímače ... 187
❑ Některé obecné principy měření fyzikálních veličin ... 189
❑ Snímače teploty pro regulaci ... 192
❑ Snímače průtoku plynů a kapalin pro regulaci ... 194
❑ Snímače síly a krouticího momentu pro regulaci ... 197
❑ Snímače tlaku a diferenčního tlaku pro regulaci ... 199
❑ Snímače hladiny pro regulaci ... 200
❑ Snímače polohy pro regulaci s analogovým výstupem ... 200
❑ Snímače polohy pro regulaci s číslicovým výstupem ... 201
❑ Dotykové sondy ... 203
❑ Průtok sypkých hmot ... 204
3.7. Akční členy ... 205
❑ Převody pohybů ... 206
❑ Regulační orgány pro ovládání průtoku plynů par a kapalin ... 208
❑ Kontinuální dávkování sypkých hmot ... 211
3.8. Elektrické pohony ... 212
❑ Přehled typů elektrických motorů ... 216
❑ Pracovní oblasti pohonů ... 216
❑ Stejnosměrný motor ... 217
❑ Střídavý asynchronní motor ... 220
❑ Jednofázový komutátorový motor ... 223
❑ Elektronicky komutovaný motor (EC motor) ... 223
❑ Synchronní střídavé motory ... 224
❑ Krokové motory ... 224
❑ Napájení elektrických motorů řízeným usměrňovačem ... 227
❑ Měniče frekvence ... 229
3.9. Hydraulické a pneumatické pohony ... 231
3.10. Piezoelektrické aktuátory ... 236

3.11. Počítačové sítě ... 240
- Síť Internet ... 242
- IP adresy ... 242
- Symbolické adresy ... 244
- Některé služby internetu ... 244

3.12. Vizualizace a řízení z operátorského pracoviště ... 246
- Vizualizace ... 246
- Systémy řízení z operátorského pracoviště ... 247
- Architektura vizualizačního systému ... 248
- Vizualizace dat v Internet/Intranet sítích ... 249
- Alarmy ... 250
- Trendy ... 250
- Příklad řešení vizualizace laboratorní úlohy ... 251
- Řešení vizualizace dat z laboratorní úlohy do prostředí internetu ... 253

4 APLIKACE AUTOMATIZAČNÍ TECHNIKY V TECHNICKÉ PRAXI 258

4.1. Regulace v tepelné technice ... 258
- Regulace teploty ... 258
- Kaskádová regulace v tepelné technice ... 259

4.2. Řízení dávkování směsi a řízení zásoby sypkých hmot ... 260
- Dávkování směsi sypkých hmot ... 260
- Regulace zásoby ... 261
- Kontinuální regulace vlhkosti sypkých hmot ... 262
- Integrační smyčková regulace ... 263

4.3. Řízení polohy ... 263
4.4. Soubor řídicích jednotek automobilu a sběrnice CAN ... 264
4.5. Řízení vstřikování a zapalování paliva zážehových motorů ... 267
4.6. Elektrohydraulické servořízení ... 271
4.7. Inteligentní dům ... 273

KLÍČ K ŘEŠENÍ ... 277
REJSTŘÍK ... 286
SEZNAM ANIMACÍ ... 288

1. LOGICKÉ ŘÍZENÍ

1.1 Úvod

Čas ke studiu: 2 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat logickou proměnou, funkci logické proměnné, zákony Boolovy algebry, Karnaughovu mapu, minimalizaci logických funkcí pomocí Karnaughovy mapy, kontaktní schémata, hradla
- popsat způsoby zadání logické funkce
- vyřešit minimalizaci logických funkcí pomocí Karnaghovy mapy, převádět jednotlivé způsoby zadání logických funkcí mezi sebou (vzorec, tabulka hodnot, Karnaughova mapa)

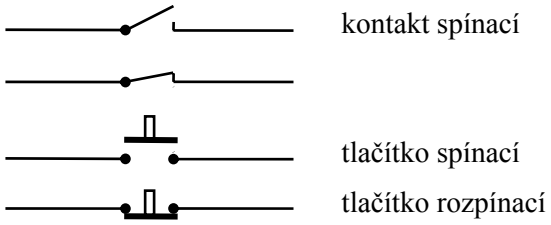
Výklad

Logické řízení je založeno na dvou stavech ovládaného prvku. Praktické označení těchto stavů je následující:

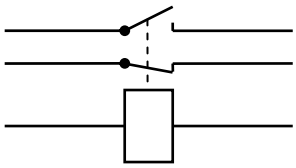
zapnuto / vypnuto, otevřeno / zavřeno, vede proud / nevede proud. atd.

Mezi těmito dvěma stavy není žádný mezistupeň. I když lze u některých prvků třeba připustit otevření napůl, funkce logického řízení to nepředpokládá, může tedy nastat jen jedna ze dvou zmíněných alternativ. Jedním z prvků, který tuto funkci plní je elektrický kontakt (spínač). Ten je buď zapnut nebo vypnut. Při kreslení schémat platí pravidlo, že se kreslí jejich poloha v klidovém stavu (pokud není uvedeno jinak), viz obrázek 1.1. Mezi kontakty řadíme také tlačítka spínací nebo rozpínací.

Kontakty se ovládají buď ručně nebo automaticky dálkově. Příkladem dálkově ovládaného kontaktu je elektromagnetické relé. Relé může obsahovat několik kontaktů dimenzovaných na různá proudová zatížení. Mohou tedy spínat malé proudy nebo velké proudy, což je běžné například u stykačů. Schématické znázornění relé je na obrázku 1.2. Průchodem elektrického proudu cívkou se přitáhne pohyblivá kotva k jádru cívky. Kotva svým pohybem způsobí sepnutí spínacích kontaktů nebo rozepnutí rozpínacích kontaktů. Relé mohou být různého druhu: střídavé, stejnosměrné, jazýčkové,.atd.



Obrázek 1.1 - Spínací a rozpínací kontakt



Obrázek 1.2 - Elektrické relé

Logické obvody budou v této učebnici rozděleny na:

- Kombinační logické obvody
- Sekvenční logické obvody.

Kombinační obvody se liší od sekvenčních tím, že jejich aktuální dvouhodnotový výstup kombinačních logických obvodů je závislý na aktuálních vstupních dvouhodnotových signálech. Naproti tomu výstup sekvenčních logických obvodů je navíc závislý na předcházejících výstupech. Toto dělení se odrazí v dělení textu kapitoly o logickém řízení.

❑ Booleova algebra

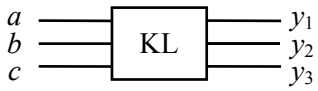
Logické řízení má svoji matematickou teorii, která se nazývá Booleova algebra (George Boole, 1815-1864, irský matematik, hlavní dílo Analysis of Logic). Vzorce nepotřebují reálná čísla, ale jen proměnné (veličiny), , které nabývají dvou hodnot:

ano / ne, pravda / nepravda, true / false (anglicky), logická 1 / logická 0.

Nejběžněji používané hodnoty jsou 1 a 0. Vzorce představují matematickou funkci. Nezávislé proměnné této funkce jsou například pojmenovány: a, b, c, ...atd. Proměnná, která je nazvána např. a může tedy nabýt jedné ze dvou možných hodnot: 1 nebo 0. Pro název proměnné lze použít několika písmen, omezením je jen náš vkus, ve jménu proměnné může být obsažen její technický význam. Základní vlastností funkcí v matematice je jednoznačnost přiřazení závislé proměnné, např. y, určité kombinaci hodnot nezávisle proměnných. Obecná funkce se označuje

$$y = f(a,b,c,...) \qquad (1.1)$$

Logická funkce y, (nebo skupina logických funkcí y_1, y_2, y_3, ...) se realizuje kombinační logický obvod (KL), který je znázorněn jako blokové schéma na obr. 1.3. Vstupy jsou kresleny vlevo a výstupy vpravo.



Obrázek 1.3 - Kombinační logická funkce

❑ Zadání logické funkce

Logickou funkci lze zadat následujícími způsoby:

- slovně, jakýkoliv smysluplný text popisující souvislost vstupních a výstupních dvouhodnotových veličin
- tabulkou přiřazující kombinace hodnot vstupních (nezávisle proměnných) k výstupním hodnotám (závisle proměnným)
- Karnaughovou mapou (K-mapou)
- Vzorcem obsahujícím operátory základních logických funkcí.

Z popsaných způsobů zadání si nejprve všimneme tabulky. Tabulka přiřazuje kombinacím vstupních proměnných hodnotu logické funkce, tj. buď 1 nebo 0. Počet kombinací příslušných k počtu *k* vstupních proměnných je

$$N = 2^k \tag{1.2}$$

Například pro tři vstupní proměnné (*a, b, c*) jsou $2^3 = 8$ kombinací hodnot.

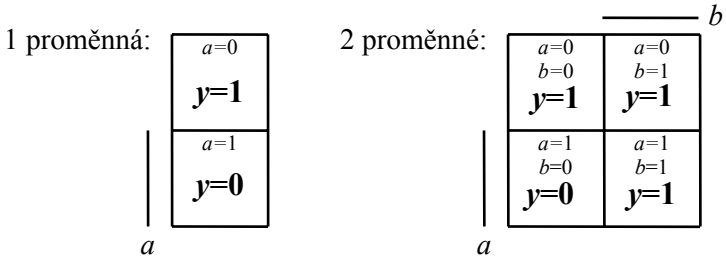
Tabulka 1.1 – Zadání logické funkce tabulkou

Pořadí	Nezávisle proměnné			Závisle proměnná
	a	***b***	***c***	***y***
1	0	0	0	1
2	0	0	1	1
3	0	1	0	0
4	0	1	1	1
5	1	0	0	0
6	1	0	1	0
7	1	1	0	1
8	1	1	1	0

V tabulce udává první sloupec pořadí kombinace, aby byl dokumentován jejich počet. Shodou okolností je pořadí o jednotku vyšší hodnota než je daná kombinace ve dvojkové soustavě. Hodnoty logické funkce doplňuje návrhář logického obvodu nebo automatu a řídí se jeho požadovanou funkcí.

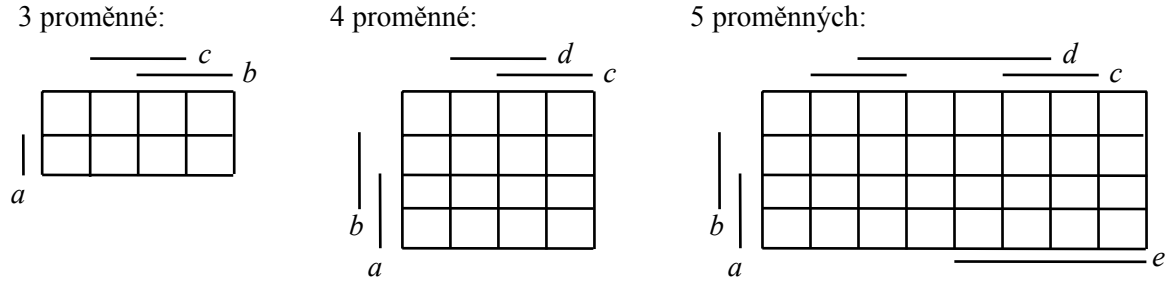
Je třeba zdůraznit, že funkční hodnoty nemusí být definovány pro všechny kombinace vstupních proměnných. Z definice mohou být vyňaty kombinace, které nemohou nastat. Například logická jednotka z obou koncových snímačů polohy jeřábu na jeřábové dráze nemůže nastat (jeden jeřáb nemůže být současně na obou koncích dráhy). Tato skutečnost bude využita v úloze optimalizace zápisu logické funkce, která bude vysvětlen v jedné z příštích kapitol.

Zápis formou tabulky představuje také Karnaughova mapa (K-mapa), jejíž pole jsou účelně uspořádána tak, aby bylo možné provádět jednoduše již zmíněnou optimalizaci zápisu logické funkce. Kombinaci hodnot proměnných určuje poloha pole a příslušná hodnota logické funkce je vepsána na plochu tohoto pole. Nejprve budou uvedeny Karnaughovy mapy pro jednu a dvě proměnné. Pro pochopení jejich uspořádání jsou do jednotlivých polí vepsány také příslušné hodnoty logických proměnných. Svislé a vodorovné pruhy po stranách tabulky označují řádek (nebo skupinu řádků) a sloupec nebo (skupinu sloupců), jejíž pole přísluší hodnotě 1 pro logickou proměnnou, která je k tomuto pruhu připsána.



Obrázek 1.4 - Karnaughova mapa pro jednu a dvě proměnné

Pro přehlednost, logická nula není do polí vpisována. Pole s nedefinovanou hodnotou logické funkce je vyplněno písmenem X. Uspořádání Karnaughovya mapy pro více proměnných je na následujícím obrázku. Tyto mapy jsou vytvářeny podle pravidla, které připouští změnu pouze jedné proměnné u sousedních sloupců nebo řádků. Mapa pro jednu a dvě proměnné toto pravidlo pro svou jednoduchost nepotřebuje. Pouze mapy pro více proměnných se tímto pravidlem řídí.



Obrázek 1.5 - Karnaughova mapa pro 3 až 5 proměnných

Poslední varianta zápisu logické funkce je vzorec, tj. funkční předpis logické funkce, která popisuje jednotlivé operace s nezávisle proměnnými.

❑ Základní logické funkce

V definici základních logických funkcí (tzv. funktory) budou použity předchozí definice (bez k-mapy). Slovní vyjádření představuje klíčové slovo při definici hodnoty logické funkce. Například *opak* znamená, že hodnota logické funkce je opakem hodnoty logické proměnné. Další příklad *nebo* znamená, že jestliže jedna *nebo* druhá proměnná a *nebo* současně obě proměnné jsou rovny logické hodnotě 1, pak je logická funkce rovna také 1.

Negace	**Logický součet (disjunkce)**
Slovní vyjádření: opak	Slovní vyjádření: nebo
Anglický název: NOT	Anglický název: OR
Operátor: pruh nad proměnnou	Operátor: $+, \cup$
Vzorec: $y = \overline{a}$ ($y =$ NOT a)	Vzorec: $y = a + b$ ($y = a$ OR b)
Tabulka:	Tabulka:

a	*y*
0	1
1	0

a	*b*	*y*
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Logický součin (konjunkce)

Slovní vyjádření: a

Anglický název: AND

Operátor: $\bullet$, $\cap$

Vzorec: $y = a \bullet b$ ($y = a$ AND b)

Tabulka:

a	b	y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Výlučný (exkluzivní) součet

Slovní vyjádření: právě jedna z n

Anglický název: XOR

Operátor: +, $\cup$

Vzorec: $y = a \oplus b$

Tabulka:

a	b	y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Další dvě důležité funkce z hlediska prvků elektronických logických obvodů jsou negovaný součin a součet.

Negovaný logický součin (Shefferův funktor)

Slovní vyjádření: opak součinu

Anglický název: NAND

Vzorec: $y = \overline{a \bullet b}$ ($y = a$ NAND b)

Tabulka:

a	*b*	*y*
0	0	1
0	1	1

Negovaný logický součet (Piercův funktor)

Slovní vyjádření: opak součtu

Anglický název: NOR

Vzorec: $y = \overline{a + b}$ ($y = a$ NOR b)

Tabulka:

a	*b*	*y*
0	0	1
0	1	0

1	0	1
1	1	0

1	0	0
1	1	0

Pro úplnost jsou uvedeny poslední dvě funkce.

Shoda (ekvivalence)

Slovní vyjádření: identita

Anglický název: EQ

Vzorec: $y = a \text{ EQ } b$

Tabulka:

a	***b***	***y***
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Neshoda (nonekvivalence)

Slovní vyjádření: opak identity

Anglický název: NEQ

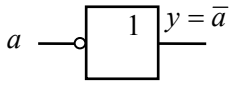
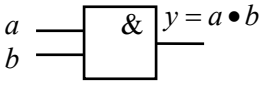
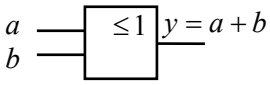
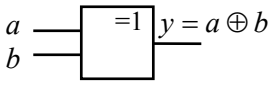
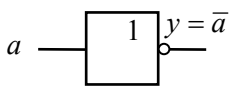
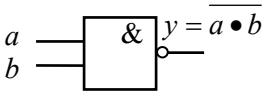
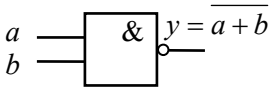
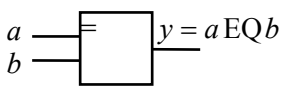
Vzorec: $y = a \text{ NEQ } b$

Tabulka:

a	***b***	***y***
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Logické funkce se vyskytují v popisech logických obvodů. Speciální značky mají jen bloková schémata. Obsah značky napoví funkci obvodu. Pro AND je užíváno &. Logický součet naznačuje, že pro výstup logické jednotky je třeba, aby aspoň jeden vstup byla logická jednotka. Značky jsou dvojí, nové a zastaralé, které budou uvedeny pod značkou novou v následující tabulce. Počet vstupů jednoho bloku není omezen. Podle elektronických obvodových součástek se však používají prvky se dvěma, čtyřmi, osmi vstupy. Značky znázorněné v tabulce 1.2 budou se dvěma vstupy.

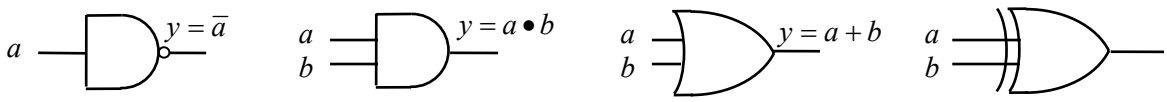
Tabulka 1.2 – Značky pro logické funkce (nové)

Negace vstupu NOT	Logický součin AND	Logický součet OR	Výlučný součet XOR
			
Negace výstupu NOT	**Negovaný součin NAND**	**Negovaný součet NOR**	**Ekvivalence EQ**
			

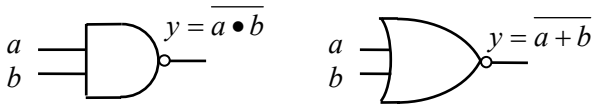
Při studiu staré dokumentace je třeba znát také dříve používané značení jednotlivých bloků jak ukazuje tabulka 1.3.

Tabulka 1.3 – Značky pro logické funkce (staré)

Negace výstupu NOT Logický součin AND Logický součet OR Výlučný součet XOR



Negovaný součin NAND Negovaný součet NOR



❑ Zákony Booleovy algebry

Základními zákony Booleovy algebry je zákon komutativní o změně pořadí jednotlivých proměnných

$$a+b=b+a\,,\ a\bullet b=b\bullet a\,, \tag{1.3}$$

asociativní o závorkách

$$a+(b+c)=(a+b)+c\,,\ a\bullet(b\bullet c)=(a\bullet b)\bullet c \tag{1.4}$$

a distributivní o vytýkání proměnných před závorku

$$a\bullet b+a\bullet c=a\bullet(b+c)\,,\ (a+b)\bullet(a+c)=a+b\bullet c\,. \tag{1.5}$$

Důležitým je také zákon o dvojí negaci

$$\bar{\bar{a}}=a\,. \tag{1.6}$$

Další skupinou vztahů důležitých při úpravách vzorců s logickými proměnnými ukazuje tabulka 1.4 s duálními páry představující záměnu logického součtu za součin a záměnu logických 0 za 1 a naopak. Principu duality vyhovují také již uvedené základní zákony“ komutativní, asociativní a distributivní.

Nejčastěji jsou k úpravám vzorců a to zejména při převodu logického součtu na součin a naopak použity zákony (pravidla) de Morganovy v kombinaci se zákonem dvojí negace.

$$a+b=\overline{\overline{a+b}}=\overline{\bar{a}\bullet\bar{b}}\,,\ a\bullet b=\overline{\overline{a\bullet b}}=\overline{\bar{a}+\bar{b}} \tag{1.7}$$

Zákony lze ověřit s využitím definicí jednotlivých funkcí. Protože správnost de Morganových zákonů není na první pohled zřejmá, bude předveden postup, jak je ověřit. Nejjednodušší postup je kontrola platnosti pro všechny možné kombinace vstupních proměnných. V důsledku dvou hodnot, které každá proměnná může nabýt, je počet kombinací konečný, tj. 4. Nejprve je vyčíslena pravá strana vzorců a pak jejich levá strana. Ověření je dokončeno porovnáním příslušných sloupců (v tabulce 1.5 jsou vyznačeny tučně).

Tabulka 1.4 – Duální páry zákonů

Název zákona	Logický součet	Logický součin	Číslo rovnice
vyloučení třetího	$a+\overline{a}=1$	$a \bullet \overline{a}=0$	(1.7)
neutrálnost	$a+0=a$	$a \bullet 1=a$	(1.8)
agresivnost	$a+1=1$	$a \bullet 0=0$	(1.9)
idempotence	$a+a=a$	$a \bullet a=a$	(1.10)
absorpce	$a+a \bullet b=a$	$a \bullet (a+b)=a$	(1.11)
	$a+\overline{a} \bullet b=a+b$	$a \bullet (\overline{a}+b)=a \bullet b$	(1.12)
de Morganovy	$\overline{a+b}=\overline{a} \bullet \overline{b}$	$\overline{a \bullet b}=\overline{a}+\overline{b}$	(1.13)

Tabulka 1.5 – Ověření de Morganových zákonů

a	b	$\overline{a}$	$\overline{b}$	$a+b$	$\overline{a+b}$	$\overline{a} \bullet \overline{b}$	$a \bullet b$	$\overline{a \bullet b}$	$\overline{a}+\overline{b}$
0	0	1	1	0	**1**	**1**	0	**1**	**1**
0	1	1	0	1	**0**	**0**	0	**1**	**1**
1	0	0	1	1	**0**	**0**	0	**1**	**1**
1	1	0	0	1	**0**	**0**	1	**0**	**0**

❑ Syntéza kanonického tvaru kombinační logické funkce

Tabulka hodnot logické funkce se sestaví podle požadované funkce logického řízení. Dalším krokem analýzy funkce je odvození vzorce, který tabulkovým hodnotám logických proměnných vyhovuje. Podle principu duality lze definovat dva tvary (tzv. kanonické tvary dané aplikaci zvoleného pravidla), které jsou vytvořeny jako

- součet součinů (úplná disjunktní normální forma)
- součin součtu (úplná konjunktivní normální forma).

Dualita spočívá ve vzájemné záměně logického součtu a součinu. Postup vytvoření vzorce bude vysvětlen na příkladu.

Příklad 1.1. *Příklad na určení vzorce logické funkce zadané pravdivostní tabulkou.*

Nechť je dána část tabulky funkčních hodnot logické funkce y. Určete vzorec logické funkce.

a	b	c	y
...	...	...	...
1	1	0	1
1	1	1	0

Řešení:

A) Ve tvaru součtu součinů se logická funkce vytváří podle hodnot 1 logické funkce. Hodnotu 1 nabývá logická funkce mimo jiné kombinace pro a = 1, b = 1 a c = 0. V součtu dílčích příspěvků k hodnotě 1 logické funkce pro jiné kombinace hodnot nezávisle proměnných (určujících hodnotu funkce 1) musí být přítomen logický součin $a \bullet b \bullet \overline{c}$, který je pro tuto kombinaci proměnných roven 1, proto část logické funkce má tvar

$$y = \ldots + a \bullet b \bullet \overline{c} + \ldots \tag{1.8}$$

Každý sčítanec součtu obsahuje součin všech logických proměnných, které jsou vhodně negovány tak, aby jejich součin byl jednotkový.

B) V duálním tvaru k případu ad A), tj. součinu součtů, se logická funkce vytváří podle hodnot 0 logické funkce. Hodnotu 0 nabývá logická funkce, jestliže aspoň jeden ze součinitelů v součinu je nulový. Pro danou kombinaci nezávisle proměnných a = 1, b = 1 a c =1 je součet nulový, jestliže je tvořen z negací všech proměnných, tj. $\overline{a} + \overline{b} + \overline{c}$, proto logická funkce musí nabýt tvar

$$y = (\ldots) \bullet \ldots \bullet \left(\overline{a} + \overline{b} + \overline{c}\right) \bullet \ldots \bullet (\ldots) \tag{1.9}$$

Každý součinitel součinu obsahuje součet, jehož hodnota je rovna logické nule pro kombinaci hodnot vstupních logických proměnných, kterým odpovídá v tabulce nulová hodnota logické funkce.

Příklad 1.2. ***Příklad na určení vzorce logické funkce zadané pravdivostní tabulkou.***

Nechť je logická funkce dána tabulkou. Určete vzorec funkce jak pomocí součtu součinů, tak i pomocí součinu součtů.

Řešení:

a	*b*	*c*	*y*
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

A) Součet součinů

$$y = \overline{a} \bullet \overline{b} \bullet \overline{c} + \overline{a} \bullet \overline{b} \bullet c + \overline{a} \bullet b \bullet \overline{c} + \overline{a} \bullet b \bullet c + a \bullet \overline{b} \bullet c + a \bullet b \bullet c$$

B) Součin součtů

$$y = (\overline{a} + b + c) \bullet (\overline{a} + \overline{b} + c)$$

Úpravy výrazů:

Ad A)

Z dvojic výrazů lze vytknout a uplatnit vzorec (1.7)

$$\overline{a} \bullet \overline{b} \bullet \overline{c} + \overline{a} \bullet \overline{b} \bullet c = \overline{a} \bullet \overline{b} \bullet (\overline{c} + c) = \overline{a} \bullet \overline{b}$$
$$\overline{a} \bullet b \bullet \overline{c} + \overline{a} \bullet b \bullet c = \overline{a} \bullet b \bullet (\overline{c} + c) = \overline{a} \bullet b$$
$$a \bullet \overline{b} \bullet c + a \bullet b \bullet c = a \bullet c \bullet (\overline{b} + b) = a \bullet c$$

$$y = \overline{a} \bullet \overline{b} + \overline{a} \bullet b + a \bullet c = \overline{a} + a \bullet c = \overline{a} + c$$

Ad B)

Vhodným uzávorkováním a uplatněném vzorce (1.5)

$$y = ((\overline{a} + c) + b) \bullet ((\overline{a} + c) + \overline{b}) = \overline{a} + c + b \bullet \overline{b} = \overline{a} + c$$

Oba postupy dávají shodný výsledek.

❑ Sestavení logické funkce pomocí Karnaughovy mapy

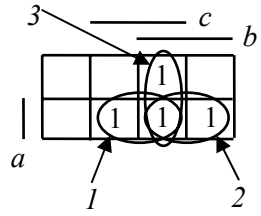
Sestavování vzorce v předcházející kapitole s využitím varianty součtu součinu vedlo na zápis dodržující určitá pravidla, avšak výsledný vzorec obsahuje zbytečně mnoho členů. Jeho zápis vyžadoval úpravy. K těmto úpravám byl využit vzorec $a + \overline{a} = 1$. Shodou okolností nalezení dvou členů umožňujících vytknutí součinu dvou proměnných, které obsahují zbylou proměnnou a její negaci (např. a a $\overline{a}$), nebylo těžké. Vhodné skupiny součinů tří proměnných byly v součtu vedle sebe.

Úpravy vzorců s dvouhodnotovými logickými proměnnými lze s pomocí Karnaughovy mapy algoritmizovat. Tato mapa je sestavena tak, že dvojice sousedních polí ve směru řádků

nebo sloupců se liší v hodnotě jedné logické proměnné. Jestliže kombinacím hodnot logických proměnných v sousedních polích mapy odpovídají logické jedničky, pak v součtu součinů se vyskytují dva členy, které se liší jen v negaci této logické proměnné. Tyto dva členy součtu lze nahradit členem jedním s počtem proměnných menším o jednotku. Z výrazu se vyloučí logická proměnná, která se liší v použití operace negace.

Algoritmus bude demonstrován na příkladu zápisu logické funkce pomocí Karnaughovy mapy. Následující příklad vede na kanonický tvar součtu 4 členů se součiny 3 logických proměnných

$$y = a \bullet \overline{b} \bullet c + a \bullet b \bullet c + a \bullet b \bullet \overline{c} + \overline{a} \bullet b \bullet c$$



Na mapě vlevo lze určit tři dvojice jedniček v sousedních polích mapy ve směru řádků a sloupců, které jsou označeny *1*, *2* a *3*. Tyto kombinace proměnných nahrazují členy

$$1\text{: } a \bullet \overline{b} \bullet c + a \bullet b \bullet c = a \bullet c \bullet \left(\overline{b} + b\right) = a \bullet c$$

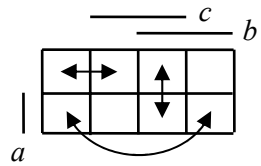
$$2\text{: } a \bullet b \bullet c + a \bullet b \bullet \overline{c} = a \bullet b \bullet \left(\overline{c} + c\right) = a \bullet b$$

$$3\text{: } a \bullet b \bullet \overline{c} + \overline{a} \bullet b \bullet c = b \bullet c \bullet \left(a + \overline{a}\right) = b \bullet c$$

Výsledný vzorec pro logickou funkci definovanou Karnaughovou mapou je následující

$$y = a \bullet c + a \bullet b + b \bullet c$$

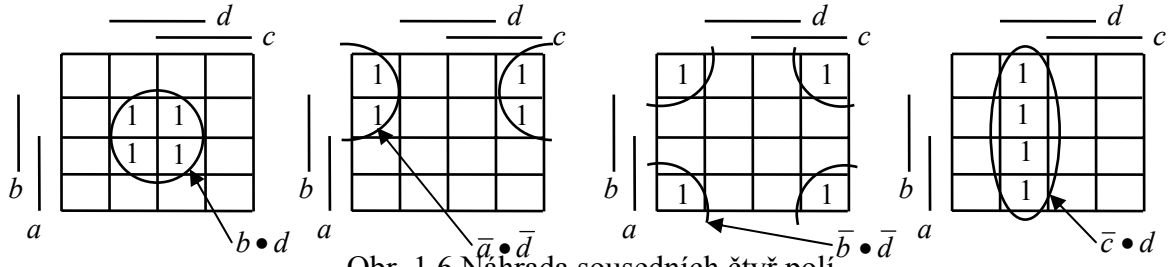
Zápis této funkce je oproti kanonickému tvaru zjednodušen a jeho realizace technickými prostředky bude jednoduchá. Karnaughova mapa je výhodným nástrojem k optimalizaci zápisu logických funkcí.



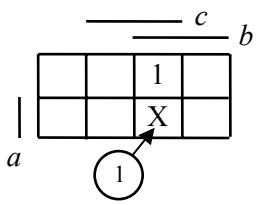
Sousední pole

Sousední pole v mapě ve významu odlišení o hodnotu jedné logické proměnné spolu nemusí bezprostředně sousedit. Také pole na protilehlých okrajích tabulky ve směru svislém nebo vodorovném se liší také jen v hodnotě jedné logické proměnné, proto jsou považovány také za sousední. Například ve vedlejším obrázku pole odpovídající hodnotám $a = 1$, $b = 0$ a $c = 0$ a pole s hodnotami $a = 1$, $b = 1$ a $c = 0$ se liší jen v hodnotě logické proměnné b.

Jestliže čtyři sousední pole jsou obsazena v Karnaughově mapě logickými jedničkami, pal lze ukázat, že v součtu součinů lze nahradit čtyři členy členem jedním se sníženým počtem logických proměnných o dvě. Příklad pro čtyři proměnné je na obrázku 1.6.



Obr. 1.6 Náhrada sousedních čtyř polí



Poslední poznámka k sestavení logické funkce se tyká polí s nedefinovanou hodnotou logické funkce. Tato pole Karnaughovy mapy se označují písmenem X. Nedefinované pole se doplňuje funkční hodnotou, která zjednoduší výslednou funkci. Na příkladu vlevo náhrada X nulou vede na zápis funkce $y = \bar{a} \bullet b \bullet c$, zatímco náhrada jedničkou zjednoduší zápis funkce na tvar $y = b \bullet c$.

Shrnutí pojmů 1.1

V této kapitole se studenti seznámili s úvodními pojmy z oblasti logického řízení, tzn. umí definovat logickou proměnnou, funkci logické proměnné a její možné zadání ať už vzorcem nebo tabulkou hodnot (pravdivostní tabulkou) nebo Karnaughovou mapou. Dále jsou zde popsány základní logické operace jako logický součet či součin, negace, atd. a postupy minimalizace logických funkcí buď pomocí zákonů Boolovy algebry nebo pomocí Karnaughovy mapy. Na závěr je ukázán převod jednotlivých forem zadání logické funkce mezi sebou (vzorec, tabulka, K mapa).

Otázky 1.1.

1. Co je to logické řízení?
2. Jak je definována logická funkce?
3. Co je to NAND a NOR?
4. Jak vypadá značka negace NOT?
5. Na co se používá Boolova algebra?
6. Jak vypadají De Morganovy zákony?
7. Můžeme v Karanughově mapě sdružovat 3 políčka?
8. Může obsahovat Karnaughova mapa nedefinované hodnoty?
9. Muže být logická funkce zadána slovně?
10. Pomocí jakých vyjádření můžeme vypsat logickou funkci z pravdivostní tabulky?

Úlohy k řešení 1.1.

1. Minimalizujte logickou funkci čtyř proměnných zadanou pravdivostní tabulkou pomocí Karnaughovy mapy.

a	b	c	d	y
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	1	0	1	1
0	1	1	1	1
1	1	0	1	1
1	1	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	0	1
1	1	0	0	1
1	1	1	1	0
1	0	1	0	0

2. Minimalizujte logickou funkci pěti proměnných zadanou pravdivostní tabulkou pomocí Karnaughovy mapy.

a	b	c	d	e	y
0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1
0	1	1	0	0	1
0	1	1	1	0	1
0	1	0	1	0	1
0	1	0	1	1	1
0	1	1	1	1	1

a	b	c	d	e	y
0	1	1	0	1	1
0	1	0	0	1	1
1	1	1	1	0	1
1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	1	1
1	0	1	0	1	1
1	0	0	0	1	1
1	1	1	0	0	0

1.2 Realizace kombinačních logických obvodů

Čas ke studiu: 2 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat realizaci a syntézu logických funkcí.
- popsat prky pro realizaci logických funkcí.
- vyřešit minimalizaci a realizaci logických funkcí.

Výklad

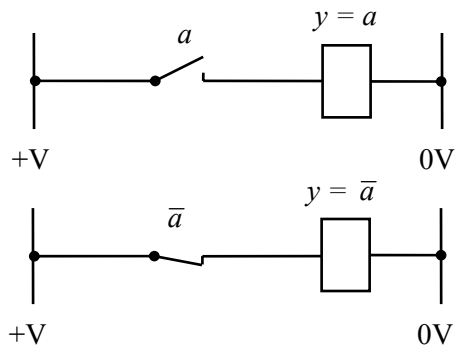
Kombinační logické funkce lze realizovat technickými prostředky, které jsou založeny na následujících technických prvcích.

- Mechanická relé
- Integrované obvody
- Programovatelné logické automaty.

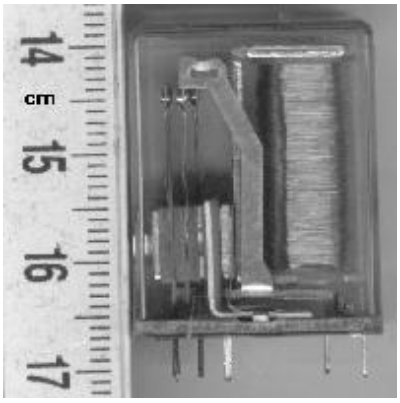
Každému z těchto prvků odpovídá specifický způsob znázorňování schéma zapojení těchto prvků. Reléové obvody se znázorňují v liniových kontaktních schématech. Elektronické logické prvky využívají blokových schémat a funkce programový logických automatů je popsána některou formou dokumentace software.

Kontaktní schémata

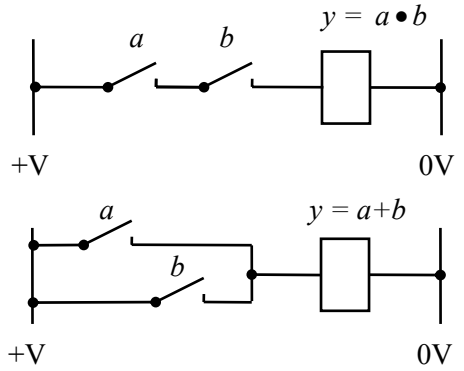
Jiné označení je liniové schéma. Toto schéma znázorňuje zapojení elektrických kontaktů, které umožňují průchod elektrického proudu mezi dvěma póly zdroje obvykle kreslenými jako svislé vodiče. Mezi těmito vodiči prochází proud přes různě zapojené kontakty do zátěže. Na pravé straně je kladné napájecí napětí a levá strana je obvykle uzemněna. Zátěží může být cívka elektromagnetického relé nebo jiný spotřebič, například žárovka nebo houkačka. Kontakty relé dimenzované na potřebné proudové zatížení mohou být napojeny i na elektrický motor nebo soustavu osvětlení. Nejjednodušší logické funkce $y = a$ a $y = \overline{a}$ jsou znázorněny kontaktními schématy na obrázku 1.6. Kontakty mají shodná označení jako logické proměnné. Jestliže je logická proměnná rovna logické jedničce, tak je spínací kontakt sepnut a pro logickou nulu rozepnut. Kontaktů se stejným označením může být ve schématu více. Jak je zřejmé z obrázku 1.6, je rozlišena negovaná proměnná, která přísluší rozpínacímu kontaktu. Kontakty označené stejnou proměnnou, včetně její negace, jsou ovládány jedním relé, které je obvykle vybaveno několika kontakty různého druhu (spínací, rozpínací).



Obrázek 1.7 - Kontaktní schéma realizující logické funkce $y = a$ a $y = \overline{a}$



Obrázek 1.8 - Relé s přepínacími kontakty



Obrázek 1.9 – Kontaktní schéma realizující logický součin a součet

Funkci logického součinu a součtu plní zapojení kontaktů na obrázku 1.9. Logický součin umožňuje průchod proudu zátěží jen když jsou oba kontakty sepnuty, tj. příslušné proměnné jsou rovny logické jedničce. Naproti tomu u logického součtu stačí jen jeden sepnutý kontakt, aby proud protékal zátěží. Obrázky na schématech jsou zobrazena vektorovou počítačovou grafikou. Dříve, kdy displeje počítačů umožňovaly jen textový režim, bylo běžné zobrazování spojení ze znaků. Příkladem spínacího kontaktu a zátěže je následující posloupnost znaků

|-----] [-----(=)-----|

rozpínací kontakt je znázorněn takto

|-----]/[-----(=)-----|

Příklad 1.3. ***Příklad na určení kontaktního schématu logické funkce zadané vzorcem.***

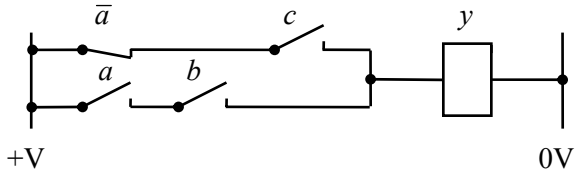
Vytvořte kontaktní schéma logické funkce dané vzorcem (1.10).

Řešení:

Kontaktní schéma logické funkce dané vzorcem (1.10) je znázorněno na obrázku 1.10.

$$y = \overline{a} \bullet c + a \bullet b \qquad (1.10)$$

Na kontaktním schématu jsou kresleny kontakty příslušné jedné logické proměnné být pod sebou proto, aby bylo demonstrováno jejich společné ovládání příslušným jedním relé.



Obrázek 1.10 – Řešení příkladu

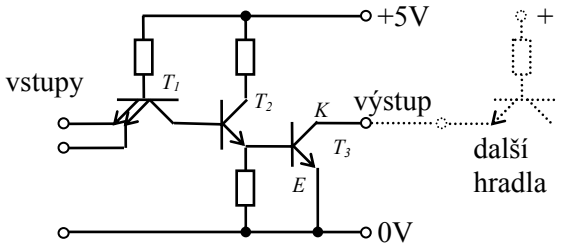
❑ Bloková schémata

Tento typ schématu odpovídá zapojení elektronických součástek plnících logické funkce. Tyto součástky se nazývají hradla. Jsou především typu NAND a NOR. Signál logické jedničky v tzv. pozitivní logice TTL (Tranzistor-Tranzistor-Logic) je kladné elektrické napětí +5V, naproti tomu logické nule odpovídá 0V. K označení úrovně napětí pro logickou jedničku se používá H (High) a L (Low) pro logickou nulu. Samozřejmě, že je přípustná tolerance velikosti napětí. U integrovaných obvodů (IO) řady MH74000 je úroveň L do 0,8 V a H nad 2V. Mezi těmito hranicemi není obvykle chování hradel předvídatelné a vznikají hazardy (neurčité stavy).

Logická hradla se integrují do integrovaných obvodů (IO) a několik z nich tvoří jednu součástku. Počet vstupů těchto hradel je obvykle 2, 4 nebo 8 a podle tohoto počtu vstupů pro jedno hradlo se s ohledem na počet dostupných vývodů (pinů) slučují na jeden integrovaný obvod. Příklad hradla typu NAND se dvěma vstupy a třemi tranzistory typu NPN je na obrázku 1.11. Výstupem tohoto obvodu je třetí tranzistor, který se připojuje k dalšímu hradlu. Základem tohoto obvodu je tranzistor pracující ve spínacím režimu. Jak známo, tranzistor je zesilovač proudu. Velikost proudu kolektorem (K) je mnohonásobně zesílený proud do báze (B). Proud přechodem báze-emitor je dán napětím na tomto přechodu tranzistoru. Zhruba řečeno: kladné napětí na bázi oproti editoru otvírá tranzistor typu NPN pro průchod proudu, zatímco nulové nebo záporné napětí na tomto přechodu tranzistor typu NPN pro proud kolektorem uzavírá.

Pro obvod na obrázku 1.11 platí, že nulové napětí na jednom nebo obou vstupech obvodu otevře tranzistor T_1 průchodu proudu a napětí na jeho kolektoru poklesne k úrovni 0V, což uzavře tranzistor T_2 , jehož kolektorem přestane téci proud a na odporech, které jsou připojeny ke kolektoru a editoru, bude velmi malý úbytek napětí. Napětí na editoru tranzistoru

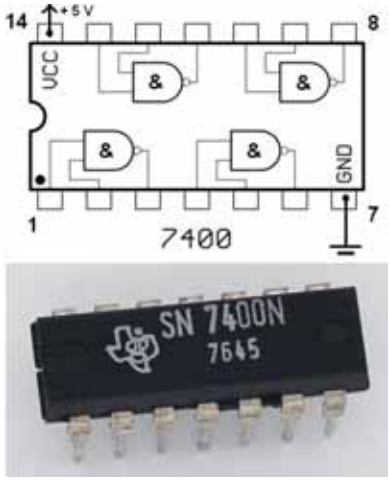
T_2 je téměř na napětí 0V, což uzavře tranzistor T_3, jehož kolektor je tzv.otevřený vzhledem k popisovanému obvodu. Kolektor tohoto tranzistoru T_3 je totiž na napájecí zdroj připojen až přes editor a odpor v bázi dalšího připojeného obvodu [hradla].



Obrázek 1.11 – Hradlo NAND se dvěma vstupy

Protože přes tento třetí tranzistor T_3 neteče žádný proud, je na výstupu téměř plné napájecí napětí. Shrnuto: nulové napětí na kterémkoliv vstupu tohoto obvodu (logická nula) vyvolá napětí blízké napájecímu na jeho výstupu. Jestliže jsou oba vstupy na úrovni napájecího napětí, pak tranzistor T_1 se zavře a jeho zbytkový proud otevře tranzistor T_2, což vyvolá zvýšení úbytku napětí na odporu, který je připojen k jeho emitoru. Tento úbytek napětí otevře průchodu proudu tranzistor T_3 s potenciálem na jeho kolektoru blízkým nule. Hradlo tedy plní funkci prvku NAND. Maximální počet vstupů jiných integrovaných obvodů, které lze připojit na výstup jednoho hradla, se nazývá logický zisk obvodu. U zmíněné řady IO je logický zisk 10, tj. na výstup tohoto hradla může být zapojeno až 10 dalších hradel a proudové zatížení výstupu je v přípustných mezích.

Ukázka integrovaného obvodu SN 7400N, který obsahuje čtyři hradla NAND se dvěma vstupy, je na obrázku 1.12. Kromě zapojení vývodů je přiloženo také foto tohoto integrovaného obvodu.



Obrázek 1.12 – Integrovaný obvod SN 7400N

Základními operacemi jsou negace, součet a součin. Způsob zapojení hradel NOR a NAND pro tyto operace je předmětem dalšího popisu. Zapojení hradel se dvěma vstupy je znázorněno na obrázku 1.13.

Negace jedné proměnné hradlem NAND nebo NOR se řeší jedním hradlem s propojenými vstupy. Podle výše vysvětlené funkce by se volný vstup choval jako připojená logická jednička, což by nebylo vhodné pro hradlo NOR.

Součin dvou proměnných lze zrealizovat dvěma hradly NAND s použitím vzorce

$$y = a \bullet b = \overline{\overline{a \bullet b}} = \overline{\left(\overline{a \bullet b}\right)} \tag{1.11}$$

Dvojnásobná negace odpovídá postupným operacím: $\overline{a \bullet b}$ a pak opakovaná negace tohoto dílčího výsledku. Součet proměnných se vytvoří podle tohoto vzorce

$$y = a + b = \overline{\overline{a + b}} = \overline{\overline{a} \bullet \overline{b}} \tag{1.12}$$

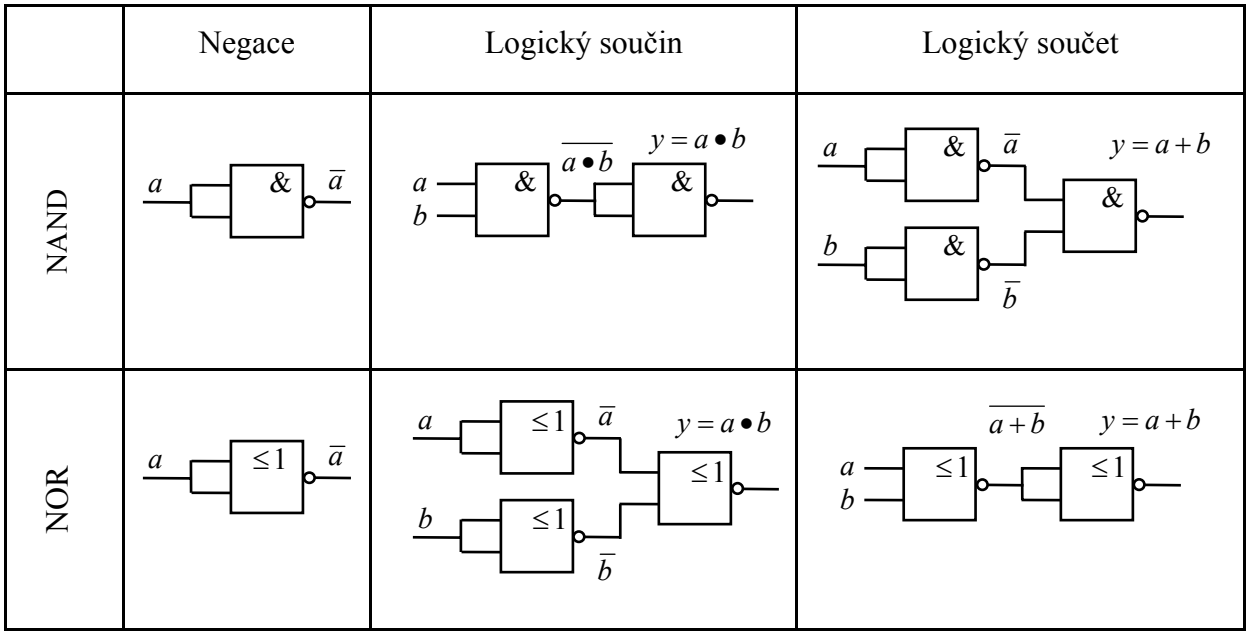
Dvojnásobná negace součtu se rozloží použitím de Morganova zákona na součin negovaných proměnných, který je opět negován.

Součin dvou logických proměnných, který je realizován dvěma hradly NOR, používá vzorce

$$y = a \bullet b = \overline{\overline{a \bullet b}} = \overline{\overline{a} + \overline{b}} \tag{1.13}$$

Součet proměnných se vytvoří jako dvojitá negace

$$y = a + b = \overline{\overline{a + b}} = \overline{\left(\overline{a + b}\right)} \tag{1.14}$$



Obrázek 1.13 – Zapojení hradel NAND a NOR pro negaci, součin a součet

Jak již bylo zmíněno, počet vstupů hradel je 2 nebo 4 a nebo 8. Příklady k řešení jsou zadány tak, že se požaduje použít hradla s jednotným počtem vstupů, nejčastěji dvou. Nejprve bude demonstrován postup realizace logického součtu a součinu tří proměnných *a, b, c* hradly typu NAND se dvěma vstupy. Postup popisují následující vzorce. Ze tří proměnných se vytvoří dvě skupiny. První obsahuje dvě proměnné (*a*, *b*) a druhá jednu (*c*). Výsledek výpočtu obou těchto skupin může vstupovat do uvedeného typu hradla s počtem vstupů, který je roven počtu zmíněných skupin. V následujících vzorcích jsou mezivýsledky, které odpovídají výstupu jednotlivých hradel, označeny písmenem *H* s indexem:

$$y = a + b + c = (a + b) + c = \overline{\overline{(a + b)} + c} = \overline{\overline{(\bar{a} \bullet \bar{b})} + c} = \overline{\overline{(\bar{a} \bullet \bar{b})} \bullet \bar{c}} = \overline{\overline{(\bar{a} \bullet \bar{b})} \bullet \bar{c}} =$$
$$= \overline{\overline{(H_1 \bullet H_2)} \bullet H_3} = \overline{\overline{H_4} \bullet H_3} = \overline{H_5 \bullet H_3} = H_6$$

$$y = a \bullet b \bullet c = (a \bullet b) \bullet c = \overline{(a \bullet b)} \bullet c = \overline{\left(\overline{(a \bullet b)} \bullet c\right)} = \overline{\left(\overline{(H_1)} \bullet c\right)} = \overline{(H_2 \bullet c)} = \overline{(H_3)} = H_4$$

Logický součet a součin tří proměnných se realizuje hradly typu NOR se dvěma vstupy podle následujících vzorců, ve kterých lze uplatnit výše popsaný princip duality spočívající v náhradě logického součtu součinem a naopak:

$$y = a + b + c = (a + b) + c = \overline{\overline{(a + b)} + c} = \overline{\left(\overline{\overline{(a + b)} + c}\right)} = \overline{\left(\overline{(H_1)} + c\right)} = \overline{\left(\overline{H_2 + c}\right)} = \overline{(H_3)} = H_4$$

$$y = a \bullet b \bullet c = (a \bullet b) \bullet c = \overline{\overline{(a \bullet b)} \bullet c} = \overline{(\bar{a} + \bar{b}) \bullet c} = \overline{\overline{(\bar{a} + \bar{b})} + \bar{c}} = \overline{\overline{(\bar{a} + \bar{b})} + \bar{c}} =$$
$$= \overline{\overline{(H_1 + H_2)} + H_3} = \overline{\overline{H_4} + H_3} = \overline{H_5 + H_3} = H_6$$

❑ Programovatelné logické automaty

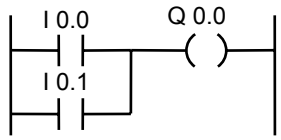
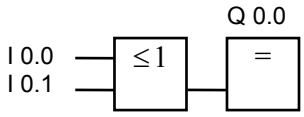
Programovatelné logické automaty představují speciální počítač. Jejich funkce se řídí programem, což je posloupnost instrukcí provádějící aritmeticko-logické operace a přesuny mezi svou operační pamětí, aritmeticko- logickou jednotkou (ALU) a vnějším prostředím.

V praxi se používají tři způsoby programování logických automatů pro kombinační logické úlohy. Jsou to jazyky

- liniových, resp. kontaktních schémat (Ladder Diagram – LAD), resp. Kontaktplan – KOP)
- blokových schémat logické funkce (Control System Flowchart – CSF, Funktions plan – FUP)
- symbolických instrukcí (STATMENT LIST – STL, resp. Anweisungsliste – AWL)

Prví dva způsoby využívají grafiku, zatímco třetí je založen textově. V tabulce 1.6 je ukázka uvedených způsobů programování logických automatů na příkladu logického součtu dvou logických proměnných. Jména vstupních logických proměnných jsou ve skutečnosti označení symbolických adres I 0.0 a I 0.1, důležitých pro obsazení paměti počítače. Výsledek je uložen na adrese Q 0.0. Všechny tři proměnné jsou typu BOOL (Boolean). U blokového schématu je použit blok výsledku s adresou nad jeho značkou. Jazyk symbolických instrukcí používá posloupnost příkazů v řádcích, ve kterých na prvním místě je typ operace a na druhém místě operand, což je u příkazu použitých v příkladu adresa, ale neplatí to obecně. V příkladu je typ operace označen symbolem O (OR), tj. logický součet. Pro logický součin se používá zkratka A (AND). Symbol = označuje uložení výsledků na adresu, která je operandem tohoto příkazu.

Tabulka 1.6 – Způsoby programování logických automatů

Jazyk kontaktních schémat	Jazyk blokových schémat	Jazyk symbolických instrukcí
		O I 0.0 O I 0.1 = Q 0.0

Příklad 1.4. ***Příklad na syntézu kombinačního logického obvodu***

Zadáním příkladu je odvodit minimální tvar zápisu logické funkce, vytvořit kontaktní schéma a bloková schémata buď jen s hradly NAND nebo NOR, přičemž počet jejích vstupů je omezen na dva.

Řešení:

Počáteční krok řešení úlohy kombinační logiky je sestavení tabulky funkce na základě slovních požadavků na její funkci. Nechť je požadováno, aby výstup kombinačního logického obvodu *y* závisel na vstupech *a, b, c, d* podle následující tabulky, která je rozdělena do dvou částí. V tabulce jsou dvě kombinace vstupních logických proměnných, pro které není funkční hodnota *y* definována – jejich pole je prázdné. Tato kombinace ve slovním zadání chyběla, protože byla nesmyslná.

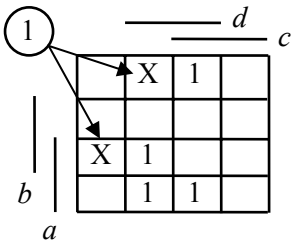
První část tabulky

a	*b*	*c*	*d*	*y*
0	0	0	0	0
0	0	0	1	
0	0	1	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0

Druhá část tabulky

a	*b*	*c*	*d*	*y*
1	0	0	0	0
1	0	0	1	1
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	
1	1	0	1	1
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

Druhým krokem syntézy je sestavení Karnaughovy mapy. Do této mapy jsou přeneseny jen logické jedničky a nedefinované funkční hodnoty z tabulky jsou označeny X. Za účelem optimalizace zápisu vzorce pro logickou funkci je vhodné, aby logická funkce byla dodefinována logickými jedničkami, protože vznikne dvojice sousedních logických proměnných a v zápise takto lze tyto dvojice součinů čtyř proměnných nahradit jedním součinem tří proměnných. Doplněním jedničky v prvním řádku tabulky dokonce vznikne čtveřice sousedních jedniček s efektem dalšího zjednodušení zápisu vzorce náhradou čtyř součinů čtyř proměnných jen jedním součinem dvou proměnných.

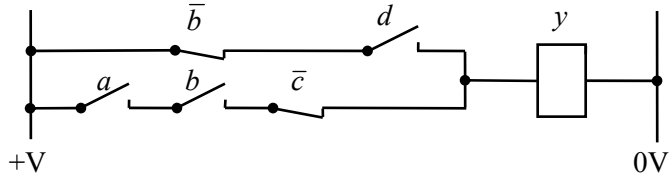


Karnaughova mapa

Třetím krokem je sestavení vzorce ve tvaru minimálního počtu členů součtu součinů logických proměnných. Tento tvar nelze dále zjednodušit

$$y = \overline{b} \bullet d + a \bullet b \bullet \overline{c}$$

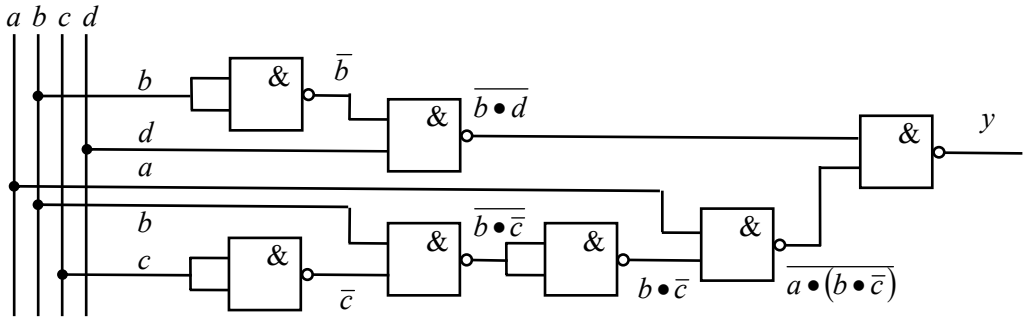
Čtvrtým krokem je sestavení kontaktního schématu. Kontakty *a, b, c, d* spínají elektrický proud do cívky relé *y*, jehož kontakty mohou sepnout přívod proudu k libovolnému dalšímu zařízení.



Pátým a také posledním krokem řešení příkladu je vytvoření blokových schémat pro hradla NAND a NOR. K tomuto účelu je třeba zápis vzorce upravit do tvaru obsahujícího negace a buď logické součty nebo logické součiny. Pro hradla NAND jsou úpravy následující

$$y = \overline{b} \bullet d + a \bullet b \bullet \overline{c} = \overline{\overline{\overline{b} \bullet d + a \bullet b \bullet \overline{c}}} = \overline{\overline{\overline{b} \bullet d} \bullet \overline{a \bullet (b \bullet \overline{c})}}$$

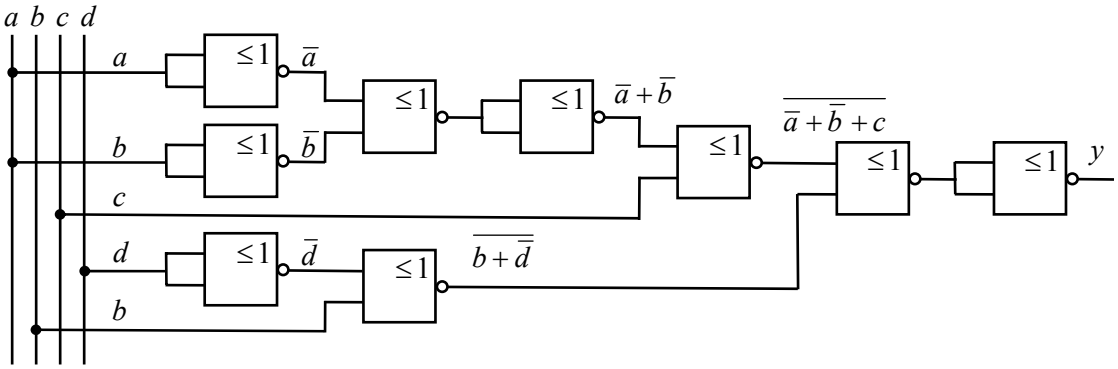
Příslušný blokový diagram sestavený z hradel NAND má následující podobu



Drobná modifikace zapojení by byla možná seskupením $(a \bullet b) \bullet \overline{c}$.

Dříve než bude blokové schéma s hradly typu NOR nakresleno, je třeba vzorec pro výpočet logické funkce upravit do tvaru, který obsahuje jen negace a součty

$$y = \overline{b} \bullet d + a \bullet b \bullet \overline{c} = \overline{\overline{\overline{b} \bullet d}} + \overline{\overline{(a \bullet b) \bullet \overline{c}}} = \overline{b + \overline{d}} + \overline{\overline{(a \bullet b)} + c} = \overline{b + \overline{d}} + \overline{(\overline{a} + \overline{b}) + c}$$



Příklad 1.5. ***Příklad na syntézu kombinačního logického obvodu***

Ze zadané pravdivostní tabulky vytvořte logickou funkci. Tu minimalizujte a nakreslete zapojení pomocí kontaktních prvků a logických členů NAND.

a	**b**	**c**	**y**
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

Řešení:

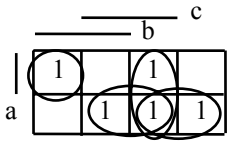
Logická funkce:

Vypíšeme z tabulky pomocí úplné disjunktní normální formy.

$y = \bar{a}\bar{b}\bar{c} + \bar{a}\bar{b}c + \bar{a}b\bar{c} + a\bar{b}\bar{c} + ab\bar{c}$

Karnaughova mapa:

Zapíšeme do Karnaughovy mapy jedničky podle logické funkce.



Z Karnaughovy mapy vypíšeme všechny seskupení jedniček. Mezi každým seskupením dáváme plus. Takto minimalizovanou logickou funkci můžeme ještě upravit pomocí Boolovy algebry.

$$y = \bar{a}\bar{b} + c\bar{b} + c\bar{a} + ab\bar{c} = \bar{b}(\bar{a} + c) + \bar{a}c + ab\bar{c} = \overline{\bar{b}(\bar{a} + c)}\,\overline{(\bar{a}c + ab\bar{c})}$$

Kontaktní schéma:
Sestavíme ho podle minimalizované logické funkce a pomocí zásad, která jsou v přednášce.

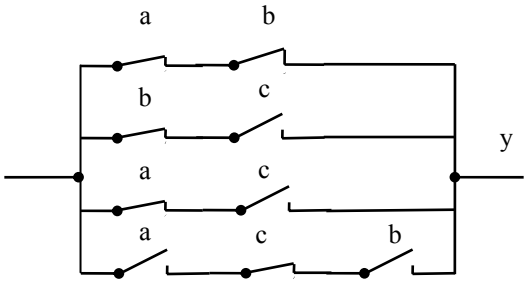
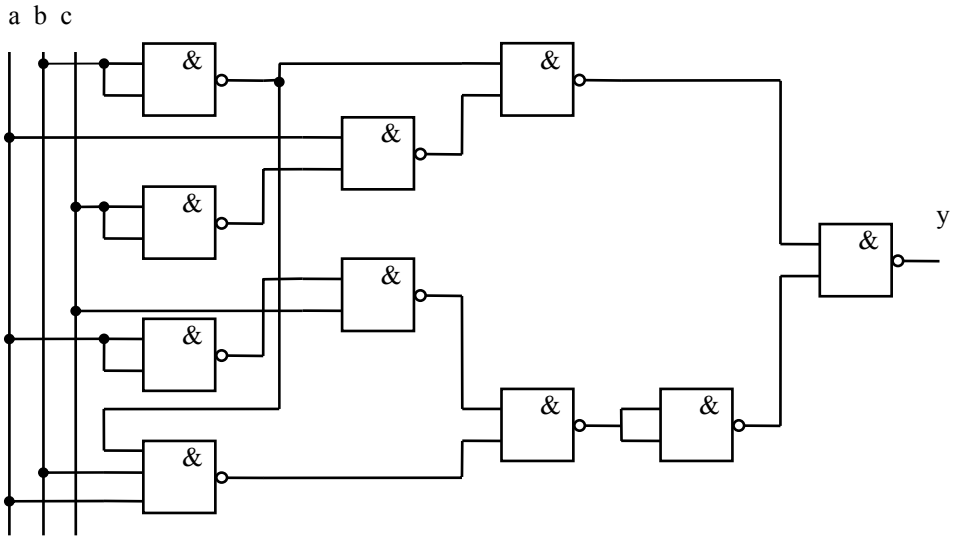
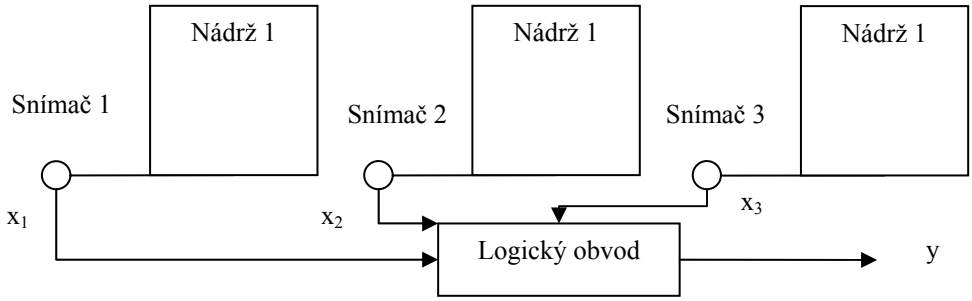


Schéma logických členů NAND:
Sestavíme ho podle minimalizované logické funkce a pomocí zásad, která jsou v přednášce.



Příklad 1.6. ***Příklad na syntézu kombinačního logického obvodu***

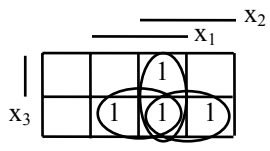
V dílně jsou tři nádrže provozního oleje. Jestliže dvě z nich jsou prázdné, musí se rozsvítit nápis DOPLNIT OLEJ!, aby obsluha provedla doplnění. Navrhněte příslušný logický obvod, sestavený z kontaktních prvků a logických členů NAND



Řešení:
Definice proměnných:
$x_1, x_2, x_3 = 0$ nádrž není prázdná *$x_1, x_2, x_3 = 1$* nádrž je prázdná
$y=0$ nesvítí displej *$y=1$* svítí displej
Pravdivostní tabulka:

x_1	x_2	x_3	y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Karnaughova mapa:



$$y = x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3 = \overline{\overline{x_1x_2}\,\overline{x_1x_3}\,\overline{x_2x_3}}$$

Kontaktní schéma:

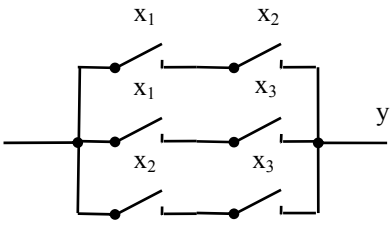
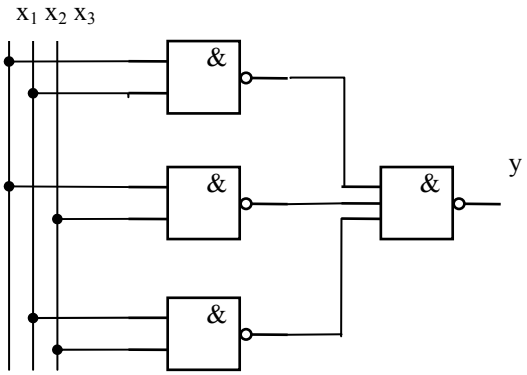
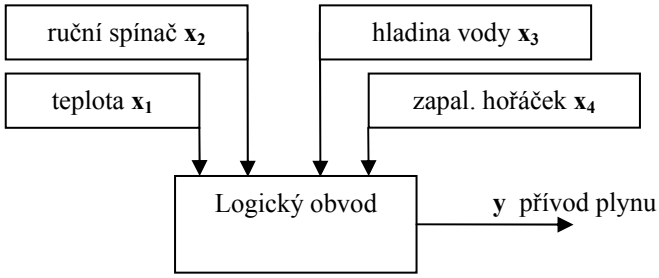


Schéma logických členů NAND:



Příklad 1.7. ***Příklad na syntézu kombinačního logického obvodu***

Automatika kotle pro vytápění rodinného domku má otevírat přívod plynu do kotle, když venkovní teplota klesne pod 15° anebo je sepnut ruční spínač a samozřejmě když je voda v kotli nad minimální hodnotou a hoří zapalovací hořáček. Navrhněte logický obvod, sestavený z kontaktních prvků a logických členů NANDD



Řešení:

$x_1=1$ teplota <15° $x_2=1$ zapnuto $x_3=1$ voda nad min $x_4=1$ hoří $y=1$ plyn otevřen
$x_1=0$ teplota ≥15° $x_2=0$ vypnuto $x_3=0$ voda pod min $x_4=0$ nehoří $y=0$ plyn zavřen

Pravdivostní tabulka:

x1	x2	x3	x4	y
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0

0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	1
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

Karnaughova mapa:
Je zbytečná, protože výsledná funkce je jednoduchá.

$$y = \overline{x_1}x_2x_3x_4 + x_1\overline{x_2}x_3x_4 + x_1x_2x_3x_4 = x_1x_3x_4 + x_2x_3x_4$$

$$y = \overline{\overline{x_1x_3x_4}\,\overline{x_2x_3x_4}}$$

Kontaktní schéma:

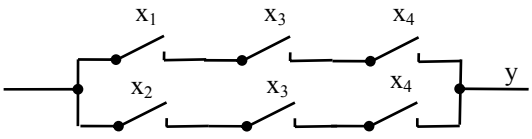
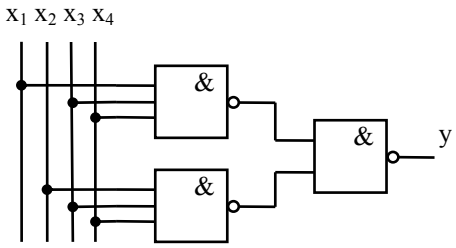


Schéma logických členů NAND:



Shrnutí pojmů 1.2.

V této kapitole se studenti seznámili s možnostmi realizace logických funkcí jak pomocí kontaktních schémat, tak pomocí hradel NAND nebo NOR se dvěma vstupy. Tyto postupy jsou ukázány na čtyřech vzorových řešených příkladech.

Otázky 1.2.

1. Jak se zapojuje logický součin pomocí kontaktních prvků?
2. Dá se kombinační logický obvod zapojit pomocí dvoustopého hradla NAND?
3. Jak se zapojuje logický součet pomocí hradel NOR?

Úlohy k řešení 1.2.

1. Ze zadané pravdivostní tabulky vytvořte logickou funkci. Tu minimalizujte a nakreslete zapojení pomocí kontaktních prvků a logických členů NAND.

X_1	x_2	x_3	y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

2. Ze zadané pravdivostní tabulky vytvořte logickou funkci. Tu minimalizujte a nakreslete zapojení pomocí kontaktních prvků a logických členů NOR.

X_1	x_2	x_3	x_4	y
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	0	1
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	1
1	1	0	1	0
1	1	1	0	1
1	1	1	1	1

3. Ze zadané logické funkce vytvořte pravdivostní tabulku a minimalizujte ji. Nakreslete ji pomocí kontaktních prvků.

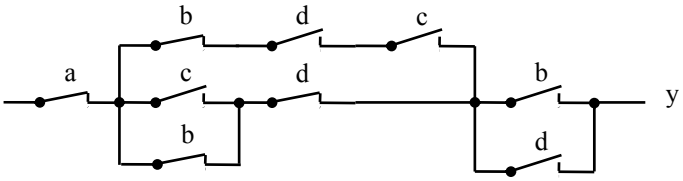
$$y = a\bar{b}c + \bar{a}\bar{b}cd + \bar{a}c + a\bar{b}cd + ab\bar{c}d$$

4. Ze zadané pravdivostní tabulky nakreslete zapojení pomocí logických členů NAND.

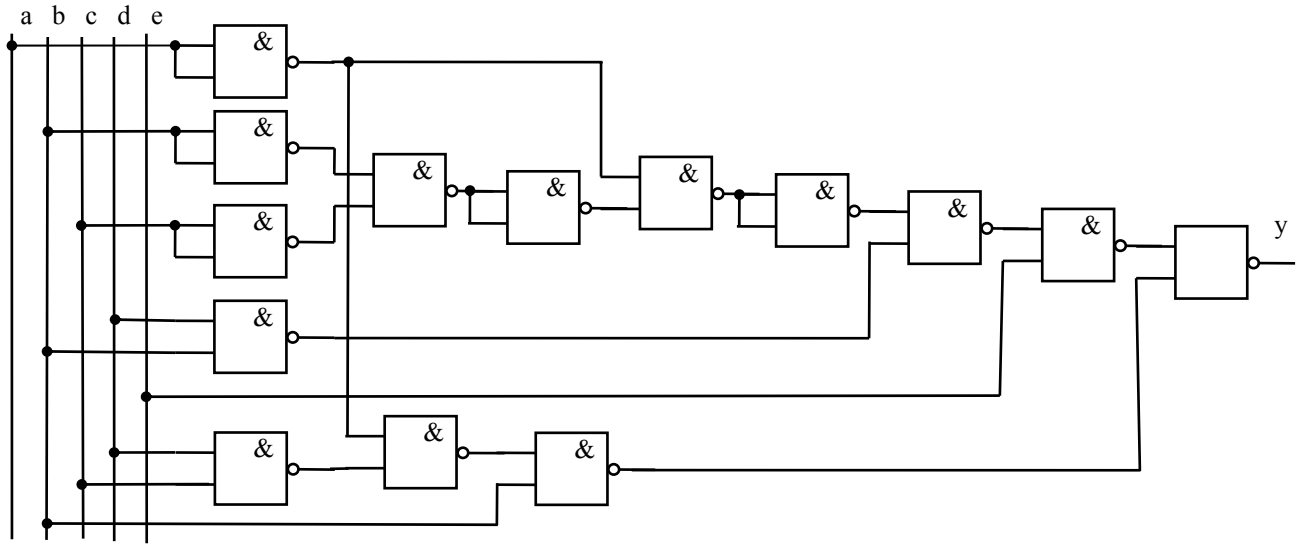
X_1	x_2	x_3	y
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	0

X_1	x_2	x_3	y
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	1

5. Přiřaďte k danému zapojení pomocí kontaktních prvků výslednou logickou funkci. (negace a = NOTa)



6. Přiřaďte k danému zapojení pomocí dvouvstupých hradel NAND výslednou logickou funkci. (negace a = NOTa)



1.3 Časové operace v logickém řízení

Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

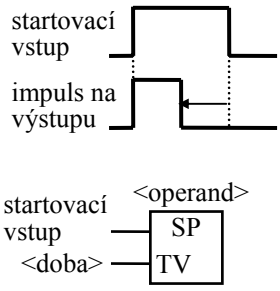
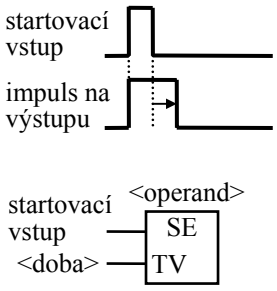
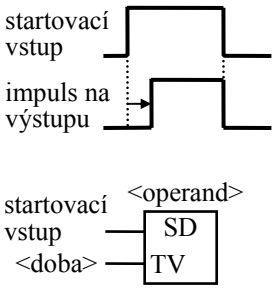
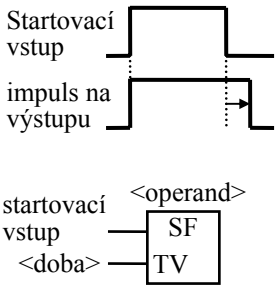
- definovat pojem sekvenční logické funkce
- popsat syntézu sekvenčních logických funkcích.

Výklad

V předcházejících kapitolách byly popsány způsoby jak řešit úlohy kombinační logiky a jak realizovat logické obvody. Do logického řízení však také patří úlohy, kdy je sledováno, co se stane za určitý časový interval. Například je spuštěn kompresor, jehož úkolem je natlakovat určitou nádobu nad tlak, který je indikován například manometrem s elektrickým kontaktem. V případě poruchy kompresoru nebo netěsnosti systému, požadovaný tlak nemůže být nikdy dosažen. Bylo by žádoucí tuto situaci signalizovat například kontrolkou nebo zvukovým výstražným signálem. V souboru dosud popsaných prostředků žádný prvek, který by umožňoval tento problém řešit, popsán nebyl.

V logických systémech s relé bylo k dispozici časové relé, které se dělí na relé se zpožděným přítahem a zpožděným odpadem. U programovacích logických automatů jsou prvky pro řešení časových operací znázorněny v tabulce 1.7. Značka časové operace v blokových schématech pro programovatelné automaty Siemens obsahuje vstupy, kterými je vstupní (startovací) logický signál a délka časového intervalu (TV – Time Value) pro jednu ze čtyř časových operací. Logický signál je datový typ BOOL (Boolean). Délka časového intervalu není logický signál, ale jiný datový typ označovaný TIMER. Nad značkou je operand, který je výstupem tohoto bloku, a je datový typ BOOL. Popsané značky se používají v obecnějším typu blokových schémat než bylo dříve popsáno. V tabulce jsou uvedeny čtyři operace SP, SE, SD nebo SF. Operace SP zkrátí případně delší startovací impuls na dobu TV a operace SE naopak udrží délku impulsu na hodnotě TV nezávisle na délce startovacího impulsu. Operace SD zpozdí náběžnou hranu startovacího impulsu bez vlivu na sestupnou hranu. Operace SF zpozdí sestupnou hranu startovacího impulsu. Při tvorbě programu pro programovací automat je třeba nejdříve zadat délku intervalu TV instrukcí L <doba>. Další instrukce určí typ časové operace a operand, tj. signál ve tvaru impulsu, který je výstupem této operace.

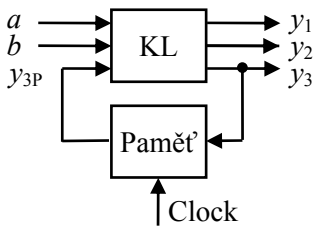
Tabulka 1.7 – Časové funkce

Funkce: SP (start timer as pulse)	Funkce: SE (start timer as extended pulse)	Funkce: SD (start timer as ON delay)	Funkce: SF (start timer as OFF delay)
			
Zápis programu: L <doba> SP <operand>	Zápis programu: L <doba> SE <operand>	Zápis programu: L <doba> SD <operand>	Zápis programu: L <doba> SF <operand>

❑ Sekvenční logické obvody

Kombinační logická funkce popisuje relaci mezi závisle proměnnou (výstup KL) a skupinou nezávisle proměnných (vstupy KL), přičemž se předpokládá, že výstupy neovlivňují vstupy. Naproti tomu výstup sekvenčního logického obvodu y závisí nejen na zmíněných nezávislých vstupech, ale také na minulých výstupech y_P tohoto obvodu. Platí

$$y = f(y_P, a, b, c, ...) \qquad (1.15)$$



Obrázek 1.14 – Sekvenční logický obvod

V kombinačním logickém obvodu na obrázku 1.14 je přidána ke kombinačnímu logickému obvodu zpětná vazba, která je zprostředkována paměťovým blokem. Přepis hodnot vstupních proměnných paměťového bloku na jeho výstup je řízen tzv. hodinovými impulsy (CLOCK). Důvodem zařazení paměťového bloku je zpoždění dvouhodnotových signálů při průchodem bloku kombinační logiky. U mechanických relé je zapotřebí určité doby na ustálení kontaktů stejně tak elektronické obvody mají svoje zpoždění třeba v nanosekundách.

Interval mezi hodinovými impulsy, které řídí paměť, je nastaven tak, že dojde k ustálení všech přechodových dějů.

Paměťový blok není nezbytně zapotřebí pokud oddělení minulosti a přítomnosti zajistí setrvačnost řízeného procesu. Jestliže je tento blok potřebný, pak je realizován klopnými obvody, které budou popsány později.

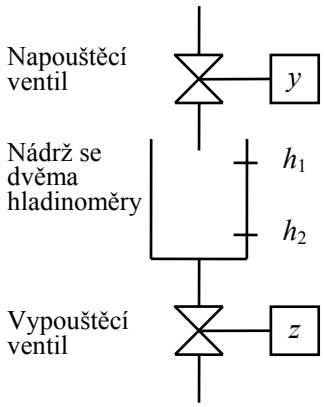
Syntéza sekvenčního logického řízení bude demonstrována na sekvenčním řízení zaplnění nádrže kapalinou, jehož funkční schéma je znázorněno na obrázku 1.15. Odtok kapaliny ovládá vypouštěcí ventil. Jeho otevření ($z = 1$) nebo uzavření ($z = 0$) představuje poruchu, jehož vlivu na zaplnění nádrže má čelit sekvenční řídicí obvod přítoku kapaliny do nádrže. Tento ventil je buď otevřen ($y = 1$) nebo uzavřen ($y = 0$), nabývá tedy dvou hodnot. Zaplnění nádrže indikují dva hladinoměry (stavoznaky) s dvouhodnotovým výstupem. Logická jednička znamená překročení hladiny ($h_1 = 1$, $h_2 = 1$) a logická nula signalizuje, že hladina je nižší. Hladinoměr h_1 je nad hladinoměrem h_2.

Příklad 1.8. ***Příklad syntézy sekvenčního logického obvodu***

Slovní zadání funkce sekvenčního logického obvodu je následující:

- Jestliže je napouštěcí ventil otevřen ($y_P = 1$) a je překročena hladina na horním hladinoměru ($h_1 = 1$), pak je třeba napouštěcí ventil uzavřít ($y = 0$).
- Jestliže je napouštěcí ventil uzavřen ($y_P = 0$) a hladina kapaliny je nižší než úroveň dolního hladinoměru ($h_2 = 0$), pak je třeba napouštěcí ventil otevřít ($y = 1$).
- V ostatních případech nechť se nastavení napouštěcího ventilu nemění.

Řešení:



Obrázek 1.15 – Schéma řízené soustavy

Ve slovním zadání se rozeznává stávající nastavení napouštěcího ventilu (index P u veličiny y) a nové nastavení (y), které má být výstupem sekvenčního obvodu. Vstupními proměnnými je tedy stávající stav napouštěcího ventilu (y_P) a dvouhodnotové výstupy obou hladinoměrů (h_1, h_2)Dalším krokem je sestavení tabulky přiřazující kombinace hodnot vstupních proměnných k výstupní závisle proměnné, kterým je žádoucí nastavení napouštěcího ventilu y. Za účelem optimalizace funkčního předpisu je výhodné vyplnit Karnaughovou mapu.

y \ h_2 h_1				
	1	0	0	X
y_P	1	1	0	X

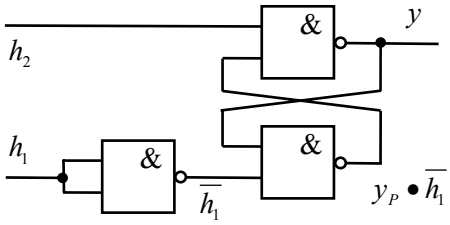
Jednotlivá pole mapy lze podle pravidel řízení vyplnit až na kombinaci údajů hladinoměrů předpokládající, že horní hladinoměr signalizuje překročení hladiny a současně dolní hladinoměr signalizuje nedosažení spodní hladiny, což je zjevný nesmysl. Tato pole je vhodné doplnit logickými jedničkami, aby zápis funkce byl co nejjednodušší.

$$y = \overline{h_2} + y_P \bullet \overline{h_1}$$

Pro realizaci této funkce hradly NAND je třeba vzorec upravit do tvaru

$$y = \overline{\overline{\overline{h_2} + y_P \bullet \overline{h_1}}} = \overline{h_2 \bullet \overline{y_P \bullet \overline{h_1}}}$$

Blokové schéma příslušného sekvenčního obvodu je znázorněno na obrázku 1.16. Ve schématu je propojen výstup obvodu y s jeho minulou hodnotou y_P.



Obrázek 1.16 – Zapojení sekvenčního obvodu

Toto propojení může být zdrojem nestability. Protože hladinoměry obvykle vykazují hysterezi, lze předpokládat, že sekvenční obvod bude stabilní. Jestliže změna výstupního signálu hloubkoměrů, tj. přechod $0 \to 1$ a $1 \to 0$ nastává při různých hladinách, pak nemůže dojít k rozkmitání obvodu. Jiným řešením stabilizace obvodu je zpoždění otevření a zavření ventilu pomocí dříve definovaných časových funkcí.

Shrnutí pojmů 1.3

Kapitola je věnována časovým operacím v logických funkcích a definici sekvenčních logických funkcí, včetně řešeného příkladu.

Otázky 1.3.

1. Co je to sekvenční logická funkce?
2. Co obsahují sekvenční logické obvody?

1.4 Klopné obvody

Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat klopné obvody a jejich základní typy.

Výklad

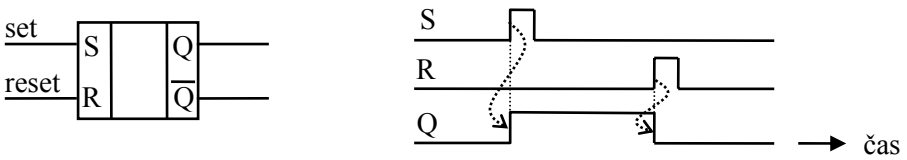
Klopné obvody (KO) jsou prvky s vnitřní pamětí dvou stavů. Těchto prvků je několik typů. Ve skriptech budou popsány klopné obvody typu RS, D a JK. Tyto klopné obvody mají dva výstupy, jeden výstup je tzv. přímý Q a druhý výstup je jeho negací $\overline{Q}$. Uvedené typy klopných obvodů se liší počtem a účinkem svých vstupů. Klopný obvod střídá v důsledku změn vstupů logickou hodnotu přímého a negovaného výstupu. Jak je zřejmé přímý výstup může nabýt hodnoty logické nuly nebo jedničky a negovaný výstup opačně logické jedničky nebo nuly. Tento jev se označuje jako klopení.

Klopný obvod lze zkonstruovat například z elektronických součástek. Zařízení vykazující dva stabilní stavy lze vytvořit také na mechanickém, pneumatickém nebo hydraulickém principu. Mechanickým klopným obvodem je obyčejný kolíbkový světelný vypínač, se kterým se setkáváme každý den. Každý ví, že má dvě stabilní pozice (vypnuto a zapnuto) a že ke změně pozice je třeba zásahu zvenčí, tj. stlačení jedné nebo druhé strany pohyblivé části spínače.

Klopný obvod typu RS

Klopný obvod tohoto typu má dva vstupy: nastavovací S (set) a resetovací R (reset). Impuls přivedený na vstup S klopného obvodu způsobí jeho překlopení ze stavu $Q = 0$ do stavu $Q = 1$. Jestli je klopný obvod již ve stavu $Q = 1$, pak se nestane nic. Účinek impulsu na vstupu R je opačný. V případě, že klopný obvod je ve stavu $Q = 1$, pak se překlopí do stavu $Q = 0$. Jestliže v tomto stavu klopný obvod již byl, pak se také neděje nic.

Vlastnosti klopných obvodů se popisují časovými diagramy, které znázorňují časový průběh vstupních signálů a změny stavu klopného obvodu. Obvodová značka a časový diagram funkce klopného obvodu RS je na obrázku 1.17. Změna stavu klopného obvodu nastává v reakci na náběžnou hranu impulsů. V diagramu na zmíněném obrázku je zdůrazněn časový okamžik klopení šipkou směřující od nástupné hrany impulsů S a R k nástupné a sestupné hraně přímého výstupu Q. Negovaný výstup není v diagramu nakreslen, avšak jeho časový průběh si lze domyslet.



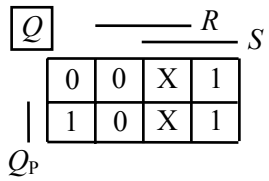
Obrázek 1.17 – Obvodová značka a časový diagram funkce klopného obvodu RS

Funkci klopné obvodu lze popsat dříve definovanými nástroji, tj. tabulkou nebo Karnaughovou mapou, která může být podkladem k odvození vzorce.

Tabulka funkčních hodnot KO typu RS

S	R	Q
0	0	předchozí stav
0	1	0
1	0	1
X	X	dáno zapojením

Karnaughova mapa popisující KO typu RS



Nedefinovaný výstup je pro situaci, kdy oba vstupy, tj. R a S, nabývají hodnotu logické jedničky. To odpovídá případu, kdy je současně požadováno nastavení a resetování klopného obvodu, což se samo sebou jeví jako nesmyslný požadavek. K odvození vzorce je přesto potřeba Karnaughovu mapu doplnit. Možnosti doplnění jsou čtyři, z nichž jen dva způsoby jsou z hlediska jednoduchosti výsledného vzorce výhodné. Pro obě nedefinované funkční hodnoty (znak X v mapě) lze zvolit logické jedničky nebo nuly. Jestliže se použijí pro obě pole logické jedničky, pak je vzorec popisující chování klopného obvodu následující.

$$Q = S + \overline{R} \bullet Q_P \tag{1.16}$$

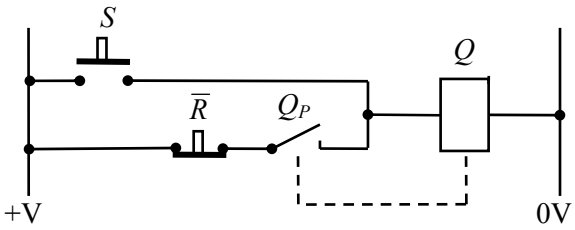
Realizovat logickou funkci podle vzorce (1.21) lze například pomocí kontaktů relé, viz obrázek 1.18. Kontakt s označením Q_P je ovládán cívkou relé Q. Stiskem tlačítka S se do relé přivede proud, který sepne spínací kontakt Q_P. Stiskem resetovacího tlačítka $\overline{R}$ se relé uvede do klidového stavu. Popsaný obvod představuje paměť nejmenšího možného množství informace, kterým je jeden bit. Tato jednotka znamená, že si lze vybrat ze dvou možností (sepnuto/rozepnuto).

Druhou možností doplnění Karnaughovy mapy je doplnění logickými nulami. Výsledný vzorec má po úpravách tvar

$$Q = Q_P \bullet \overline{R} + S \bullet \overline{R} = \overline{R} \bullet (Q_P + S) \tag{1.22}$$

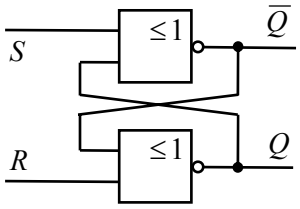
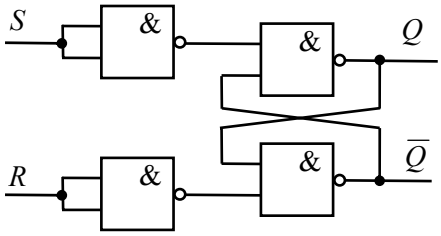
Také podle tohoto vzorce lze sestavit klopný obvod z kontaktů relé.

Klopný obvod lze sestavit také z integrovaných obvodů NOR a NAND.



Obrázek 1.18 – Kontaktní schéma KO typu RS

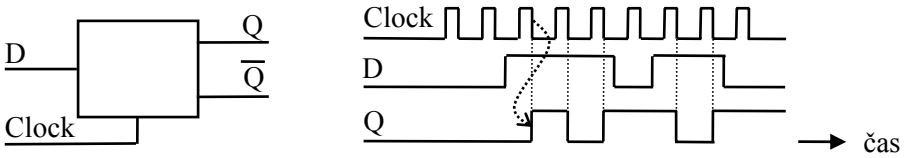
Vzorec (1.21) a (1.22) obsahuje jeden logický součet a jeden součin. S využitím de Morganových pravidel (1.13) lze dvojitou negací součtu nebo součinu, například u vzorce (1.22), obdržet zápis, podle kterého lze snadno sestavit zapojení zmíněných hradel na obrázku 1.19. Výraz $\overline{(Q_P + S)}$ u zapojení s hradly NOR označuje výstup $\overline{Q}$ a výraz $\overline{\overline{Q_P} \bullet \overline{S}}$ u zapojení s NAND označuje Q. Pro $S = 0$ platí identity $Q = Q_P$ a $\overline{Q} = \overline{Q_P}$ a pro $S = 1$ je $\overline{Q} = 0$ a $Q = 1$ pro zapojení s NOR, respektive NAND.

Hradla NOR:	Hradla NAND:
$Q = \overline{\overline{R} \bullet \overline{(Q_P + S)}} = \overline{R + \overline{(Q_P + S)}}$	$\overline{Q} = \overline{\overline{R} \bullet \overline{(Q_P + S)}} = \overline{\overline{R} \bullet \overline{Q_P} \bullet \overline{S}}$
	

Obrázek 1.19 –Klopné obvody typu RS z hradel NOR a NAND

❑ Klopný obvod typu D

Klopný obvod tohoto typu má dva vstupy. Na jeden vstup se zapojí zdroj (tzv. hodinových) impulsů (Clock) a na druhý vstup D libovolný dvouhodnotový signál. Výstup tohoto KO se klopí jen když je na vstup D přivedena logická jednotka. Okamžik klopení je na časovém diagramu na obrázku 1.20 dán sestupnou hranou impulsů Clock. Označení Clock má svůj původ ve generátoru vysokofrekvenčních impulsů o stálé frekvenci, který je součástí digitálních hodin a každého počítače.



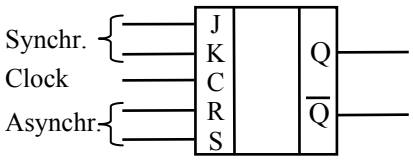
Obrázek 1.20 – Obvodová značka a časový diagram klopného obvodu typu D

❑ Klopný obvod typu JK

Klopný obvod JK má pět vstupů. Jsou to vstupy R a S se stejnou funkcí jako u klopného obvodu typu RS. Kdykoliv po příchodu impulsu na vstup S je výstup Q překlopen na logickou jedničku a také kdykoliv po příchodu impulsu na vstup R je tento výstup Q překlopen na logickou nulu. Další dvojice vstupů je označena J a K. Účinek vstupního signálu na těchto dvou vstupech je vázán na vstup Clock s hodinovými impulsy. Signál logické jedničky na vstupu J klopí výstup Q do logické jedničky jen v okamžiku sestupné hrany hodinového impulsu. Podobně signál logické jedničky na vstupu K klopí výstup Q do logické nuly.

Tabulka:

J	K	Q_{n+1}
0	0	Q_n
0	1	0
1	0	1
1	1	$\overline{Q_n}$



Obrázek 1.21 – Obvodová značka klopného obvodu typu JK

Chování klopného obvodu lze popsat tabulkou. Narozdíl klopnému obvodu RS je definován také stav, kdy oba vstupy J a K jsou na logické jedničce. V tomto případě se klopný obvod chová stejně jako klopný obvod typu D. Jestliže se vstupy J a K nezapojí a zůstanou volné, pak se klopný obvod chová jakoby na těchto vstupech byla logická jednička.

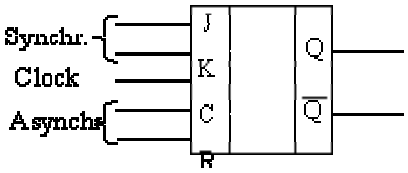
Obvodová značka klopného obvodu JK je na obrázku 1.21. Jeho vstupy jsou podle výše popsané funkce rozděleny na synchronní, asynchronní a hodiny (Clock).

Shrnutí pojmů 1.4.

V kapitole jsou popsány klopné obvody, jejich základní typy a realizace a časový diagram.

Otázky 1.4.

1. Kolik mají stavů klopné obvody?
2. Kdy se klopí výstup KO typu D?
3. Jakého obvodu je značka na obrázku?



1.5 Zapojení klopných obvodů v sekvenčních obvodech

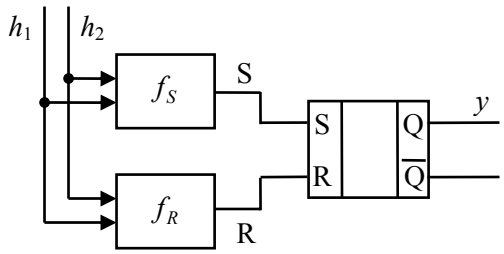
Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat použití klopných obvodů pro realizaci sekvenčních logických funkcí.

Použití klopného obvodu typu RS

Použití klopného obvodu bude demonstrováno na příkladu řízení zaplnění nádrže na obrázku 1.15. K řízení je použit napouštěcí ventil a dva hladinoměry h_1, h_2. Dvouhodnotový výstup y ovládá otevření a zavření napouštěcího ventilu. Nechť jako paměť nastavení tohoto ventilu je použit klopný obvod typu RS. Syntéza tohoto sekvenčního obvodu spočívá v návrhu kombinačních obvodů, jejichž výstup bude ovládat nastavovací a resetovací vstup klopného obvodu na obrázku 1.22. Hledá se tedy funkce



Obrázek 1.22 – Použití klopného obvodu RS v sekvenčním obvodu

$$S = f_S(h_1, h_2)$$
$$R = f_R(h_1, h_2) \qquad (1.17)$$

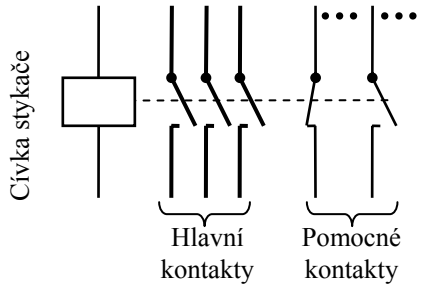
Návrh obou kombinačních obvodů bude proveden s využitím Karnaughovy mapy. Prvním krokem syntézy je vyplnění polí mapy podle pravidel pro ovládání napouštěcího ventilu ze zmíněného obrázku. Pro generování signálu nastavovacího (S) je třeba, aby dolní hladinoměr h_2 signalizoval pokles hladiny pod jeho úroveň, přičemž na výstupu horního hladinoměru h_1 nezáleží. Pro vznik signálu resetovacího je požadováno, aby byla překročena hladina horního hladinoměru h_1. Formální postup řešení této elementární úlohy s použitím Karnaughovy mapy je znázorněn na obrázku 1.23.

S | h_2 1 0 X 0 h_1	Funkce pro nastavení KO $S = \overline{h_2}$	R | h_2 0 0 X 1 h_1	Funkce pro resetování KO $R = h_1$

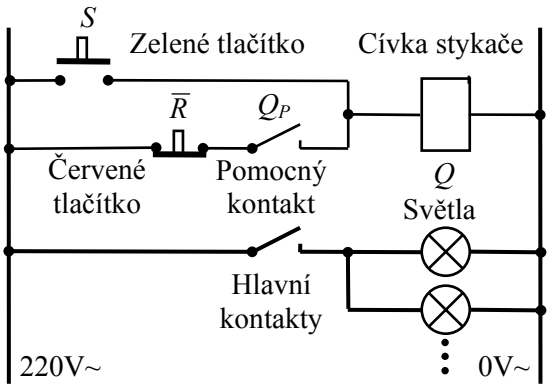
Obrázek 1.23 – Návrh KL obvodů pro vstup S a R klopného obvodu pro řízení zaplnění nádrže

Další příklad použití klopného obvodu RS bude ke spuštění a zastavení libovolného elektrického zařízení, například osvětlení. Často je zapnutí a vypnutí přívodu elektřiny vykonáno změnou polohy vypínače, například změnou polohy páčky nebo otočením

ovládacího prvku. Pohodlnější je však stisk zeleného tlačítka pro rozběh stroje nebo stisk červeného tlačítka pro jeho zastavení. Tuto funkci řeší jednoduchý sekvenční obvod se stykačem. Stykač je relé s kontakty, které jsou dimenzovány na rozdílné proudové zatížení, viz obrázek 1.24. Hlavní kontakty stykače jsou dimenzovány na velký proud, zatímco jeho pomocné kontakty jsou pro malý proud. Stykače se používají k připojování spotřebičů o výkonu 1 kW až 500 kW. Kontaktové schéma ovládacího obvodu je na obrázku 1.25.



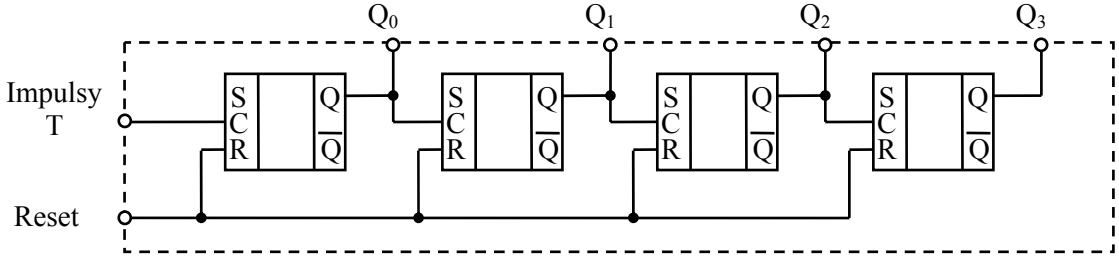
Obrázek 1.24 – Stykač



Obrázek 1.25 – Stykač

❑ Použití klopného obvodu typu JK pro čítání impulsů

Každý ví, co je to počítadlo ujetých kilometrů v automobilu. Dříve bylo toto počítadlo mechanické, s dělením po dekádách. Jedna dekáda odpovídala 10 stavům s čísly od nuly do devíti. Mechanicky bylo zajištěno, že jedno otočení kolečka s nižší dekádou vyvolalo otočení kolečka s vyšší dekádou o jednu desetinu. Konstrukce elektronických počítadel, nazývaných čítače, se opírá o elektronické prvky, které mají jen dva stavy. Začalo to u prvních pokusů sestavit počítač s elektromechanickými relé v roce 1934 v Německu (Konrád Zuse, počítače Z1, Z2 a Z3 – první použitelný počítač s 2600 relé). Jednoduchost realizace logických operací tento princip počítání se dvěma stavy udržela až do současné doby. Výpočty a funkce jsou založeny na dvojkové soustavě čísel, které obsahující jen dvě cifry (nulu a jedničku) pro jedno místo čísla. Tyto cifry dvojkové soustavy se mohou pamatovat v jednom klopném obvodu. Jedna cifra pak obsahuje informaci o velikosti jednoho bitu. Dva klopné obvody uchovávají informaci o velikosti 2 bitů, přičemž počet různých stavů je roven 2^2 (tj. 00, 01, 10, 11). Obecně počet *m* klopných obvodů představuje paměť *m* bitů s počtem stavů 2^m.



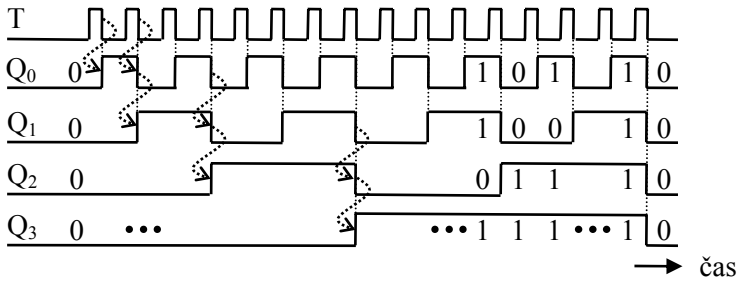
Obrázek 1.26 – Zapojení 4bitového dvojkového čítače o kapacitě 16 stavů

V následujícím příkladu bude demonstrováno použití klopného obvodu JK k návrhu 4bitového dvojkového čítače. Ve schématu zapojení bude předpokládáno, že vstupy JK nejsou zapojeny (stejný efekt má přivedení logické jedničky), proto bude KO pracovat jako typ D. Čítač bude obsahovat tedy čtyři klopné obvody. Celkový počet kombinací čtveřic nul

a jedniček je $2^4 = 16$. Čítač má kapacitu 16 stavů a je schopen spočítat 0 až 15 impulsů. Jednotlivé bity se budou pamatovat klopnými obvody s výstupy Q_0, Q_1, Q_2 a Q_3. Počítány budou impulsy T na vstupu Clock prvního klopného obvodu. Čítač lze vynulovat vstupem Reset. Zapojení čítače je na obrázku 1.26.

Jak je zřejmé z časového diagramu na obrázku 1.27, sekvenční obvod prochází postupně 16 stavy, které jsou dány výstupy obvodů Q_3, Q_2, Q_1, Q_0. Nechť logická nula odpovídá dvojkové nule 0_2 (a také dekadické nule 0_{10}) a logická jednička odpovídá dvojkové jedničce 1_2 (a také dekadické jedničce 1_{10}). Bity v pořadí od Q_3 do Q_0 představují číslo ve dvojkové soustavě. Zmíněných 16 stavů obvodu odpovídá hodnotám od 0000_2 až po 1111_2. Přepočet výstupů klopných obvodů na dekadickou hodnotu je podle následujícího vzorce, do kterého se za veličiny Q_0 až Q_3 dosazují desítkové nuly nebo jedničky, protože jejich numerická hodnota je shodná s dvojkovými nulami a jedničkami

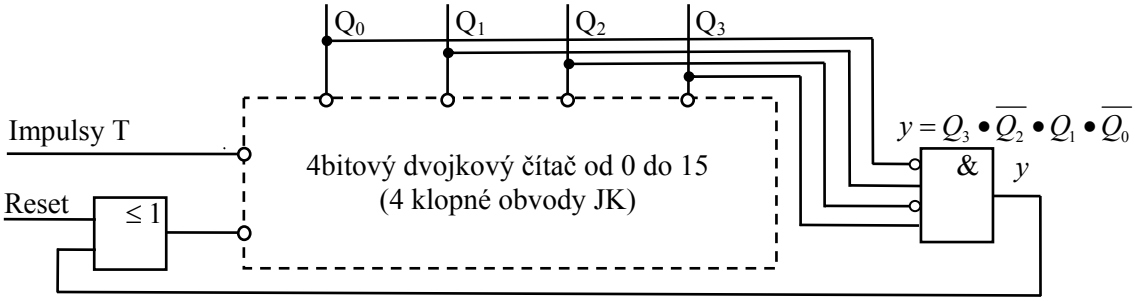
$$K = Q_3 2^3 + Q_2 2^2 + Q_1 2^1 + Q_0 2^0 \qquad (1.18)$$



Obrázek 1.27 – Časový diagram posloupnosti stavů dvojkového čítače

V šestnáctkové soustavě jsou tyto stavy označeny ciframi 0, 1, 2, ..., 9, A, B, ..., F. Dvě šestnáctkové cifry představují desítkové číslo od 0 do $2^8 - 1 = 255$ desítkově, tj. od 00 do FF šestnáctkově. Tyto dvě cifry obsahují kombinaci osmi nul nebo jedniček a tvoří jeden byte (čti bajt).

Čítač omezený na 10 stavů, tj. pro desítkové cifry 0 až 9, musí být při dosažení stavu $1010_2 = 10_{10}$ resetován. Zapojení čítače z obrázku 1.23 je třeba upravit. Výsledek úprav je znázorněn na obrázku 1.28. Toto zapojení může představovat jednu dekádu čítače, který pracuje po desítkách. Výsledek funkce tohoto obvodu představuje čtveřici bitů o počtu rovném počtu dekád. Takto organizovaným datům se říká BCD kód, tj. binárně kódované desetinné místo (anglicky Binary Coded Decimal).



Obrázek 1.28 – Zapojení dvojkového čítače o kapacitě 10 stavů

Shrnutí pojmů 1.5.

Kapitola popisuje možností použití jednotlivých typů klopných obvodů k realizaci sekvenčních logických funkcí. Jsou zde popsány konkrétní aplikace (stykač, čítač impulsů, dvojkový čítač,.

Otázky 1.5.

1. Z čeho se skládá čítač?

1.6 Sekvenční funkční diagramy

Čas ke studiu: 1 hodina

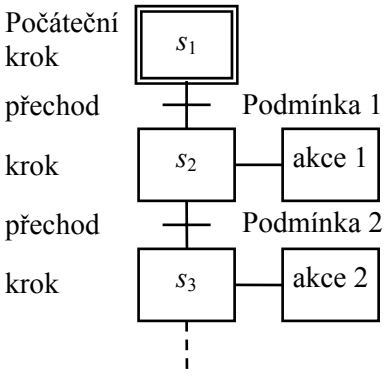
Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat sekvenční funkční diagram a jeho použití.
- popsat tvorbu funkčního schématu.
- vyřešit převod funkčního schématu na sekvenční funkční diagram.

Výklad

Mnohé technologické procesy nejsou kontinuální, ale představují periodicky se opakující posloupnost akcí, jako je otevření a uzavření ventilů, rozběh nebo doběh pohonů, čekání na dosažení hladiny nebo teploty, a pod.. K popisu takového algoritmu řízení je třeba srozumitelný jazyk a pravidla, jako například při kreslení strojařských výkresů. Zmíněná funkce sekvenčního logického systému řízení se popisuje sekvenčním funkčním diagramem (anglicky Sequential Function Chart). Tyto diagramy jsou standardizovány normami, například ČSN EN 61131-3, DIN EN 61131-3 (obě jsou evropskými normami) nebo IEC 1131-1 (mezinárodní elektrotechnická norma). Sekvenční funkční diagramy doplňují dříve uvedené tři způsoby programování programovatelných automatů.

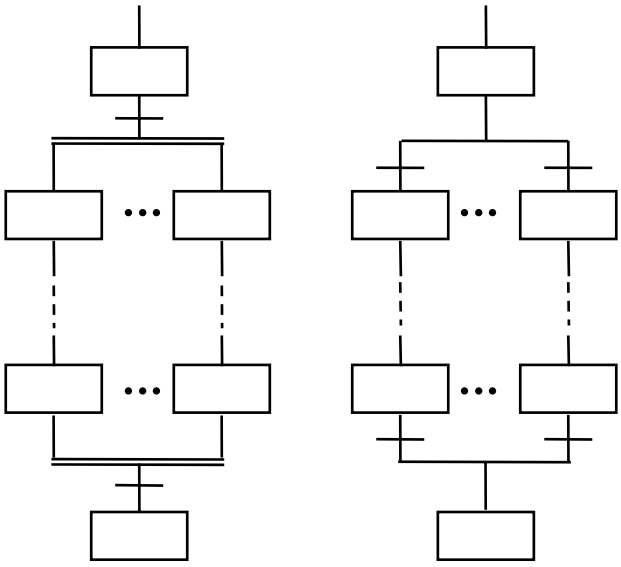
Příklad sekvenčního funkčního diagramu je na obrázku 1.29. Sekvenční diagram obsahuje dva typy prvků: kroky a přechody, které tyto kroky spojují. Krok je překlad anglického označení step, které má stejný význam jako české slovo stav. Pod označením krok nebo stav se rozumí určitá kombinace polohy kontaktů, logické úrovně na výstupu hradel nebo logické hodnoty proměnných programů. Každému kroku jsou přiřazeny akce (actions), které představují výstup logického systému řízení jako například otevření ventilů atd.. Kroky jsou aktivní nebo neaktivní. Aktivní krok odpovídá stavu, který v daném okamžiku v systému řízení nastal. Neaktivní kroky jsou stavy ostatní. Je zřejmé, že krok který je v určitý okamžik aktivní, se po splnění podmínky pro přechod (transition) mezi kroky stane krokem neaktivní a aktivním krokem se stane krok následující.



Obrázek 1.29 – Sekvenční funkční diagram

Jeden z kroků má označení počáteční krok. V sekvenčním diagramu se vyznačuje dvojitým orámováním bloku. Označení kroku se vpisuje dovnitř bloku. V našem diagramu je to logická proměnná (nabývá hodnoty logické nuly nebo jedničky). Bloky jsou spojeny přechody v podobě hrany grafu (prostá úsečka). U každého přechodu je vyznačena podmínka přechodu. Je to logická proměnná nebo výraz složený z několika logických proměnných. Jestliže se logická hodnota podmínky stane logickou jedničkou, přechod (přiřazení nového aktivního stavu) se uskuteční. Diagram se kreslí tak, že tyto přechody probíhají shora dolů, tudíž musí dosáhnout svého konce. Z konce diagramu se opět za splnění předepsaných podmínek přechodu vrací aktivní krok na krok počáteční.

Reálné výrobní procesy nejsou obvykle tak jednoduché, že tvoří jen jednoznačnou posloupnost kroků. Algoritmy řízení se větví do paralelních posloupností kroků a opět spojují. Pro tyto případy jsou definována určitá pravidla. Rozlišují se různé způsoby větvení a to na divergentní a konvergentní AND a divergentní a konvergentní OR. Tyto dva způsoby větvení jsou znázorněny na obrázku 1.30.



Divergentní a konvergentní AND

Divergentní a konvergentní OR

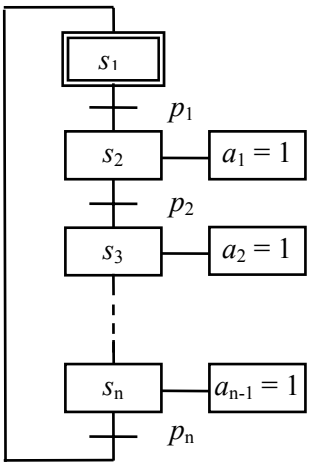
Obrázek 1.30 – Pravidla větvení sekvenčních diagramů

Při rozvětvení (divergenci) se způsob označený AND liší od způsobu označeného OR umístěním podmínky přechodu. Při divergentním AND po splnění podmínky přechodu přechází aktivní krok do všech větví diagramu současně a posloupnosti se vykonávají paralelně ovšem s přechody danými v každé větvi zvlášť. Před spojením paralelních posloupností kroků do prvního kroku po větvení AND je třeba splnit jen jednu podmínku.

Narozdíl od větvení AND je při větvení OR vykonávána posloupnost kroků jen v jedné větvi. Jestliže je při tomto způsobu (OR) rozvětvení splněno více podmínek přechodů do různých větví, pak se vybere větev nejvíce vlevo. Z rozvětvené části sekvenčního diagramu dojde k přechodu na společný krok po splnění podmínky přechodu na konci větve, jejíž posloupnost kroků se vykonává.

V předchozím textu kapitoly o logickém řízení byly popsány způsoby realizace logických obvodů pomocí kontaktů a hradel. Nyní bude popsáno počítačová realizace funkce sekvenčního logického řízení. Počítačový program je složen z posloupnosti instrukcí, které se v rychlém sledu vykonávají. Nejjednodušší je jednorázový start programu nebo dávky programů, který nebo které se po vykonání určité skupiny instrukcí ukončí. Na rozdíl od tohoto režimu práce počítače, například pro zpracování dat, jsou počítače pro řízení využívány jiným způsobem. Program běží nepřetržitě tak, že se posloupnost instrukcí opakuje s periodou velmi malého zlomku sekundy, například 5 ms, přičemž samotné instrukce se vykonávají o několik řádů rychleji. To znamená, že se opakovaně propočítávají všechny vzorce pro logické funkce, přičemž se respektují všechny změny na vstupech počítače.

Algoritmizace logického sekvenčního řízení do počítačového programu bude vysvětlena na příkladu, jehož sekvenční funkční diagram je znázorněn na obrázku 1.31. Logické proměnné v tomto diagramu jsou použity také v programu. V diagramu jsou tyto logické proměnné:



Obrázek 1.31 – Příklad pro programování

- Vnitřní proměnné označující jednotlivé kroky s_1, s_2, ..., s_n. Tyto proměnné nabývají hodnotu nula pro neaktivní krok a hodnotu jedna pro aktivní krok. V příkladu sekvence podle obrázku 1.27 může být jen jeden aktivní krok na rozdíl od sekvenčních diagramů, kde nastává divergence AND. Z důvodu algoritmického řešení programu, jak bude vysvětleno dále, mohou být po dobu jednoho opakování skupiny instrukcí dva aktivní kroky

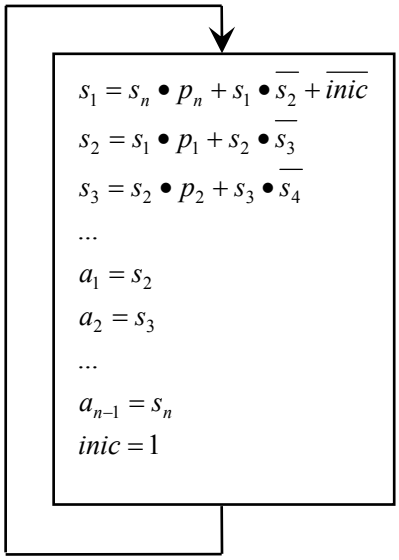
- Podmínky přechodů p_1, p_2, ..., p_n jsou logické proměnné spojené se vstupy počítače. Nabývají logických hodnot signalizujících překročení hladiny nebo teploty.

- Logické proměnné představující akce a_1, a_2, ..., a_{n-1}, které určují výstupy počítače. Jestliže tato proměnná nabude hodnoty jedna, pak se například otevře příslušný ventil.

- Pro úplnost je mezi proměnnými také proměnná *inic*, která je po startu počítače bezpečně vynulována. Zajistí správný start algoritmu tím, že umožní, aby proměnná s_1, která je spojena s počátečním krokem, byla nastavena na logickou hodnotu jedna.

Posloupnost logických funkcí k výpočtu pro aktuální kombinaci hodnot logických proměnných je uvedena ve vývojovém diagramu na obrázku 1.32. Bezprostředně po spuštění programu jsou všechny proměnné vynulovány (dosazeny logické nuly), tj. také proměnná *inic*. Žádný krok není také v tomto stavu programu aktivní. Dále je předpokládáno, že není splněna žádná podmínka přechodu.

S výjimkou prvního vzorce mají všechny ostatní vzorce pro výpočet vnitřních proměnných s_i dva členy logického součtu. První člen $s_i \bullet p_i$ tohoto logického součtu zajišťuje za splnění podmínky přechodu ($p_i = 1$) předání funkce aktivního kroku také následujícímu kroku, tj. nastavení logické proměnné s_{i+1} na logickou jedničku. V tomto průchodu jsou podle hodnot proměnných aktivní dva kroky (s_i a s_{i+1}). Následující výpočet však původní proměnnou vynuluje, protože ji předchází proměnná s_{i-1} s nulovou logickou hodnotou (ovlivňuje první člen součtu) a druhý člen logického součtu je také nulový, protože v součinu obsahuje negaci proměnné s_{i+1}, která je již na logické jedničce z minulého opakování programu. Vzhledem k velmi rychlému opakování výpočtů tato dvojznačnost není na závadu. Udržení hodnoty logické proměnné s_i na logické jedničce při opakování výpočtů je zajištěno druhým členem logického součtu $s_i \bullet \overline{s}_{i+1}$. Hodnota s_i je logická jednička a hodnota s_{i+1} je logická nula a ovšem její negace je logická jednička, proto je uvedený součin roven jedné.



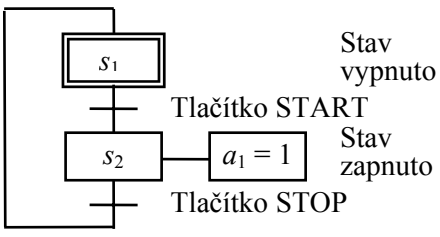
Obrázek 1.32 – Posloupnost vzorců pro přepočítávání proměnných

Přiřazení akcí, které jsou dány hodnotami výstupních proměnných a_i, na konec přepočtu vnitřních proměnných s_i je jen otázkou přehlednosti programu.

Počítač neustále přepočítává hodnoty logických funkcí ve velmi rychlém sledu a tak reaguje na změny podmínek pro přechody s odezvou v akcích, které představují výstupy počítače do technologického procesu. Postupné splnění podmínek přechodu zajišťuje také posouvání aktivního kroku a provádění příslušných akcí. Je pravděpodobné, že čtenář těchto skript nebude program upravovat, ale měl by jeho řešení vzít v úvahu při obsluze tohoto řídicího systému.

❑ Příklad na sestavení sekvenčního funkčního diagramu

V kapitole o realizaci klopných obvodů pomocí relé byl uveden příklad spuštění a zastavení stroje stiskem tlačítka start a stop. Tuto úlohu lze snadno řešit pomocí sekvenčního logického automatu na obrázku 1.33. Akce a_1 představuje logický stav jednoho z výstupů počítače.



Obrázek 1.33 – Klopný obvod RS

Způsob sestavení sekvenčního funkčního diagramu s větvením bude demonstrován na příkladu, který byl převzat ze skript [1]. Funkční schéma technologického procesu je na obrázku 1.34.

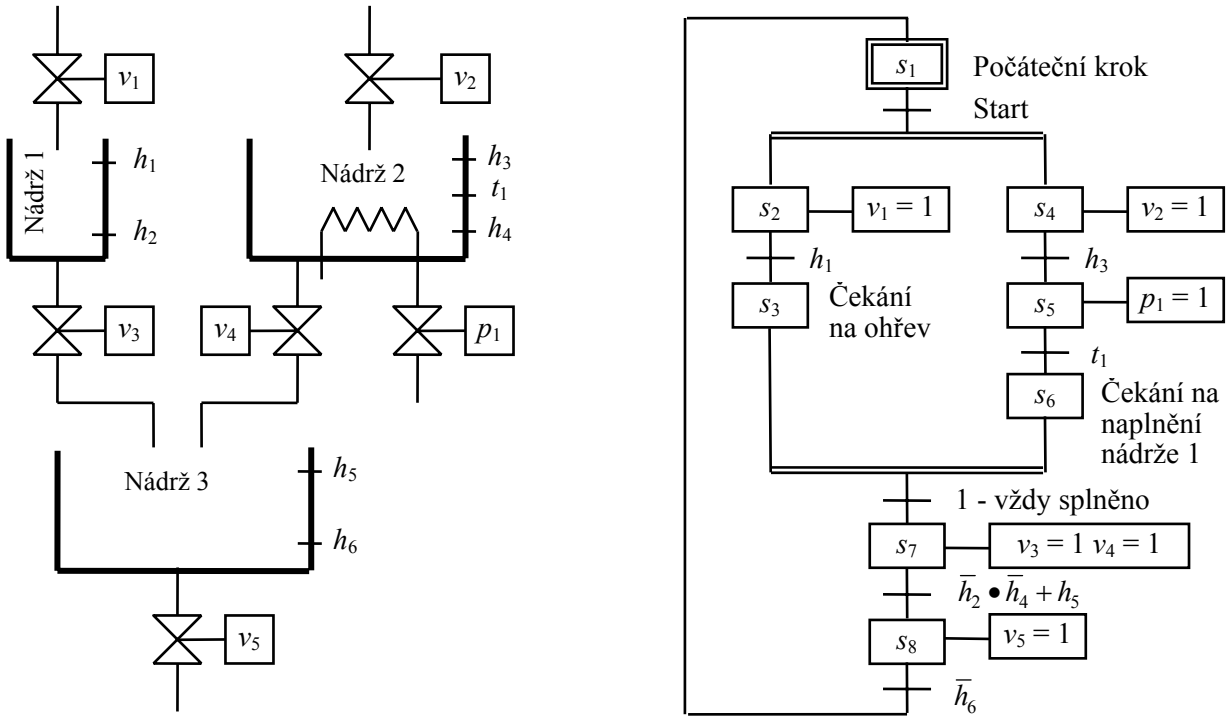
Jde o soustavu tří nádrží, které se plní a vyprazdňují, přičemž v jedné nádrži se navíc její obsah ohřívá na požadovanou teplotu. Nejprve se naplní nádrž 1 a 2. Konec plnění u obou nádrží je dán překročením nastavené hladiny, což se sleduje u každé nádrže zvlášť. Současně

s dokončením plnění nádrže 2 se spustí ohřev její náplně výměníkem, do kterého se vpustí ohřívací médium, jehož přítok je třeba po dokončení ohřevu zastavit.Po dokončení ohřevu a dokončení plnění nádrže 1 se obě nádrže vyprázdní přepuštěním jejich obsahu do nádrže 3. Až se nádrže 1 a 2 vyprázdní nebo se překročí zaplnění nádrže 3, začne se tato nádrž vyprazdňovat. Po vyprázdnění nádrže 3 se celý cyklus plnění, přepouštění a ohřevu opakuje znova.

Překročení zaplnění signalizuje logická jednička u logických proměnných h_1, h_3 a h_5. zatímco nedokončení plnění je signalizováno logickou nulou.

Neukončení vyprazdňování signalizuje logická jednička u logických proměnných h_2, h_4 a h_6. přičemž ukončení vyprazdňování je signalizováno logickou nulou u těchto proměnných. Nedokončení ohřevu je signalizováno logickou nulou u proměnné t_1 a dokončení logickou jedničkou.

Funkční schéma technologického procesu Sekvenční funkční diagram



Obrázek 1.34 – Funkční schéma a sekvenční funkční diagram příkladu technologického procesu

Všechny uvedené proměnné patří ke vstupům řídicího sekvenčního algoritmu. Jeho výstupy ovládají ventily tak, že při hodnotě proměnných v_1 až v_5 a p_1 rovné logické jedničce jsou ventily otevřeny a pro logickou nulu uzavřeny.

Sekvenční funkční diagram k příkladu v levé části obrázku 1.34 je v pravé části tohoto obrázku. Po startu cyklu výše popsaných operací nastavením podmínky přechodu Start na logickou jedničku se diagram rozvětví do dvou posloupností kroků a přechodů (divergentní AND). Levá větev řídí naplnění nádrže 1 a pravá větev navíc k řízení naplnění řídí také ohřev náplně nádrže 2. Po dokončení kroku plnění nádrže 1 přejde levá větev do kroku čekání na dokončení ohřevu. Pravá větev přejde po dokončení plnění nádrže 2 na krok ohřevu jejího

obsahu. Po dokončení kroku ohřevu přejde pravá větev do kroku čekání na naplnění nádrže 1. Krok čekání v obou větvích je s ohledem na vzájemné dokončení operací v sousedních větvích. Čeká však vždy jen jedna větev, zatímco u druhé větve není krok čekání delší než jeden cyklus opakování výpočtu programu. Je to proto, že obě větve se spojí v důsledku vždy platné podmínky před krokem zahájení vyprazdňování nádrže 1 a 2 do nádrže 3.

Shrnutí pojmů 1.6

V kapitole jsou vysvětleny sekvenční funkční diagramy, které se používají k popisu technologických procesů. Jsou popsány jejich prvky a způsoby větvení. Na závěr je praktická ukázka tvorby sekvenčního funkčního diagramu.

Otázky 1.6.

1. Jak se označuje počáteční krok v sekvenčním diagramu?
2. Jak se liší způsoby větvení AND a OR?

1.7 Programovatelné logické automaty

Čas ke studiu: 1,5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

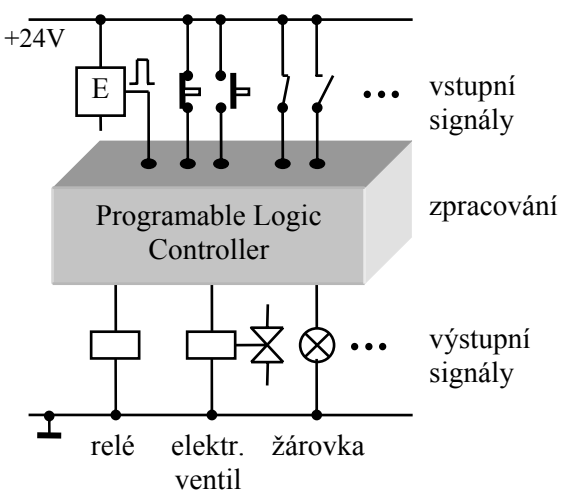
- definovat galvanické oddělení.
- popsat programovatelný logický automat a jeho základní prvky, způsoby programování, připojení na řízený proces.

Výklad

Dříve bylo řešení systémů sekvenčního logického řízení zajišťováno velíny s přidruženými skříněmi, které byly plné reléových obvodů, později s rošty se zásuvnými deskami s diskrétními obvody s tranzistory a ještě později s integrovanými obvody. Rozvoj počítačů přinesl inovace i do tohoto odvětví průmyslové elektroniky. Po prvních pokusech řešit problém sálovými počítači se dospělo do stavu kdy počítač třídy programovatelný logický automat - PLC (anglicky Programable Logic Controller) se stal univerzálním nástrojem k řešení řídicích systémů na úrovni blízké technologickému procesu. Kromě úloh logického řízení tyto PLC řeší také jednoduchou úlohu tzv. spojitého řízení, které bude popisováno v další důležité kapitole těchto skript.

Galvanické oddělení PLC od vnějších obvodů

Schématicky je připojení PLC na řízený systém nebo technologický proces znázorněno na obrázku 1.35. Vstupy tohoto řídicího systému představují kontakty, tlačítka a také elektrické dvouhodnotové impulsní nebo statické signály. Připojení spínačů a tlačítek k napájecímu napětí symbolizuje přivedení signálu o logické hodnotě jednička. Výstupní funkcí PLC je spojovat akční prvky jako jsou relé, stykače, elektrické ventily nebo jen signalizační osvětlení nebo zvukové signály na napájecí napětí a tímto způsobem je spustit.

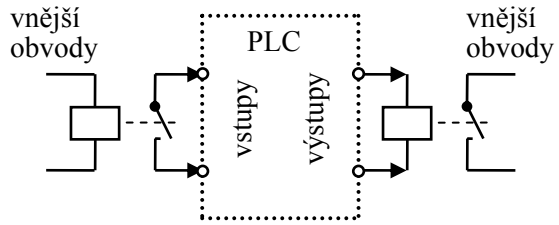


Obrázek 1.35 – Vazba PLC na řízený proces

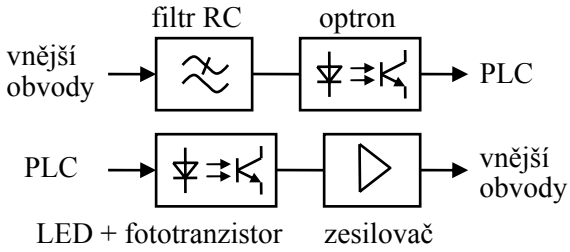
Napojení vnějších elektrických signálů vyžaduje jejich galvanické oddělení. Je nevýhodné, aby slaboproudé elektrické obvody PLC byly přímo propojeny se silovými obvody, které napájí například výkonné pohony. Důvodem je ochrana před jejich poruchami.

Parazitní impulsy, které se šíří po elektrickém vedení, mohou rušit PLC nebo ji dokonce zničit. Galvanické oddělení znamená přerušení přímého propojení elektrických obvodů. Nejjednodušším řešením galvanického oddělení obvodů je mechanické relé, viz. obrázek 1.36. Mezi cívkou relé a spínanými kontakty nemůže protékat elektrický proud a také průrazné napětí je velmi vysoké. Pro vstup se použijí kontaktní vstupy PLC a pro výstup dvouhodnotový napěťový výstup s úrovní, která stačí pro ovládání cívky relé. Nevýhodou mechanických relé jsou odskoky kontaktů při sepnutí. Tento děj je velmi krátký a u kontaktních obvodů nevadí. Avšak velmi rychlé elektronické obvody mohou změny stavu mechanických kontaktů zaznamenat a přivést sekvenční algoritmus do chybového stavu. Tuto nevýhodu lze odstranit Schmittovým klopným obvodem. Jiným řešením je použití klopného obvodu RS.

Optické galvanické oddělení zajišťuje LED dioda a fototranzistor podle obrázku 1.37 v prvku, který se nazývá optron. Tato dvojice představuje běžný obvodový prvek. Ke snížení rušení indukovanými vysokofrekvenčními signály je na vstupech z řízeného procesu dolnopropustný filtr RC. Naopak při oddělení výstupu je třeba signál pro ovládání připojených zařízení zesílit.



Obrázek 1.36 – Galvanické oddělení pomocí relé



Obrázek 1.37 – Galvanické oddělení pomocí LED diody a fototranzistoru

❑ Funkce sběrnice pro komunikaci

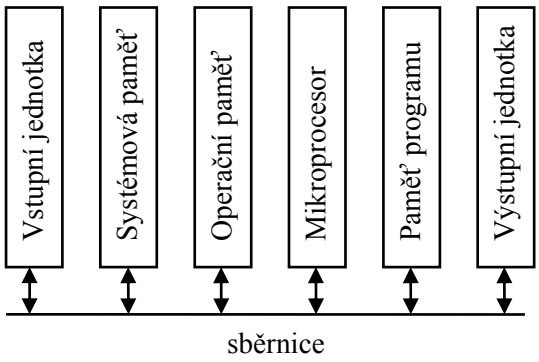
Obecným úkolem sběrnice je zajistit přenos dat a řídicích povelů mezi dvěma a více elektronickými zařízeními. Přenos dat na sběrnici se řídí stanoveným protokolem, což je souhrn pravidel, podle kterých se předávání informací řídí. V případě modulární architektury elektronického zařízení nebo počítače je sběrnice po mechanické stránce vybavena konektory, které jsou uzpůsobeny pro připojení modulů. Jednotlivé sběrnice se také liší hodnotami elektrického napětí pro úrovně H a L. Sběrnice se dělí na sériové a paralelní. V případě tzv. paralelní sběrnice přenášejí některé vodiče současně řídicí povely, další vodiče přenášejí adresu a data. U sériové sběrnice jsou tyto povely sdíleny na společném vodiči nebo vodičích a přenášejí se postupně.

Vnitřní jednotky počítače (paměti, procesor, atd.) třídy PC komunikují vzájemně prostřednictvím sběrnic. Propojení PC s vnějškem, tj. jednotkami, které jsou mimo skříňku počítače, je prostřednictvím rozhranní (anglicky interface), z nichž některé se také nazývají sběrnice. Příkladem paralelního rozhranní je třeba Centronics pro připojení tiskáren a nebo sběrnice IEE 488 pro připojení měřicích přístrojů. U sériového rozhranní (sběrnice) jsou bity zpráv přenášeny postupně. V obecném případě lze u sériového rozhranní rozlišit signály řídicí a datové. Datový přenos je zprostředkován jedním vodičem. Příkladem sériového rozhranní je proudová smyčka a sběrnice RS 232C, RS 422, RS 423 a RS 485. Proudovou smyčkou se v minulosti připojovaly k počítači dálnopisy. Sběrnice RS 232C patřila také k velmi rozšířeným typům rozhranní, které přenášelo data asynchronně po zprávách v řetězcích znaků. Toto rozhranní sloužilo k propojení jednoho vysílače s jedním přijímačem nebo v případě RS 422 s více přijímači. Sběrnice RS 485 umožňuje obousměrný přenos informací s více vysílači, které jsou připojeny k jedné sběrnici.

V případě nejnovějších počítačů začíná dominovat rozhranní USB (Universal Serial Bus), což je sériová polyfunkční sběrnice se 2 diferenciálními datovými vodiči a 2 napájecími vodiči (5 V/500 mA). Ve verzi 1.1 je přenosová rychlost 12 Mbit/s a ve verzi 2.0 je tato rychlost 480 Mbit/s. USB rozhraní používá dva typy konektorů a to plochý konektor „typ A“, který lze dnes připojit k prakticky každému novému PC aspoň do dvou přípojek, a „typ B“, který je určen pro periferní zařízení. Maximální délka kabelu mezi dvěma zařízeními je 5 metrů. USB dovoluje připojit až 127 zařízení pomocí jednoho konektoru. Připojeným zařízením poskytuje USB zároveň i napájecí napětí 5V s omezeným proudovým odběrem do 500 mA.

Vnitřní struktura PLC

PLC představuje mikropočítač se sběrnicovou strukturou, která je znázorněna na obrázku 1.38. Na společnou sběrnici jsou připojeny následující jednotky:



- Vstupní jednotka na kterou jsou připojeny vstupní signály číslicové a analogové
- Systémová paměť pro vstupy a výstupy, mezivýsledky, meze pro časovače a meze pro čítače
- Operační paměť s aktuální verzi programu, tvoří ji rychlá paměť typu RAM

Obrázek 1.38 – Vnitřní struktura PLC

- Mikroprocesor
- Paměť programů, které se zavádějí po restartu nebo resetu, tvoří ji obvykle paměť typu EPROM
- Výstupní jednotka členěná na analogové a digitální výstupy

Vstupy a výstupy PLC

Vstupní jednotka zajišťuje převzetí informací z řízeného procesu do PLC. Tato kapitola pojednává především o dvouhodnotových signálech. Tyto signály vstupují do počítače prostřednictvím tzv. číslicových (digitálních) vstupů. Každý vstupní dvouhodnotový (binární) signál obsahuje informaci o velikosti jednoho bitu. Číslicové vstupy zachycují nejen daný stav hodnot logických signálů, ale některé z nich jsou tzv. čítačového typu, tj. počítají počet příchozích impulsů.

Napěťová úroveň digitálních vstupů odpovídá nejčastěji TTL, tj. L/H odpovídá 0V/5V. Například komunikace přes sériový port počítače PC (RS 232) pracuje s úrovněmi L v mezích -30V až +5V a H v mezích +13V až +60V. Číslicové výstupy pracují s 24V a proudovou zatížitelností 2A.

Kromě číslicových vstupů je u PLC omezené množství tzv. analogových vstupů, které měří fyzikální veličiny jako teplota, tlak, a pod., tj. výsledkem měření je číslo. Převod signálu, nejčastěji napěťového, na číslo se uskutečňuje v tzv. analogově-číslicovém (analogově-digitálním) převodníku (convertor) ADC, česky A/Č. Rozsah převodníku je určen počtem bitů, což definuje rozsah celého čísla, které je výsledkem převodu. Pro převodník s *m* bity lze obdržet 2^m hodnot. Rozsah snímače ve fyzikálních jednotkách a počet různých hodnot na výstupu převodníku určuje rozlišitelnost měření a také jeho absolutní přesnost. Obvyklé počty bitů u převodníků pro účely řízení jsou 8 nebo 12 bitů, tj. rozsah celých čísel, které jsou výsledkem převodu, je pro unipolární převodníky od 0 do 255 nebo od 0 do 4096 a nebo pro bipolární převodníky od -128 do 127 nebo od -2048 do 2047. Samozřejmě je třeba tato celá

čísla přepočítat na skutečné fyzikální jednotky pro jejich zobrazení na displeji, který je použit jako řídicí a informační panel.

Analogové vstupy se rozdělují na

- symetrické - diferenční pro měření rozdílových napětí
- nesymetrické – se společnou nulou, počet nesymetrických vstupů je dvakrát větší než počet vstupů symetrických. Nesymetrické jsou analogové výstupy.

Další rozdělení vstupů je podle polarity vstupního napětí

- Unipolární, např. 0 až +5V, 0 až+ 10V
- Bipolární, např. ±5V, ±10V.

Výstupní jednotka zajišťuje předání dvouhodnotových a vícehodnotových informací ven z PLC do řízeného procesu. Dvouhodnotové veličiny vystupují staticky nebo také jako sled impulsů o zadané frekvenci. Kromě dvouhodnotových veličin je výstupem také analogová veličina jako výsledek číslico-analogového (DAC digitálně analogového) převodu. Počet těchto výstupů je obvykle jeden nebo dva.

Vlastnosti PLC se charakterizují především počty různých druhů vstupů a výstupů

- Binárních vstupů – DI (Digital Input), počet je násobkem 16, např. 16 DI
- Binárních výstupů – DO (Digital Output) , počet je shodný s počtem DI, např. 16 DO
- Analogových vstupů – AI (Analog Input), počet je obvykle 8 AI, zřídka 16 AI
- Analogových výstupů – AO (Analog Output), počet je obvykle jeden nebo dva, 1 AO nebo 2 AO.

❑ Paměti PLC

Jak již bylo zmíněno, součástí PLC jsou paměti. Jejich typy jsou jako u ostatních číslicových zařízení nebo počítačů následující:

ROM – paměť, kterou jejíž obsah lze jen číst (Read Only Memory). Její funkce byla zmíněna v popisu vnitřní struktury PLC. Potřeba přeprogramování vynutila zavést programovatelný ROM s označením PROM (Programable ROM). Mazání obsahu paměti pro nové nahrání dat u typu EPROM (Erasable PROM) se zajišťovalo ultrafialovým zářením. Mazání elektrické je u typu EEPROM (Electricaly EPROM).

RAM – paměť s náhodným přístupem (Random Access Memory) pro opakovaný zápis a čtení paměťové buňky s libovolnou adresou. Tyto paměti se dělí na dynamické RAM (DRAM) a statické RAM (SRAM). Paměť jednoho bitu u SRAM představuje klopný obvod se čtyřmi tranzistory. Obvody s SRAM pamětí jsou dražší ve srovnání s DRAM pamětí, ale rychlé a používají se u počítačů jako cache (vyrovnávací) paměti. Paměťová buňka pamětí SRAM je tvořena tranzistorem a elektrickým kondenzátorem. Protože se kondenzátor časem vybíjí, je třeba, aby paměť obsahovala podpůrné obvody pro cyklickou obnovu náboje kondenzátoru. Paměť SRAM má obrovskou kapacitu (stovky MB).

❑ Programování PLC

Programování PLC využívá softwarové pomůcky, takže uživatel v podstatě zadává dříve popsaným způsobem svou specifickou úlohu logického řízení. Tvůrci jazyků pro PLC využívají kontaktních schémat, blokových schémat a sekvenčních funkčních diagramů, ale

také i jazyka symbolických adres. Každý výrobce řídicích systémů zavádí drobné změny v terminologii a označování, které lze při znalosti obecných teoretických základů snadno překonat. Smysl odchylek je udržet starého zákazníka neodradit nového zákazníka pro své produkty.

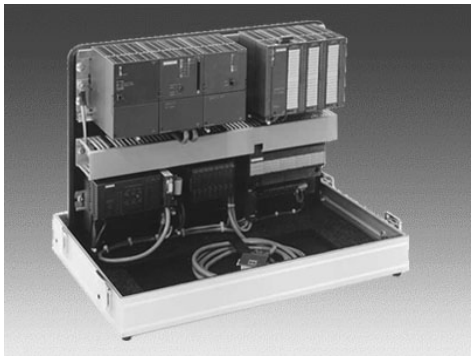
Ke studiu lze doporučit také další skripta, které katedra ATŘ vydala [2] a které obsahují řadu aplikačních příkladů jako vzor pro řešení mnoha úloh logického řízení.

❑ Provedení PLC

Jako mnoho jiných zařízení, PLC se dodává ve dvou verzích, a to v provedeních, které jsou označovány

- Kompaktní, jehož provedení má unifikovaný počet vstupů a výstupů a rozsah operační paměti.
- Modulární PLC má volitelnou konfiguraci v počtu všech druhů vstupů. Vstupy a výstupy se sdružují do modulů, jejichž počet je volitelný.

Konfigurace PLC se navrhuje s bezpečnou rezervou v počtech vstupů a výstupů a dalšími parametry. Příkladem PLC na trhu jsou v Evropě výrobky firem Siemens, Festo, AEG, Bosh a další. Firma Siemens vyrábí například PLC řady SIMATIC S7-300 a S7-400. Ukázka je na obrázku 1.39.



Obrázek 1.39 – PLC SIMATIC S7-300

Další možností je použít síť PLC propojených sběrnicí nebo průmyslové (Industrial) provedení PC (Personal Computer). Pro PC jsou na trhu zásuvné karty, které umožňují

❑ Sběrnice PROFIBUS

Složité nebo prostorově rozprostřené technologické procesy se řídí několika PLC, tj. jejich sítí. Ušetří se tím na kabeláži, protože vzájemné propojení PLC je jednodušší než dlouhá kabelová vedení od všech snímačů a akčních členů. Systém řízení je takto decentralizován a tím také odolnější proti poruchám. Komunikace mezi jednotlivými PLC se uskutečňuje po sběrnici (anglicky bus), což je skupina signálových vodičů. Funkční, elektrické a mechanické vlastnosti sběrnice PROFIBUS (PROcess FIeld BUS) pro vzájemné propojení PLC byly normalizovány v Německu v roce 1987. (norma DIN 19 245). Jako fyzické komunikační medium je sběrnicí RS-485, jejíž základní vlastnosti byly zmíněny již dříve.

Přístupová metoda sítě může být

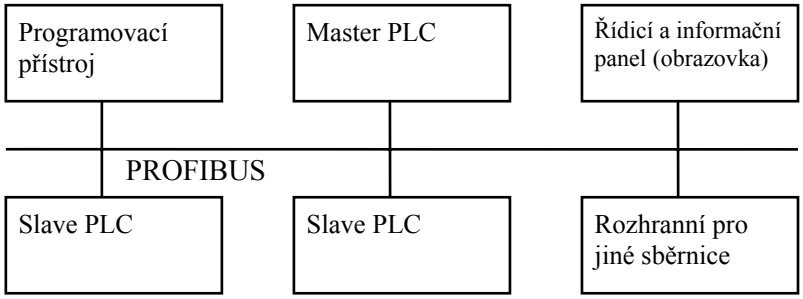
- token passing, u kterého se pověření řídit předává postupně jednotlivým stanicím sítě PLC v kruhu
- master-slave (pán-otrok) pro pevně stanovené řídicí a podřízené PLC

- hybridní, kdy se ve funkce řídicí stanice střídá u některých stanic jako v případě token passing, zatímco zbytek stanic jsou představuje stanice podřízené.

Maximální délka sběrnice je 1,2 km, s použitím opakovače (zesilovače) až 4,8 km. Přenosová rychlost byla nejdříve normalizována na 9,6, 19,2, 187 a 500 kbit/s, později došlo k rozšíření na 1,5, 3, 6, 9 a 12 Mbit/s.

Pod označením PROFIBUS jsou normovány tři sběrnice s označením Profibus DP, Profibus FMS a Profibus PA, které se liší v délce rámce, což je porce dat, které si PLC vzájemně posílají.

Příklad propojení PLC sběrnicí PROFIBUS je na obrázku 1.40. V této síti je jedno PLC řídicí (master) a dvě PLC podřízené (slave). Ke sběrnici je rovněž připojen programovací přístroj k úpravám (editaci) programu a kontrole jeho činnosti, případně k dalším servisním službám. Ke sběrnici je připojen také řídicí a informační panel (monitor). Sběrnice PROFIBUS může být napojena prostřednictvím rozhraní (interface) na sítě odlišného typu.



Obrázek 1.40 – Propojení několika PLC sběrnicí PROFIBUS

Funkci řídicího počítače může vykonávat také PC se zásuvnou kartou umožňující komunikaci se sběrnicí PRPFIBUS (viz řešení SIMATIC WinAC od firmy Siemens AG).

Shrnutí pojmů 1.7.

Začátek kapitoly je věnován galvanickému oddělení PLC od vnějších obvodů. Dále pak je zda popsána vnitřní struktura PLC, vstupy a výstupy, paměti, způsoby programování, provedení PLC, používané sběrnice.

Otázky 1.7.

1. Co patří mezi stavební prvky logického řízení?
2. Co jsou to programovatelné logické automaty?
3. Co je to PLC v modulárním provedení?
4. Jaké vstupy a výstupy obsahují PLC?
5. Jaké jazyky používáme k programování PLC?

1.8 Laboratorní úlohy na logické řízení

Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat dvě aplikace programovatelných logických automatů – ApphaController - v laboratořích katedry.

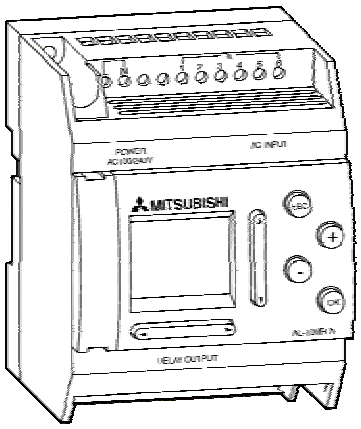
Výklad

Laboratoř k procvičování základů logických obvodů na katedře ATŘ, Fakulty strojní, je vybavena logickými automaty (PLC) Alpha-Controller od firmy Mitsubishi Electric, viz. obrázek 1.41. Jedná se o moderní kompaktní logické automaty určené pro přímé nasazení do automatizačních úloh.

Automat může být vybaven až dvanácti vstupy a osmi reléovými výstupy, praktické nasazení podporuje napěťový rozsah všech vstupů a výstupů 100–240 V AC (50/60 Hz), reléové výstupy jsou zatížitelné až do proudu 8 A.

Každé pracoviště je vybaveno kromě PLC také počítačem PC a jednoduchým modelem řízené soustavy. V počítači se řešená úloha nejprve naprogramuje a po překladů do strojového kódu se zavede (nahraje) do paměti PLC. Programování úlohy se uskuteční v grafickém prostředí, propojováním jednotlivých funkčních bloků. Zobrazování bloků se v detailech liší od bloků znázorněných v teoretické části tohoto učebního textu, které pojednávají o logickém řízení. Označení bloků pro standardní logické funkce, tj. logický součet a součin, a negování signálů zůstalo zachováno. Programátoři firmy, dodávající zmíněné PLC s příslušným software pro tvorbu zapojení úlohy řízení, dávají přednost staršímu grafickému znázornění bloků logických funkcí a kombinují je s obdélníkovými bloky nového značení, které tyto starší značky orámují. Na rozdíl od realizace bloku pro negaci pomocí hradel NOR nebo NAND je použit speciální blok s označením NOT (trojúhelník uvnitř bloku se znakem negace na vrcholu, který je spojen s výstupem bloku). Navíc jsou k dispozici speciální bloky, které plní například funkci čítače (Counter). Vstupy a výstupy bloků označuje patřičně orientovaná šipka.

Tvůrce zapojení logického obvodu, který plní požadovanou funkci logického řízení, vkládá na plochu monitoru jednotlivé bloky a vzájemně je propojuje spoji jako kdyby kreslil zapojení tužkou na papír. Křížení nebo odbočka se spojením signálů se označuje tečkou. Vstupní signály jsou označeny identifikátorem, který začíná písmenem I s připojeným číslem. Identifikátor výstupu začíná písmenem O, ke kterému je připojeno číslo. Typy vstupů a výstupů popisuje ikonka s upřesňujícím textem. Vnitřní signály začínají identifikátorem B a k tomuto písmenu je



připojeno číslo.

Obrázek 1.41 - PLC Alpha-Controller

Blokové schéma se podpůrným software převede (zkompiluje) do strojového kódu, který se nahraje do paměti PLC a zároveň spustí.

V tomto učebním textu budou demonstrovány dvě laboratorní úlohy, které řeší reálné problémy technické praxe. Je to blokování rozběhu motoru jako ochrana před úrazem obsluhy a řízení dopravní cesty, kterou tvoří pásové dopravníky.

❑ Zařízení na ochranu před úrazem (Bezpečnostní zařízení)

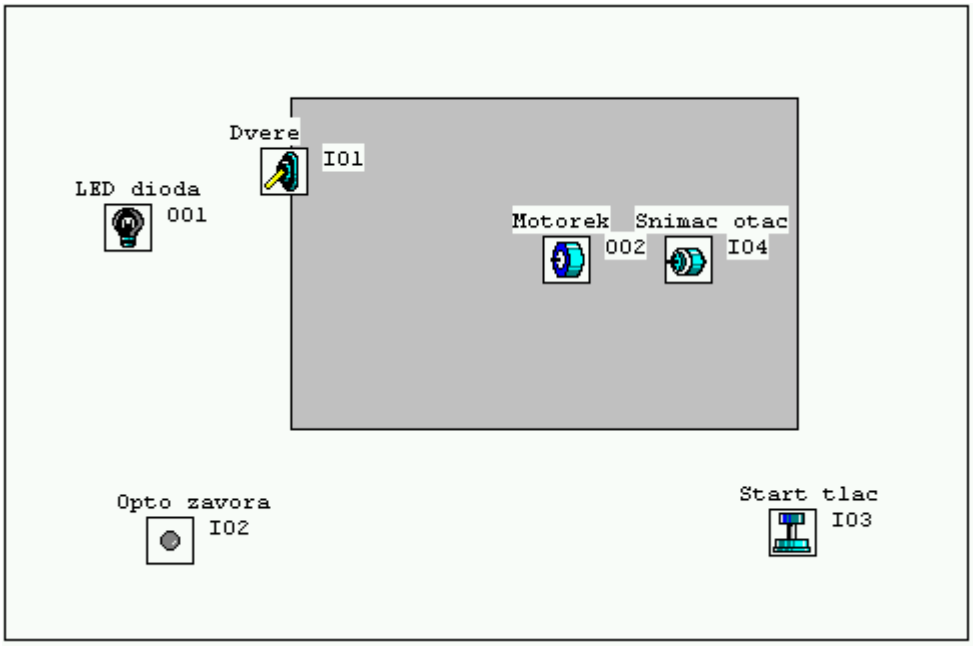
Zadání

Navrhněte způsob blokování spuštění chodu motorku tlačítkem za podmínek, že dveře do pomyslné strojovny budou otevřeny a světelná závora nebude přerušena. Jestliže budou uvedené podmínky splněny, pak se motorek rozběhne a v opačném případě se zase rozsvítí kontrolní světelná dioda (LED). Motorek má vykonat po stisku startovacího tlačítka stanovený počet otáček a pak se zastavit.

První varianta řešení

Na modelu strojovny je otevření dvířek indikováno jazýčkovým relé, které je ovládáno magnetickým polem. Otočení motorku je snímáno inkrementálním snímačem, který generuje posloupnost impulsů. Schéma laboratorního modelu je uvedeno na obrázku 1.42. Kromě rozmístění součástek jsou v obrázku identifikátory vstupních a výstupních logických proměnných.

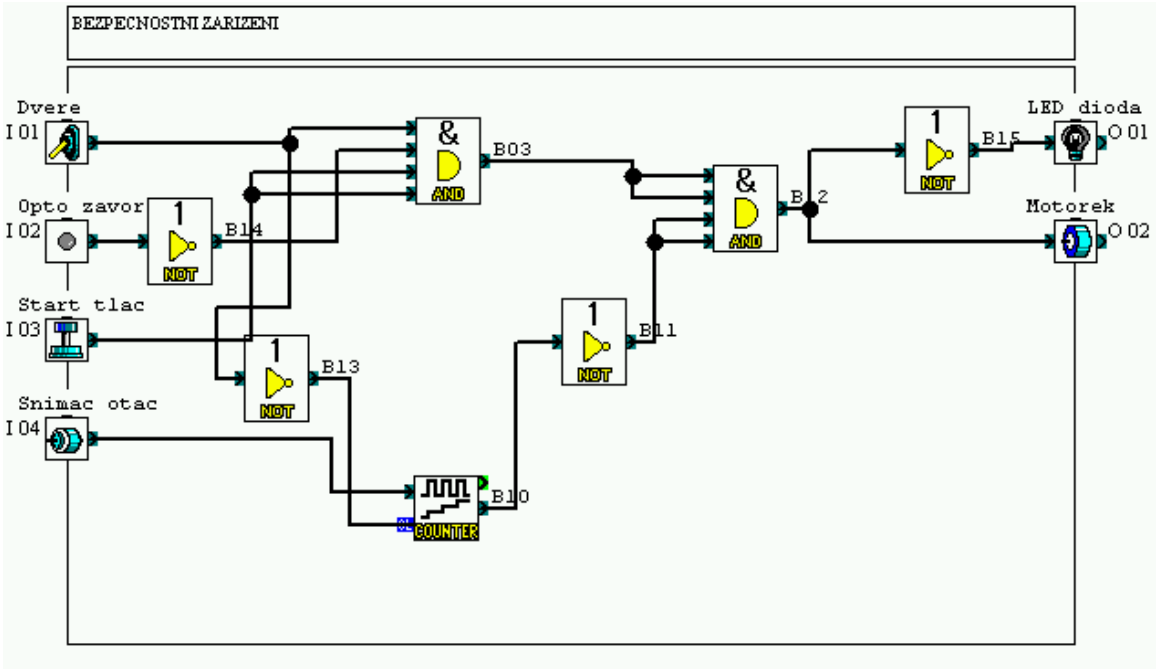
Řešení úlohy na logickém automatu Alfa je znázorněno na obrázku 1.43. Program je vytvořen s použitím standardních logických funkcí pro testování spouštěcích podmínek (logické jedničky na vstupech I01, I02 a I03), které generují logický signál B03 na výstupu hradla AND a předdefinovaného bloku Counter ve funkci čítače impulsů, které jsou generovány inkrementálním snímačem při otáčením motorku. Po dosažení přednastaveného počtu impulsů od otáček motorku se změní logický výstup čítače (B10) na logickou jedničku. Čítač reaguje na nástupnou hranu vstupního signálu I04 tak, že zvětší hodnotu čítače o jedničku. Negace logické proměnné B10 v logickém součinu s podmínkami pro spuštění motorku (signál B03) vynuluje výstup hradla AND, který je označen B12), a napájení motorku z výstupu O02 se odpojí. Negace signálu B12 ovládá výstup O01 pro svícení LED diody. Nevýhodou zapojení na obrázku 1.43 je to, že po celou dobu otáčení motorku je nutné přidržovat startovací tlačítko stlačené (vstup I03) a udržovat přerušený světelný tok v optické závoře (vstup I02). Pro další rozběh motorku je zapotřebí otevřít dvířka modelu (vstup I01), čímž se vynuluje čítač pulsů a motorek je připraven vykonat další sérii otáček.



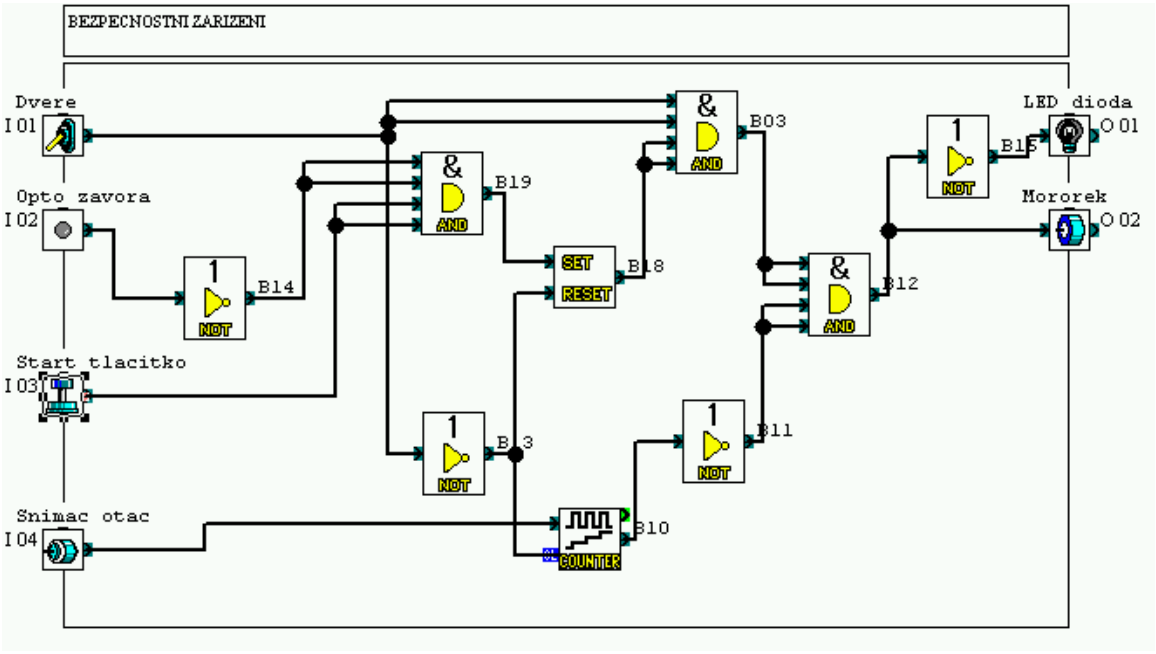
Obrázek 1.42 - Schéma laboratorního modelu

Druhá varianta řešení

Další řešení ovládání modelu pracuje na stejném principu jako předchozí řešení tím, že při zavřených dvířkách stačí krátkodobě stlačit startovací tlačítko a současně krátkodobě přerušit světelný tok v optické závoře. Ve schématu na obrázku 1.44 je použit klopný obvod (SET-RESET) typu RS, jehož vstupní signál B19 pro nastavení (SET) je odvozen od zadaných vstupních podmínek. K překlopení výstupu klopného B18 obvodu do logické jednotky stačí krátkodobý stisk startovacího tlačítka a současné přerušení světelného toku. Logický součin AND signálu B18 a signálu zavření dveří I01 ovládá přes další logický součin AND s výstupem B12, který určuje také přes výstup celého obvodu O02 běh motorku samozřejmě za podmínky, že nebylo dosaženo stanoveného počtu otáček (signál B11). Otevření dvířek nuluje čítač pulsů a prostřednictvím vstupu RESET do klopného obvodu nastavuje jeho výstup B18 na logickou nulu. Logická nula na výstupu B03 bloku AND nuluje také výstup B12 dalšího bloku AND a také výstup celého obvodu O02, což způsobí zastavení motorku pokud je ještě v chodu.



Obrázek 1.43 - Schéma zapojení funkčních bloků



Obrázek 1.44 - Řešení bez nutnosti držení tlačítka a zaclonění závory

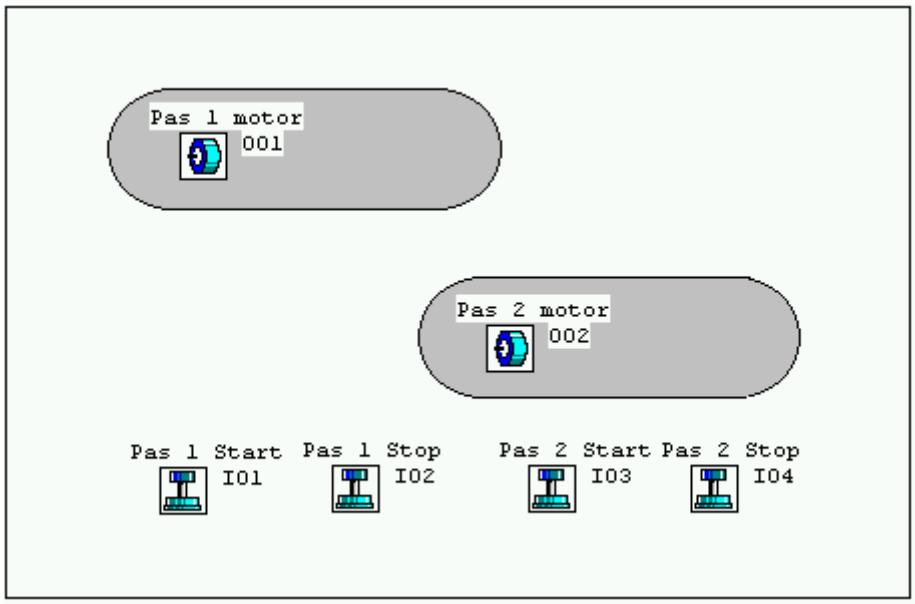
❑ Řízení pásových dopravníků (Dva dopravníky, R-S klopný obvod)

Zadání

Je třeba navrhnout ovládání dopravní linky, která se skládá ze dvou navazujících pásových dopravníků. Aby nedošlo k zavalení přesypu dopravovaným materiálem nesmí být první pás spuštěn pokud navazující pás stojí a také nesmí být druhý pás zastaven pokud první pás zůstane běžet.

První varianta řešení

Schéma uspořádání dopravní linky s automatem Alfa je na obrázku 1.45. Pohon pásového dopravníku je ovládán pomocí tlačítkových spínačů. Každý z obou dopravníků má svá spouštěcí a vypínací tlačítka. Celou dopravní linku dáme do pohybu pomocí spínače PAS 1 Start. Spínačem PAS 1 Stop zastavíme pouze dopravník č.1, přičemž dopravník č.2 pokračuje v chodu. Spínač PAS 2 Start slouží pouze ke spouštění dopravníku č.2 a spínačem PAS 2 Stop zastavíme celou dopravní linku (pokud je v provozu) nebo jen dopravník č.2 (pokud dopravník č. 1 stojí).



Obrázek 1.45 - Uspořádání dopravní linky

Řešení úlohy je znázorněno na obrázku 1.46. Ze struktury zapojení je patrný způsob programování automatu Alfa pomocí funkčních bloků NOR, kde výstup z tohoto bloku je v logické jedničce (ON), jsou-li všechny vstupy na logické nule (OFF) a výstup je na logické nule (OFF), je-li alespoň jeden vstup na logické jedničce (ON). Dvojice bloků NOR s výstupy B07 a B08 realizuje první klopný obvod pro ovládání pohonu dopravníku č.1 a druhá dvojice bloků B12 a B13 realizuje druhý klopný obvod pro ovládání dopravníku č. 2. Oba klopné obvody jsou typu RS, tj. signál SET nastavuje klopný obvod (jeho přímý výstup) do logické nuly a signál RESET nastavuje jeho výstup do logické nuly.

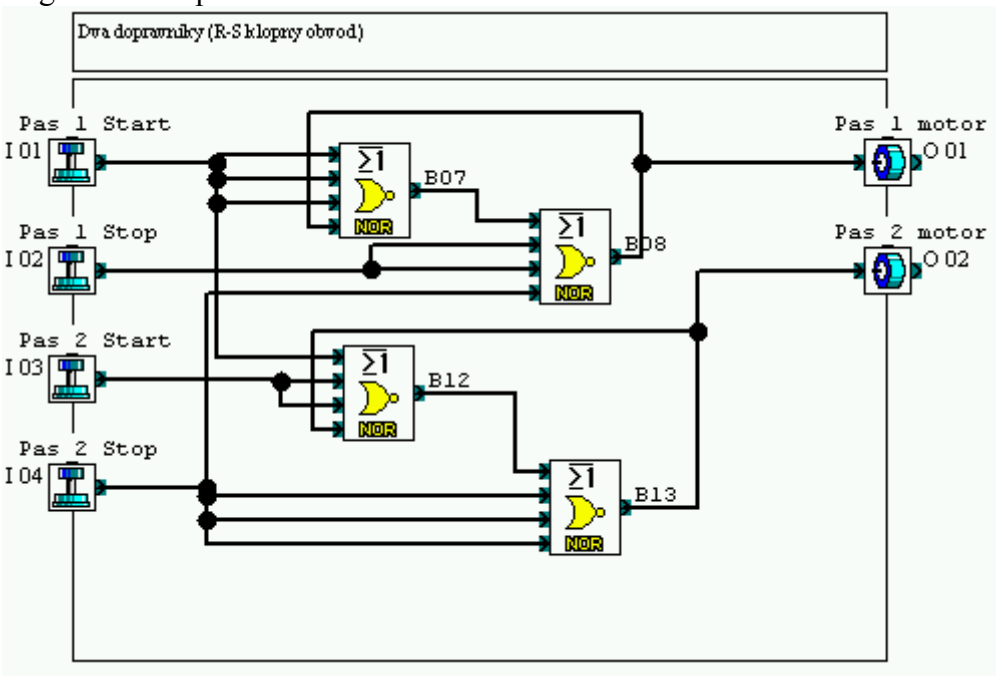
Dopravní cesty, které zabezpečují dopravní pásy, se spouštějí obvykle od koncového dopravníku, přičemž se zpožděním se uvádí do chodu předcházející dopravník postupně až k prvnímu pásu ve směru toku materiálu. Materiál se na dopravní pásy vpouští obvykle až všechny jsou v pohybu. Odstavení dopravní cesty se provádí od začátku dopravní cesty, přičemž další dopravníky se zastavují se zpožděním, aby se vyprázdnily. Je nebezpečné spouštět pás s materiálem na stojící dopravník z důvodu nebezpečí závalu přesypu. Ostatně přesypy jsou vybaveny snímači závalu, také s dvouhodnotovým výstupem.

Druhá varianta řešení

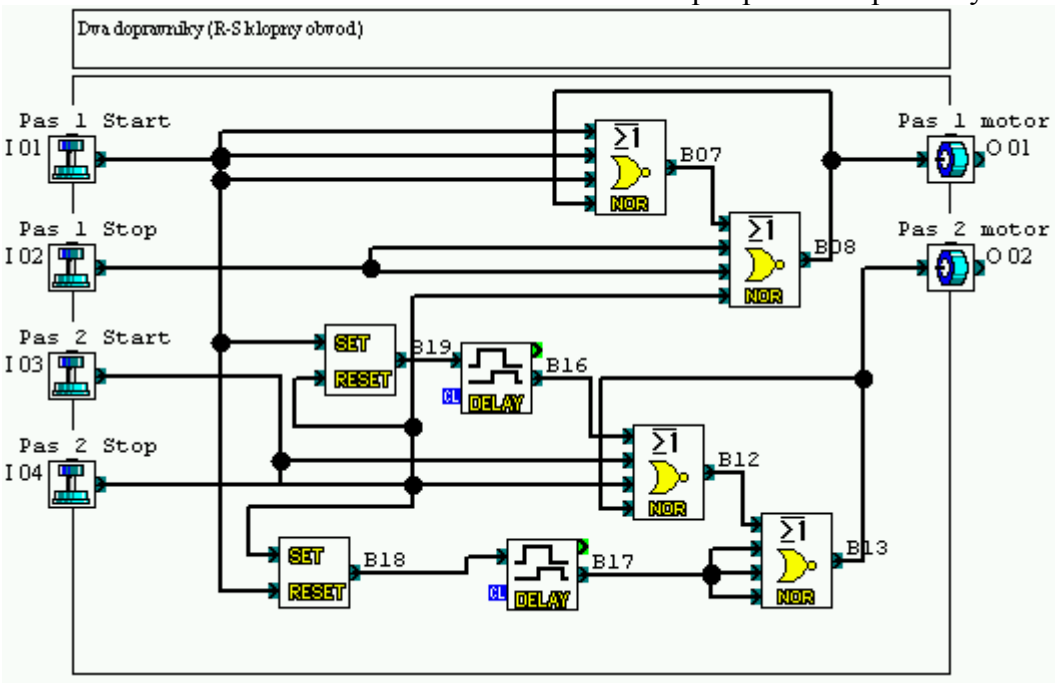
Funkce systému řízení na obrázku 1.47 je upravena použitím prvku zpoždění impulsu (Delay) a částečně řeší problém nebezpečí závalu přesypu. Po startu pásu č.1 se pás č.2 rozjede až po uplynutí definované doby, což není nejvhodnější způsob řízení. Obdobně po

zastavení pásu č.1 se pás č.2 zastaví po uplynutí stanovené doby, tj. až fiktivní materiál na páse vyběhne.

Příklad ukazuje možnost postupného zdokonalování funkce logického řízení a je zaměřen na použití bloků Delay, které realizují časové zpoždění signálu B16 oproti B19 a zpoždění signálu B17 oproti B18.



Obrázek 1.46 - Schéma funkčních bloků pro pásové dopravníky

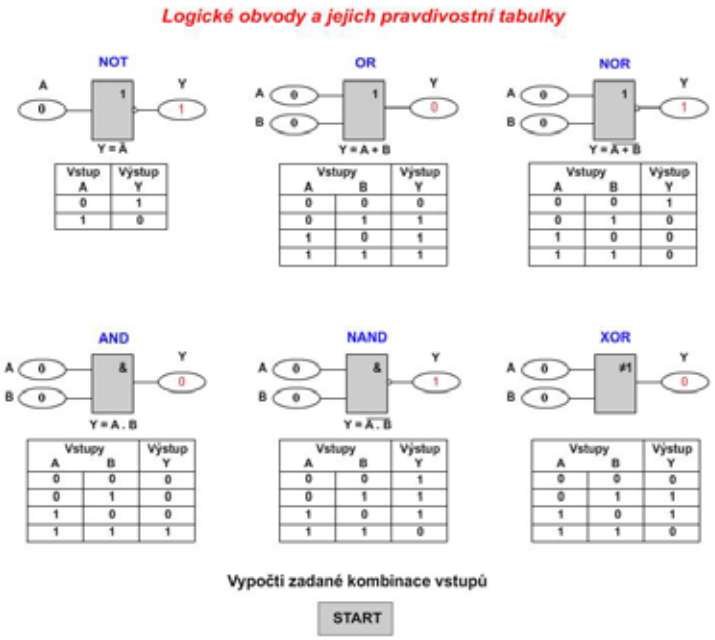


Obrázek 1.47 - Zapojení se zpožděním zapnutí a vypnutí pásu č. 2

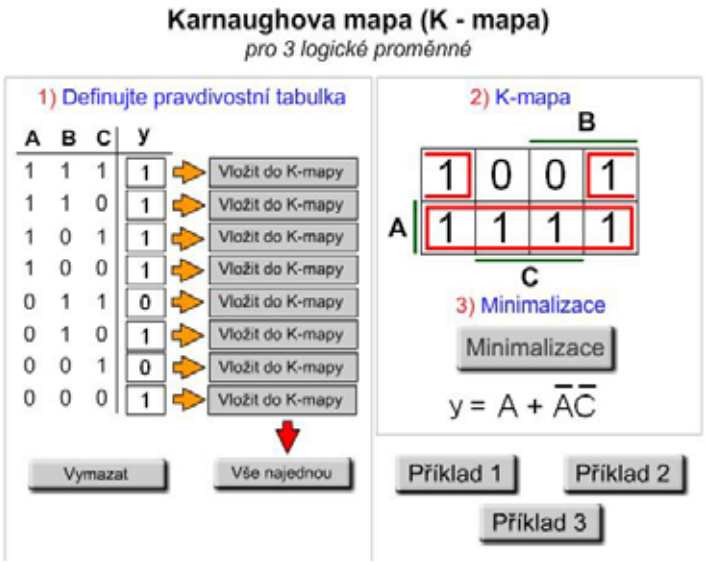
Shrnutí pojmů 1.8

Kapitola popisuje realizované úlohy logického řízení v laboratořích katedry. Jedná se o dvě úlohy a to: bezpečnostní zařízení, řízení pásových dopravníků. Pro obě úlohy je uvedeno zadání a dva způsoby řešení.

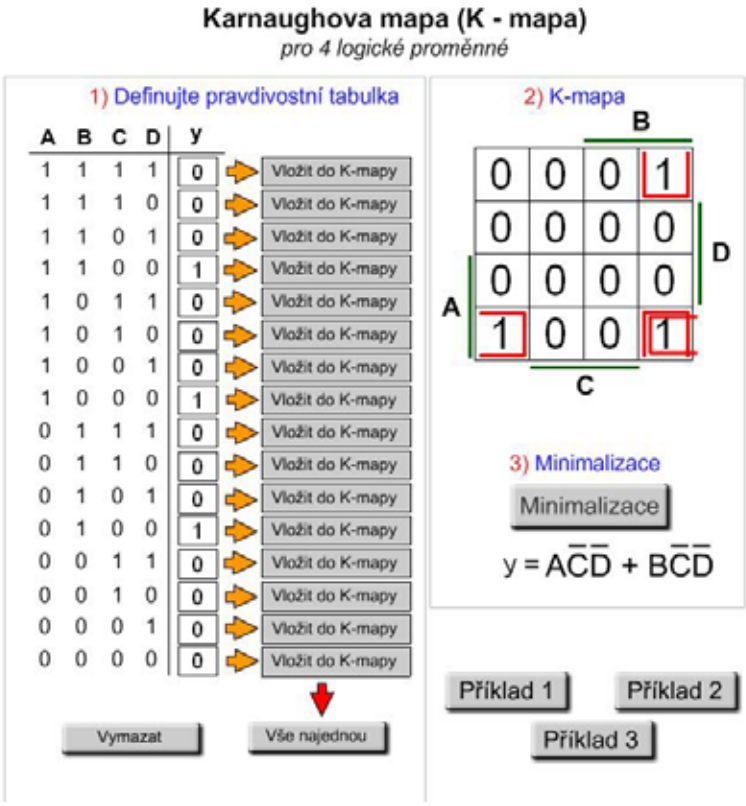
Kliknutím na následující obrázky můžete spustit animace vytvořené pro oblast logického řízení.



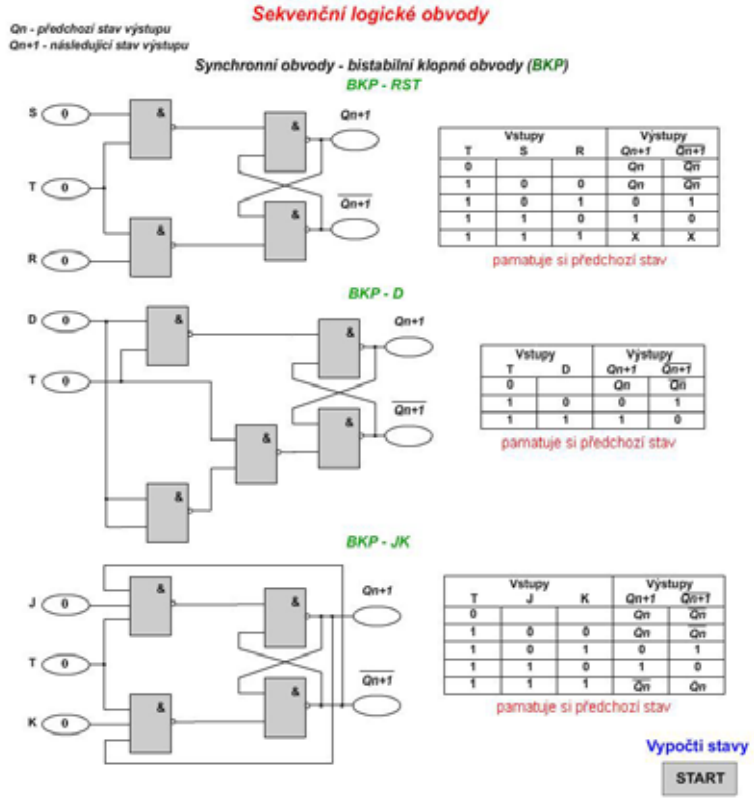
Obrázek 1.48 – Animace popisující základní logické operace



Obrázek 1.49 – Animace popisující převod mezi tabulkou hodnot a K-mapou



Obrázek 1.50 – Animace popisující převod mezi tabulkou hodnot a K-mapou



Obrázek 1.51 – Animace popisující základní logické obvody

Další zdroje

[1] ZÍTEK, P., HOFREITER, M. & HLAVA, J. *Automatické řízení.* Praha : skripta ČVUT, 2000. 148 s. ISBN 80-01-02044-4.

[2] FORMÁNEK, I. *Základy automatizace. logické řízení*. Ostrava : skripta VŠB-TU Ostrava, 2006, 86 s. ISBN 80-248-1012-3.

[3] ŠMEJKAL, L. & MARTINÁSKOVÁ, M. *PLC a automatizace. 1. díl : Základní pojmy, úvod do programování.* Praha : BEN – technická literatura, 1999, 223 s. ISBN 80-86056-58-9.

2. SPOJITÉ SYSTÉMY

2.1. Základní pojmy

Čas ke studiu: 1,5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat blokové schéma, funkční schéma, pojmy systém, prvek, vazba.
- definovat pojmy řízení, ovládání a regulace.
- popsat dělení signálů a systémů z různých hledisek.
- popsat rozdíl mezi spojitým a diskrétním regulačním obvodem.

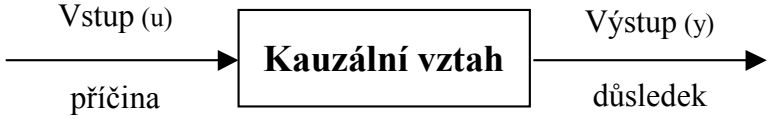
Výklad

Řízením stroje, technologického zařízení nebo procesu – zkrátka objektu – rozumíme dále jakýkoli cílevědomý způsob přinucení jej k činnosti od něj požadované – za pomoci zvlášť k tomu uzpůsobených technických prostředků. Pojem řízení také však úzce souvisí s pochopením kauzálních – příčinných vztahů, jimiž se činnost dotyčného objektu řídí. Jde tedy o seznámení se s principy pomocí nichž se řídí řešení problémů řízení obecně.

Nevyhnutelným východiskem pro skutečně správné řešení úlohy řízení daného objektu je pochopení jeho činnosti jako vztahu mezi působícími příčinami a jejich důsledky, jež jsou výsledky příslušné činnosti. Tyto vztahy nazýváme jako kauzální (orientovaná) relace. Schématicky můžeme tento vztah zapsat:

příčiny → důsledek,

kde šipkou je vyznačen neměnný "směr" závislosti, které proto říkáme také orientovaná. Graficky znázorňujeme kauzální relaci jako blok, viz obrázek 2.1, tedy v podstatě jako operaci, jíž se k zadaným hodnotám veličin reprezentujícím příčiny určují hodnoty veličin představujících důsledky. Zadané příčiny označujeme jak vstupy a vyplývající důsledky jako výstupy tohoto bloku.



Obrázek 2.1 - Grafické znázornění kauzálního vztahu

Pro řízení je příznačné, že se uskutečňuje jako součinnost dvou nebo více objektů (např. řízeného a řídicího), takže jejich kauzální relace se odpovídajícím způsobem kombinují. Spojením vzniká složený objekt, obecně zvaný **systém**. Za systém považujeme jakékoli účelové uspořádání jednodušších objektů ve složitější celek vyznačující se interakcí těchto objektů a výslednými vlastnostmi, jež tento celek charakterizují.

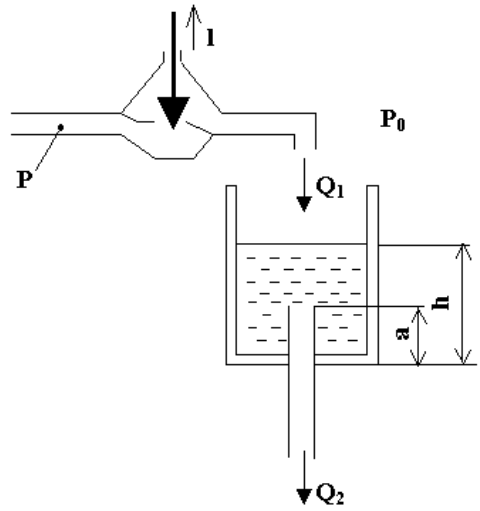
Při spojování dílčích objektů ve funkční celek – systém dílčí kauzální relace na sebe charakteristickým způsobem navazují a vytvářejí určité uspořádání zvané **struktura** systému.

Strukturu nejlépe znázorňujeme orientovaným grafem – nejčastěji tzv. **blokovým schématem**. V blokovém schématu je každá z dílčích relací reprezentována svým blokem podle obrázku 2.3 a orientovanými spojnicemi mezi bloky je vyjádřena vstupní, resp. výstupní úloha jednotlivých veličin v těchto blocích – relacích. Orientované spojnice u blokových schémat regulačních obvodů představují směr šířeného signálu. Jestliže se signál rozdvojuje do více bloků, označí se rozdvojovaní místo tečkou. Jestliže se naopak několik signálů algebraicky sčítá v jeden signál, označí se součtovým členem, při odečítání se příslušná část vyplní.

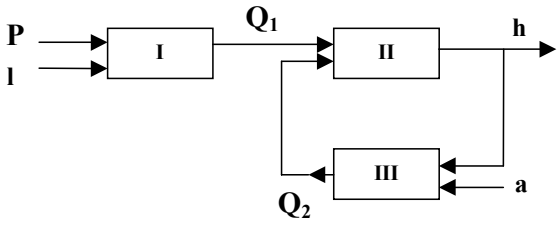
Vlastnosti bloků jsou nejčastěji popsány jejich přenosy $G(s)$. Může však také jít o popis diferenciální rovnicí, funkční závislostí, přechodovou funkcí nebo charakteristikou apod.

- **Příklad sestavení blokového schématu.**

Mějme nádobu k zadržení určitého množství protékající kapaliny danou výškou hladiny h – obrázku 2.2. Přítok Q_1 je závislý na otevření ventilu l a na tlaku před ním P. Odtok Q_2 závisí na výšce hladiny h a na poloze odtokového otvoru a. Označme závislost přítoku Q_1 římskou číslicí I, závislost přítoku Q_2 II a závislost změny výšky hladiny III.



Obrázek 2.2 - Nádrž s volným odtokem



Obrázek 2.3 - Blokové schéma nádrže s volným odtokem

Blokové schéma struktury systému, vytvořené na základě vzájemné návaznosti relací I, II, a III je znázorněno na obrázku 2.3.

Přenos se na blokových schématech označuje vepsáním funkční závislosti do příslušného bloku. Do bloku se taky může zakreslit přechodová charakteristika. Přenosem lze však popsat i větší části regulačních obvodů případně celé obvody. K tomu musíme ovšem znát metodiku, jak určit přenos celku, známe-li přenosy jednotlivých členů, z nichž se skládá. [Zítek, P. 1993]

Systémem rozumíme obecně soubor prvků, mezi nimiž existují vzájemné vazby a jako celek má určité vztahy ke svému okolí. Každý systém je charakterizován dvěma základními vlastnostmi:

- chováním systému, charakterizujícím jeho vnější vztahy k okolí; chování systému je závislost mezi podněty okolí systému působícími na jeho vstup a příslušnými odezvami objevujícími se na jeho výstupu,
- strukturou systému, charakterizující jeho vnitřní funkční vztahy; strukturou systému rozumíme jednak způsob uspořádáni (organizace) vzájemných vazeb mezi prvky systému a jednak chování těchto prvků.

Obě tyto vlastnosti systému jsou ve velmi úzkém vztahu, který lze charakterizovat jednak, že určité struktuře odpovídá jednoznačně určité chováni a naopak, že určitému chování odpovídá třída struktur, definovaná tímto chováním.

Podaří-li se nám definovat (vyčlenit) na zvoleném objektu jeho části a vztahy mezi nimi, pak jsme definovali na daném objektu systém. Uvažované části objektu nazýváme **prvky** (je tvůrcem dynamického chování systému; dělí se na: *vnitřní* - nemá spojení s okolním systémem, *vnější* - má spojení s okolním systémem) a vzájemné působení mezi těmito částmi **vazbami** (orientované čáry, slouží k přenosu informací z jednoho prvku na druhý nebo do okolí systému, dělí se na: *vnitřní* - přenáší informace mezi prvky, *vnější* - jsou to vstupy a výstupy, přenáší informace mezi systémem a okolím systému). Každý definovaný systém může být prvkem systému vyššího řádu – nadsystému (supersystému). Právě tak každý prvek systému může být systémem nižšího řádu -podsystémem (**subsystémem**). Tato vlastnost souvisí s rozlišovací úrovni. **Rozlišovací úroveň** je míra podrobnosti s jakou systém popisujeme.

Modelovaní je tvořeno dvěmi činnostmi a to:

- identifikaci - určení matematického popisu systému (*matematicky model* - soubor abstraktních rovnic a vztahů, které popisují dynamické chování systému)
- simulace - to je práce s matematickým modelem.

❑ Základní činnosti se systémy

1. Analýza systému

Na základě matematického popisu, který známe, určíme chování systému. Systém při analýze zůstává nezměněn. Do analýzy patří vykreslování charakteristik, kontrola stability.

2. Syntéza systému (inverzní k analýze)

Na základě známého chování a dané omezení struktury určíme matematický popis systému. Pomocí syntézy volíme typy regulátorů a hodnoty jejich stavitelných parametrů.

3. Černá schránka

Jakýkoliv systém, u kterého neznáme jeho strukturu a ani chování, nazýváme Černou schránkou. Máme stanovené omezení struktury a definované vstupní signály, na základě sledování chování systémů určíme matematický popis. Příkladem je experimentální identifikace. [BALÁTĚ 2003]

❑ Třídění signálů

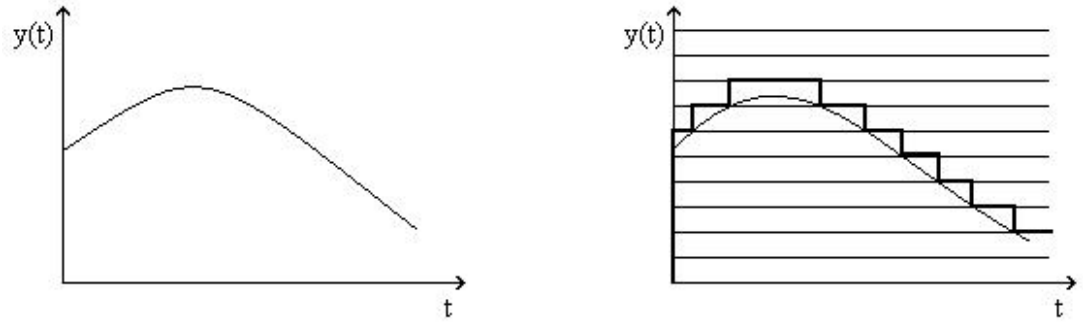
Signály lze rozdělovat na:

- spojité v čase (v každém časovém okamžiku víme jakou hodnotu má signál)
  - spojité v úrovni - analogový signál
  - diskrétní v úrovni - kvantovaný signál (Č/A převodníky)

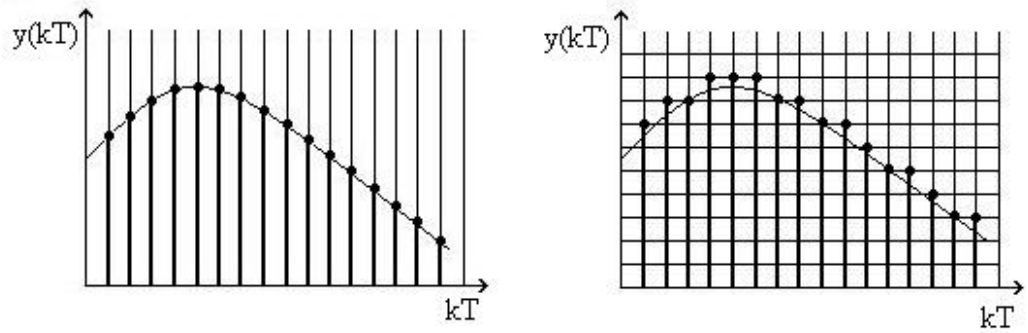
- diskrétní v čase (hodnotu signálu víme pouze v násobku vzorkovací periody)
  - spojité v úrovni – diskrétní signál získaný vzorkováním
  - diskrétní v úrovni – číslicový signál (A/Č převodník, měřící karty)

Dále lze signály dělit dle:

1) průběhu
   - periodické (goniometrické funkce)
   - neperiodické
2) matematického popisu
   - deterministické
   - stochastické (v daném čase jsou hodnoty náhodné)



Obrázek 2.4 - Analogový a kvantovaný signál



Obrázek 2.5 - Diskrétní a číslicový signál
(k - celé číslo, T - vzorkovací perioda)

Kliknutím na obrázek 2.6 se spustí animace, která vysvětluje převod od analogového signálu k číslicovému. Nejdříve se vykreslí vstupní/analogový signál (tlačítko vstupní signál), pak stisknutím tlačítek Vzorkování, Kvantování a Výstupní signál vykreslíme jednotlivé kroky převodu.

Obrázek 2.6 – Animace vysvětlující vzorkování a kvantování

❑ Třídění systému

Vždy je třeba určit hledisko, podle kterého chceme systémy třídit. Systémy lze dělit dle:

1) matematického modelu

- lineární (všechny rovnice, které popisují chování systému musí být lineární)
- nelineární (stačí aby 1 rovnice byla nelineární a celý systém bude nelineární)

2) typu signálu

- spojitý (všechny signály jsou spojité)
- diskrétní (všechny signály jsou diskrétní)
- hybridní (oba typy signálů, v praxi – PLC, čipy)

3) počtu signálu

- jednorozměrné SISO (jeden vstup a vystup)
- mnohorozměrné MIMO (více vstupů a výstupů)

4) změn vlastností v čase

- stacionární (funkce popsaná rovnicemi s konstantními koeficienty)
- nestacionární (rovnice jsou s proměnnými koeficienty)

5) změny stavu v čase

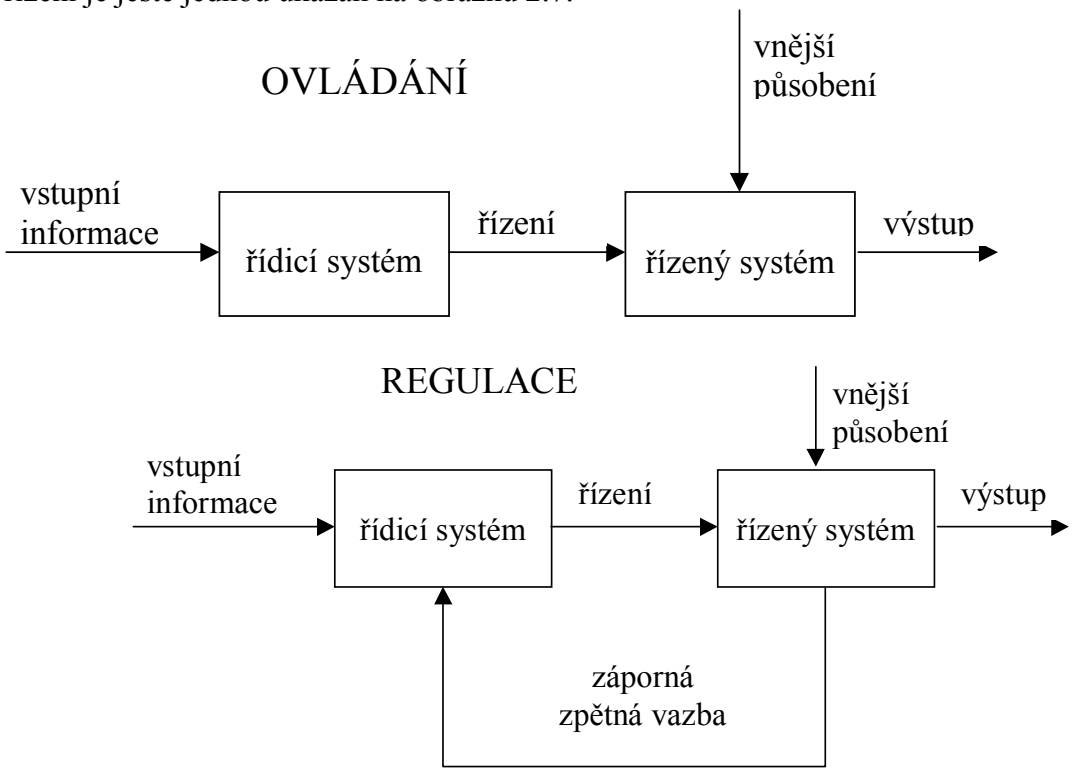
- statický (hodnota výstupu závisí pouze na okamžité hodnotě vstupů, chování systému lze popsat pomocí algebraických rovnic)
- dynamický (hodnota výstupu závisí na okamžité hodnotě vstupů ale i na historii hodnot vstupů a výstupů, chování systému lze popsat pomocí diferenciálních rovnic)

❑ Regulační obvody

Řízení je definováno jako cílevědomá činnost, při níž se hodnotí a zpracovávají informace o řízeném procesu nebo objektu i informace o dějích vně tohoto procesu a podle

nich se ovládají příslušná zařízení tak, aby se dosáhlo určitého cíle řízení. V zásadě může být ruční (např. řízení automobilu) nebo automatické (které bude dále blíže popsáno).

Řízení dělíme na ovládání a regulaci. **Ovládání** je řízení bez zpětné vazby. **Regulace** je udržování zvolené fyzikální veličiny na předem určené hodnotě. Během regulace se zjišťují hodnoty této veličiny a srovnávají se s hodnotou, kterou má mít. Podle zjištěných regulačních odchylek, které jsou mírou přesnosti regulace, se zasahuje do regulačního procesu v tom směru, aby tyto odchylky byly minimální. Charakteristickým rysem regulace je záporná zpětná vazba, která zajišťuje stabilizaci regulačního obvodu (RO). Rozdíl mezi oběma druhy řízení je ještě jednou ukázán na obrázku 2.7.

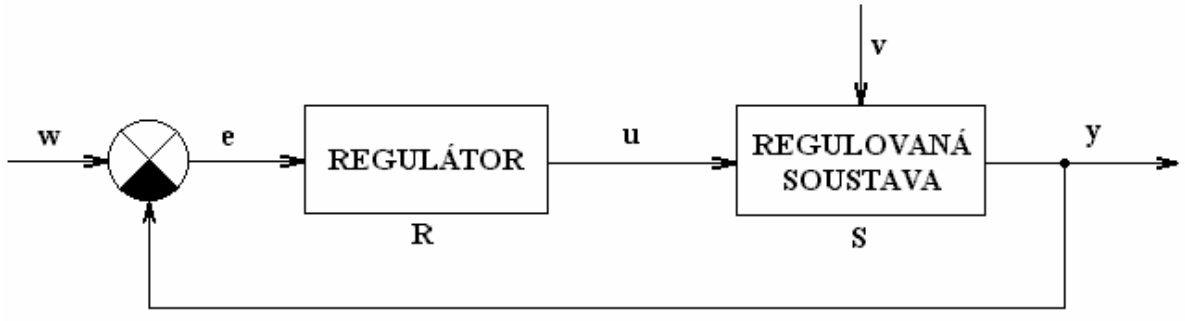


Obrázek 2.7 - Blokové schéma ovládání a regulačního obvodu

Regulační obvod (viz obrázek 2.8) je systém, který je tvořen dvěmi prvky, a to regulátorem a regulovanou soustavou. Regulátor na základě rozdílu mezi žádanou a regulovanou veličinou nastaví řídicí veličinu tak, aby byl splněn cíl regulace, tzn. $y \to w$ resp. $e \to 0$.

Dynamické chování celého regulačního obvodu můžeme popsat např. pomocí diferenciálních rovnic určující vztah regulované veličiny a žádané veličiny, nebo regulované veličiny a poruchy. Dynamické vlastnosti regulačního obvodu závisí na dynamických vlastnostech jeho jednotlivých členů. Za lineární regulační obvod budeme považovat takový obvod, jehož vlastnosti můžeme matematicky popsat s dostatečnou přesností lineárními diferenciálními rovnicemi s konstantními koeficienty.

Základní vlastností lineárních regulačních obvodů je princip superpozice, podle něhož reakce regulačního obvodu na součet podnětů se rovná součtu reakcí na jednotlivé podněty. Regulační obvody můžeme rozdělit na spojité a diskrétní [BOLTON 1992].



w - žádaná veličina; e - regulační odchylka; y - regulovaná veličina; v - poruchová veličina; u - řídicí veličina; R – regulátor; S - regulovaná soustava

Obrázek 2.8 - Blokové schéma jednoduchého regulačního obvodu

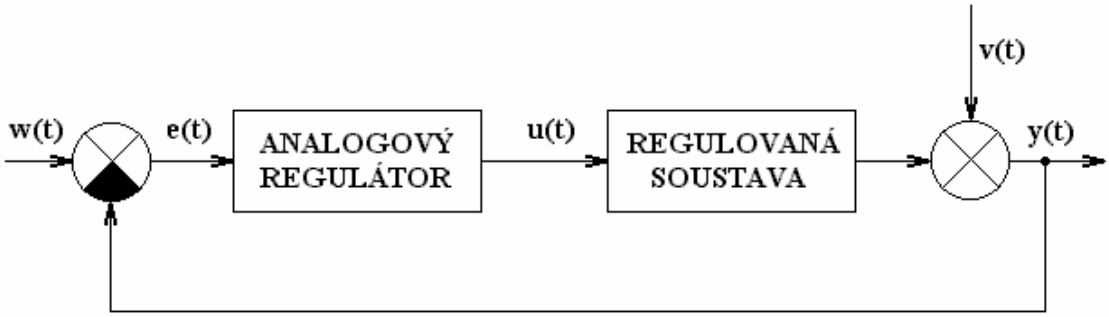
Spojité řízení je tam, kde jak akční zásah je spojitě nastavován, tak i údaje o řízeném systému jsou měřeny jako veličiny spojitě proměnné v čase.

Diskrétní řízení je dnes důsledkem nasazení počítačů jako regulátorů. U řídicích počítačů, které ani nedovedou zpracovávat spojitý signál, je nutný spojitý signál převádět na diskrétní.

Spojité regulační obvody

Jedná se o takové lineární regulační obvody, u nichž jsou všechny signály zpracovávány spojitě, tzn. všechny veličiny jsou funkcemi spojitého času t.

Blokové schéma lineárního regulačního obvodu znázorňuje obrázek 2.9. Regulátor na základě hodnoty regulační odchylky $e(t)$ nastaví akční veličinu $u(t)$ tak, aby byl splněn cíl regulace, tzn. $e(t) \to 0$.



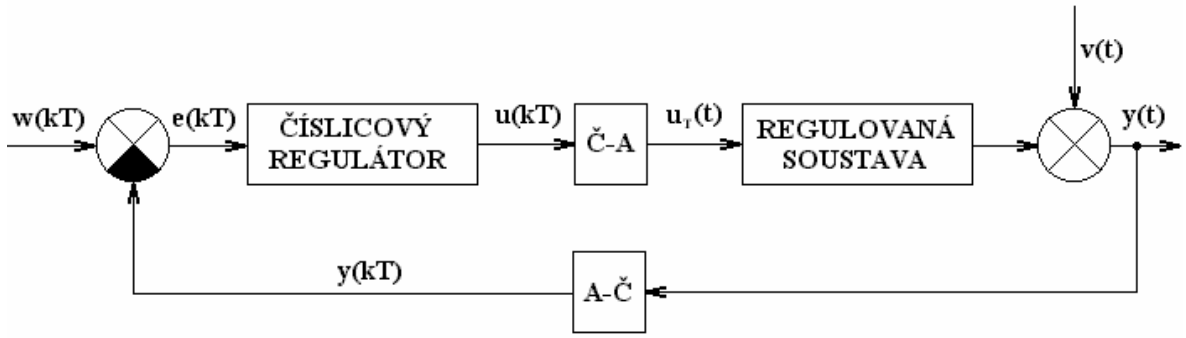
Obrázek 2.9 - Obecné blokové schéma jednorozměrného lineárního spojitého regulačního obvodu

Diskrétní regulační obvody

Diskrétní regulační obvod je takový obvod, ve kterém alespoň jedna veličina má tvar posloupnosti diskrétních hodnot vytvářených např. v časově ekvidistantních okamžicích. Obvykle si představujeme, že diskrétní regulační obvod využívá k výpočtu akční veličiny číslicový počítač, což však nemusí platit vždy.

Diskrétní regulační obvod,viz obr. 2.10, lze znázornit blokovým schématem skládajícím se ze spojitě pracujících členů, ze vzorkovacích členů, z tvarovacích členů,

nespojitě (diskrétně) pracujících členů, analogově-číslicových převodníků, z číslicově-analogových převodníků a popřípadě i z paměťových členů [BOLTON 1992].

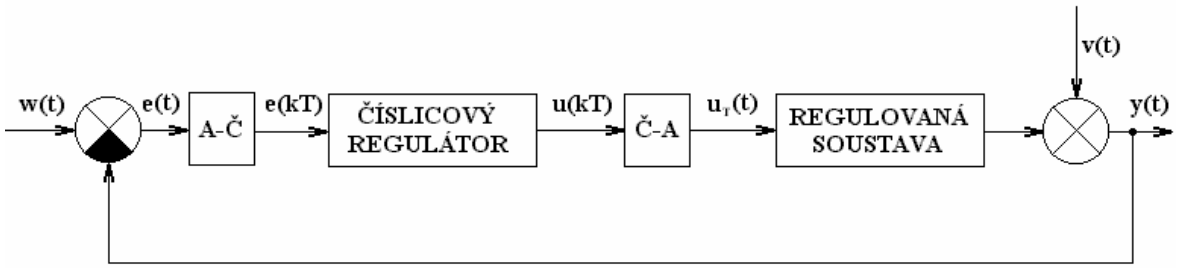


ČR - číslicový regulátor; A/Č - analogově číslicový převodník; Č/A - číslicově analogový převodník; k, kT - diskrétní čas $k = (0,1,2,...)$; u_T - tvarovaná akční veličina; T - vzorkovací perioda

Obrázek 2.10 - Obecné blokové schéma lineárního diskrétního regulačního obvodu

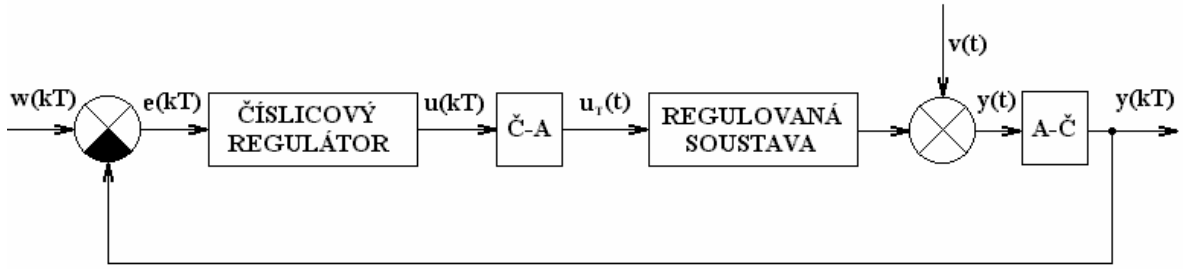
Regulovaná soustava je vždy spojitá. Při řešení syntézy diskrétních regulačních obvodů se obecně používají dva postupy:

a) předsunutí A-Č – převodníky se uvažují jako součást regulátoru, pak pracujeme s kvazispojitým regulátorem, viz obrázek 2.11. Tento postup je možný při malé vzorkovací periodě. Až 80% číslicových regulačních obvodů můžeme převést na analogové regulační obvody (analogový RO můžeme zastoupit číslicovým RO).



Obrázek 2.11 - Blokové schéma lineárního diskrétního obvodu s kvazianalogovým regulátorem

b) podsunutí A-Č – převodníky se přidají k regulované soustavě, kterou považujeme jako kvazidiskrétní, viz obrázek 2.12. Jestliže dáme A/Č za regulovanou soustavu, považujeme obvod za diskrétní. Tento postup se hlavně využívá při velkých vzorkovacích periodách. Používáme Z-transformaci, která je dosti složitá. Nedochází ke zkreslení informace.



Obrázek 2.12 - Blokové schéma lineárního diskrétního obvodu s diskrétní soustavou

Shrnutí pojmů 2.1.

Jsou zde definovány základní pojmy jako systém, prvek, vazba, matematický model, struktura systému. Dále jsou zde uvedeny základní činnosti se systémy a dělení signálů a systémů dle vybraných hledisek. Následuje vysvětlení pojmů řízení, ovládání a regulace, je zde popsána struktura regulačních obvodů, základní prvky a veličiny. Dále pak je vysvětlen rozdíl mezi spojitým a diskrétním regulačním obvodem a jsou popsány přístupy k syntéze pro diskrétní regulační obvody.

Otázky 2.1.

6. Co je to prvek?
7. Co je to vazba?
8. Co je to nestacionární systém?
9. Co je to dynamický systém?
10. Z čeho se skládá regulační obvod?
11. Co je to regulovaná veličina?
12. Co je to akční veličina?

2.2. Laplaceova transformace

Čas ke studiu: 1,5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat Laplaceovu transformaci.
- popsat rozklad na parciální zlomky.
- určit obraz a originál funkcí.
- vyřešit lineární diferenciální rovnice pomocí Laplaceovy transformace.

Výklad

Laplaceova transformace (L transformace) je účinný nástroj pro popis, analýzu a syntézu lineárních spojitých dynamických systémů. Usnadňuje řešení lineárních diferenciálních rovnic s konstantními koeficienty, které se převádí na algebraické rovnice. Patří mezi integrální transformace, kde oblast originálů je oblast reálných proměnných a oblast obrazů je oblast komplexní proměnné. Definiční vztahy Laplaceovy transformace:

$$F(s) = \mathrm{L}\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st}dt\,, \tag{2.1}$$

$$f(t) = \mathrm{L}^{-1}\{F(s)\} = \frac{1}{2\pi j}\int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s)e^{st}ds\,, \tag{2.2}$$

kde je: L, L^{-1} – operátor přímé/zpětné Laplaceovy transformace; t – reálná proměnná (čas); s – komplexní proměnná; $f(t)$ – funkce reálné proměnné, originál L transformace; $F(s)$ – funkce komplexní proměnné, obraz L transformace; j – imaginární jednotka, c – reálná konstanta zvolená tak, aby v polorovině Re $s > c$ funkce $F(s)$ neměla žádné singulární body.

Spojitá funkce $f(t)$ musí splňovat tři podmínky a to:

- musí být nulová pro záporný čas,
- musí být exponencionálního řádu,
- musí být spojitá, resp. po částech spojitá.

Pomocí definičních vztahů L transformace byla vytvořena tabulka základních párů obrazů a originálů vybraných funkcí, podrobnější slovníky lze najít např. [DORF&BISHOP 1998:], [VÍTEČKOVÁ 2005.].

Tabulka 2.1 Slovník L-transformace

	Originál $f(t)$	**Obraz $F(s)$**
	Základní vlastnosti	
1.	$af(t)$	$aF(s)$
2.	$f'(t) = \frac{\mathrm{d}f(t)}{\mathrm{d}t}$	$sF(s) - f(0)$
3.	$f^n(t) = \frac{\mathrm{d}^n f(t)}{\mathrm{d}t^n}$	$s^nF(s) - \sum_{i=1}^{n} s^{n-i}\frac{\mathrm{d}^{i-1}f(0)}{\mathrm{d}t^{i-1}}$
4.	$\int_0^t f(\tau)\mathrm{d}\tau$	$\frac{1}{s}F(s)$
	Základní slovník	
5.	$\delta(t)$	1
6.	$\eta(t)$	$\frac{1}{s}$
7.	t	$\frac{1}{s^2}$

	Originál $f(t)$	Obraz $F(s)$
8.	t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
9.	$e^{\pm at}$	$\frac{1}{s \mp a}$
10.	$te^{\pm at}$	$\frac{1}{(s \mp a)^2}$
11.	$t^2 e^{\pm at}$	$\frac{1}{(s \mp a)^3}$
12.	$1 - e^{-at}$	$\frac{1}{s(s+a)}$
13.	$t - \frac{1-e^{-at}}{a}$	$\frac{1}{s^2(s+a)}$
14.	$1 - e^{-at} - ate^{-at}$	$\frac{1}{s(s+a)^2}$
15.	$(1-at)e^{-at}$	$\frac{s}{(s+a)^2}$
16.	$\frac{e^{-at} - e^{-bt}}{b-a}$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
17.	$1 - \frac{b}{b-a}e^{-at} + \frac{a}{b-a}e^{-bt}$	$\frac{ab}{s(s+a)(s+b)}$
18.	$\frac{e^{-at}}{(b-a)(c-a)} + \frac{e^{-bt}}{(c-a)(a-b)} + \frac{e}{(a-c}$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)(s+c)}$
19.	$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
20.	$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
21.	$a^{-at} \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$
22.	$e^{-at} \cos \omega t$	$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$

Příklad 2.1. *Laplaceova transformace.*

Určete originál k obrazu:

a.) $\dfrac{2}{s+3}$

b.) $\dfrac{s}{s^2+4s+13}$.

Řešení:

a.) V základním slovníku musíme najít příslušný obraz funkce (určující je jmenovatel, ten se nedá změnit ani upravit). V našem případě obraz odpovídá výrazu na řádku 9, takže můžeme určit originál (násobení konstantou se zachovává, viz řádek 1):

$$\frac{2}{s+3} \mathrel{\hat{=}} 2e^{-3t}$$

b.) V tomto případě máme ve jmenovateli polynom druhého stupně, takže musíme určit jeho kořeny a podle toho určíme řádek tabulky. Polynom druhého stupně ve jmenovateli mají výrazy 10, 16, 21 a 22. V našem případě jsou kořeny komplexně sdružené, tomu odpovídají vztahy 21 a 22, porovnáním s čitatelem obrazu vyplývá, že budeme pracovat s řádkem 22. Nejdříve určíme hodnoty a a ω

$$\frac{s}{s^2+4s+13} = \frac{s}{(s+2)^2+3^2}.$$

Teď musíme upravit čitatel, tzn. přičteme a odečteme hodnotu a, a rozepíšeme původní výraz na dva zlomky

$$\frac{s+2-2}{(s+2)^2+3^2} = \frac{s+2}{(s+2)^2+3^2} - \frac{2}{(s+2)^2+3^2}.$$

První zlomek odpovídá řádku 22 a druhý zlomek převedeme dle řádku 21, ten má ale v čitateli hodnotu ω, a proto výraz rozšíříme jedničkou a můžeme určit originál k danému obrazu

$$\frac{s+2}{(s+2)^2+3^2} - \frac{2}{(s+2)^2+3^2}\frac{3}{3} \mathrel{\hat{=}} e^{-2t}\cos 3t - \frac{2}{3}e^{-2t}\sin 3t.$$

V předchozím příkladě jsme si ukázali, jak lze určit k danému obrazu $F(s)$ jeho originál $f(t)$ pouhým převodem na základě tabulky 2.1. Pokud však obraz má složitější vztah musíme ho zjednodušit a to pomocí rozkladu na parciální zlomky. Předpokládejme, že obraz $F(s)$ je ryze racionálně lomená funkce (tzn. stupeň polynomu v čitateli je nižší než stupeň polynomu ve jmenovateli). Nejdříve musíme určit kořeny polynomu ve jmenovateli a ty

mohou být reálné jednonásobné, reálné vícenásobné, komplexně sdružené a komplexně sdružené vícenásobné. Rozklad na parciální zlomky můžeme popsat vztahy:

- Reálné kořeny jednonásobné

$$F(s)=\frac{M(s)}{(s-s_1)(s-s_2)(s-s_3)}=\frac{A}{s-s_1}+\frac{B}{s-s_2}+\frac{C}{s-s_3}$$

- Reálné kořeny vícenásobné

$$F(s)=\frac{M(s)}{(s-s_1)^4}=\frac{A}{s-s_1}+\frac{B}{(s-s_1)^2}+\frac{C}{(s-s_1)^3}+\frac{D}{(s-s_1)^4}$$

- Komplexně sdružené kořeny

$$F(s)=\frac{M(s)}{s^2+as+b}=\frac{As+B}{s^2+as+b}$$

- Násobné komplexně sdružené kořeny

$$F(s)=\frac{M(s)}{(s^2+cs+d)^4}=\frac{C_1s+D_1}{s^2+cs+d}+\frac{C_2s+D_2}{(s^2+cs+d)^2}+\frac{C_3s+D_3}{(s^2+cs+d)^3}+\frac{C_4s+D_4}{(s^2+cs+d)^4}$$

Odstraněním zlomků dostaneme rovnici pro dopočet konstant rozkladu A, B, C, D a pak můžeme použít dosazovací metodu nebo metodu neurčitých koeficientů, viz. příklad 2.2.

Příklad 2.2. *Laplaceova transformace.*

Určete originál k obrazu: $F(s)=\dfrac{2s+4}{(s+2)(s^2+4)}$

Řešení:

$F(s)$ je ryze racionální lomená funkce, ale tento výraz ve slovníku nenajdeme. Musíme provést rozklad na parciální zlomky a pak teprve provést převod.

$$\frac{2s+4}{(s+2)(s^2+4)}=\frac{A}{s+2}+\frac{Bs+C}{s^2+4}=\frac{2}{s^2+4}\;\hat{=}\;\sin 2t$$

$$A(s^2+4)+(Bs+C)(s+2)=2s+4$$

$$s=-2\Rightarrow 6A=0\Rightarrow A=0$$

$$s=0\Rightarrow 2C=4\Rightarrow C=2$$

$$s=1\Rightarrow 3B+3C=6\Rightarrow B=0$$

Příklad 2.3. *Řešení diferenciálních rovnic.*

Pomocí L transformace vyřešte diferenciální rovnici
$y''(t)+2y'(t)+2y(t)=2, y(0)=0, y'(0)=0.$

Řešení:

Nejdříve určíme obraz diferenciální rovnice, tzn. každý výraz převedeme zvlášť, součet resp. rozdíl se zachovává stejně jako násobení konstantou. Obraz diferenciální rovnice je

$$s^2Y(s)+2sY(s)+2Y(s)=\frac{2}{s}.$$

V oblasti obrazu se diferenciální rovnice změnila na algebraickou, takže jednoduše vyjádříme obraz řešení diferenciální rovnice $Y(s)$

$$Y(s)=\frac{2}{s\left(s^2+2s+2\right)}.$$

Teď musíme pomocí zpětné L transformace najít originál řešení diferenciální rovnice.

$$y(t)=\mathrm{L}^{-1}\left\{\frac{2}{s\left(s^2+2s+2\right)}\right\}.$$

Tento výraz v našem slovníku L transformace nenajdeme, takže ho musíme zjednodušit a to rozkladem na parciální zlomky, v našem případě je rozklad na parciální zlomky následující

$$\frac{2}{s\left(s^2+2s+2\right)}=\frac{\mathrm{A}}{s}+\frac{\mathrm{B}s+\mathrm{C}}{s^2+2s+2}.$$

Konstanty parciálních zlomků dopočítáme pomocí metody neurčitých koeficientů nebo dosazovací metodou na základě rovnice

$$2=\mathrm{A}\left(s^2+2s+2\right)+\mathrm{B}s^2+\mathrm{C}s.$$

Např. dosazovací metoda:

$$\begin{aligned} &s=0: \quad 2=2A && \Rightarrow \quad A=1\\ &s=1: 2=A+B+C\\ &s=-1: 2=A+B-C && \Rightarrow B=2-3A=-1\\ &C=A+B-2=-2 \end{aligned}$$

Nyní můžeme určit řešení diferenciální rovnice:

$$y(t)=\mathrm{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s}-\frac{s+2}{(s+1)^2+1}\right\}=\mathrm{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s}-\frac{s+1}{(s+1)^2+1}-\frac{1}{(s+1)^2+1}\right\}=\eta(t)-e^{-t}\cos t-e^{-t}\sin t.$$

Správnost řešení můžeme ověřit výpočtem počátečních podmínek:

$$y(0) = 1 - 1 = 0$$

$$y'(t) = e^{-t}(\cos t + \sin t) - e^{-t}(-\sin t + \cos t) \quad \Rightarrow y'(0) = 0$$

Příklad 2.4. *Řešení diferenciálních rovnic.*

Vyřešte zadanou diferenciální rovnici $y''(t) + 7y'(t) + 10y(t) = \eta(t)$ s nulovými počátečními podmínkami.

Řešení:

Derivace v diferenciální rovnici odpovídá příslušné mocnině komplexní proměnné *s*. *η(t)* se převede podle Laplaceova slovníku na *1/s*.

$$s^2 Y(s) + 7sY(s) + 10Y(s) = \frac{1}{s}$$

$$Y(s)\left[s^2 + 7s + 10\right] = \frac{1}{s}$$

Vyjádříme si *Y*(*s*) a postupujeme obdobně, jako v minulém příkladu. Rozložíme zlomek na parciální zlomky.

$$Y(s) = \frac{1}{s(s^2 + 7s + 10)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s+2} + \frac{C}{s+5}$$

$$1 = A(s+2)(s+5) + Bs(s+5) + Cs(s+2)$$

$$s = 0 \Rightarrow A = \frac{1}{10}$$

$$s = -2 \Rightarrow B = -\frac{1}{6}$$

$$s = -5 \Rightarrow C = \frac{1}{15}$$

$$Y(s) = \frac{1}{10s} - \frac{1}{6(s+2)} + \frac{1}{15(s+5)}$$

Tuto funkci můžeme zpátky převést pomocí L-transformace.

$$y(t) = \frac{1}{10}\eta(t) - \frac{1}{6}e^{-2t} + \frac{1}{15}e^{-5t}$$

Správnost řešení můžeme ověřit výpočtem počátečních podmínek:

$$y(0) = \frac{1}{10} - \frac{1}{6} + \frac{1}{15} = \frac{3 - 5 + 2}{30} = 0$$

$$y'(t) = \frac{1}{3}e^{-2t} - \frac{1}{3}e^{-5t} \quad \Rightarrow y'(0) = 0$$

Příklad 2.5. *Řešení diferenciálních rovnic.*

Vyřešte zadanou diferenciální rovnici $y''(t)+7y'(t)+10y(t)=\eta(t)$
$y(0)=2, y'(0)=1$

Řešení:

Tento příklad se řeší podobně jako příklad 2., ale musíme v prvním kroku přidat počáteční podmínky. Použijeme k tomu vlastnost L-transformace derivace n-tého řádu

$$L\left\{f^{(n)}(t)\right\}=s^nF(s)-s^{n-1}f(0)-s^{n-2}f'(0)-\ldots-f^{n-1}(0)$$

$$s^2Y(s)-sy(0)-y'(0)+7\left[Y(s)-y(0)\right]+10Y(s)=\frac{1}{s}$$

$$Y(s)(s^2+7s+10)-2s-15=\frac{1}{s}$$

$$Y(s)(s^2+7s+10)=\frac{1}{s}+2s+15$$

$$Y(s)(s^2+7s+10)=\frac{2s^2+15s+1}{s}$$

$$Y(s)=\frac{2s^2+15s+1}{s(s+2)(s+5)}=\frac{A}{s}+\frac{B}{s+2}+\frac{C}{s+5}$$

$$2s^2+15s+1=A(s+2)(s+5)+Bs(s+5)+Cs(s+2)$$

$$s=0\Rightarrow A=\frac{1}{10}$$

$$s=-2\Rightarrow B=\frac{7}{2}$$

$$s=-5\Rightarrow C=-\frac{24}{15}$$

$$Y(s)=\frac{1}{10s}+\frac{7}{2(s+2)}-\frac{24}{15(s+5)}$$

$$y(t)=\frac{1}{10}\eta(t)+\frac{7}{2}e^{-2t}-\frac{24}{15}e^{-5t}$$

Správnost řešení můžeme ověřit výpočtem počátečních podmínek:

$$y(0)=\frac{1}{10}+\frac{7}{2}-\frac{24}{15}=\frac{3+105-48}{30}=2$$

$$y'(t)=-7e^{-2t}+8e^{-5t}\quad\Rightarrow y'(0)=1$$

Shrnutí pojmů 2.2.

Kapitola je věnována Laplaceově transformaci. Jsou zde popsány definiční vztahy a základní vlastnosti L transformace. Dále kapitola obsahuje zkrácený slovník L transformace, který je nutný pro práci s touto transformací. Závěr kapitoly tvoří řešené příklady, které

popisují práci s L transformací a hlavně ukazují postup řešení lineárních diferenciálních rovnic.

Otázky 2.2.

1. Jaká funkce je obraz funkce u Laplaceovy transformace?
2. Jak zní vlastnost Laplaceovy transformace pro n-tou derivaci?
3. Jaké typy rovnic se dají pomocí Laplaceovy transformace výhodně řešit?

Úlohy k řešení 2.1.

13. Určete originál funkce

a) $F(s)=\dfrac{2s+1}{(s+2)(s^2+10s+21)}$ b) $F(s)=\dfrac{1}{s^4+2s^3+s^2}$

c) $F(s)=\dfrac{s^3+s^2+9s-2}{s^3+s^2+2s}$ d) $F(s)=\dfrac{5s+3}{(s-1)(s^2+2s+3)}$

14. Vyřešte zadanou diferenciální rovnici $y''(t)+2y'(t)+3y(t)=\eta(t)$ s nulovými počátečními podmínkami.
15. Vyřešte zadanou diferenciální rovnici $y''(t)+9y(t)=\eta(t)$ s nulovými počátečními podmínkami.
16. Vyřešte zadanou diferenciální rovnici $y'''(t)+10y'(t)+8y(t)=2\eta(t)\quad y(0)=1, y'(0)=3$.

2.3. Matematický popis statických a dynamických vlastností spojitých systémů

Čas ke studiu: 2 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat způsoby popisu statických a dynamických vlastností spojitých systémů - oblast použití, obecný tvar, podmínky fyzikální realizovatelnosti, ustálený stav, charakteristiky, převodní vztahy.
- popsat měření přechodové, impulsní a kmitočtové charakteristiky.
- vypočítat matematické modely z diferenciální rovnice.
- nakreslit přechodovou, impulsní a amplitudo-fázovou kmitočtovou charakteristiku.

Výklad

Analýza dynamických systémů je nedílnou součástí takových oborů jako je identifikace, simulace a syntéza systémů. Analýzou zjišťujeme a zkoumáme chování systému při znalosti jeho struktury a vlastností vazeb mezi jednotlivými prvky. Analýzu můžeme chápat také jako rozbor zkoumaného systému s cílem specifikace jeho podstatných vlastností jak statických, tak i dynamických.

❑ Statická charakteristika

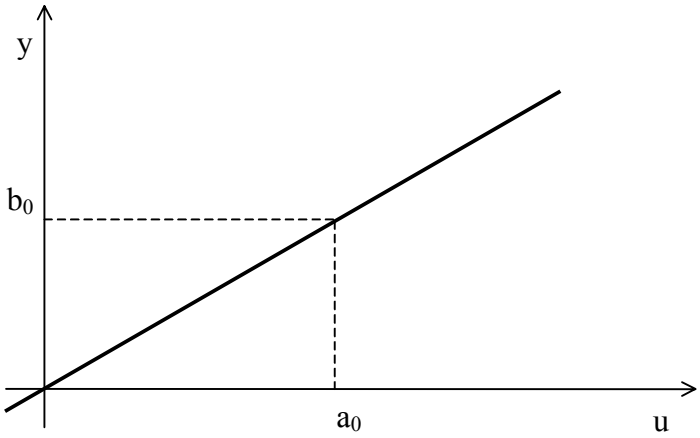
Statické vlastnosti lineárních spojitých dynamických systémů popisují systém v ustáleném stavu, což je stav, kdy se vstupy a výstupy v čase nemění, tzn. $t \to \infty$. Vyjdeme-li z popisu systému definovaného diferenciální rovnicí ve tvaru

$$a_n y^{(n)}(t) + a_{n-1} y^{(n-1)}(t) + \cdots + a_0 y(t) = b_m u^{(m)}(t) + \cdots + b_0 u(t) \qquad (2.3)$$

kde je a_i, b_j – konstantní koeficienty, $u(t)$ – vstupní veličina, $y(t)$ – výstupní veličina.
Z definice statické charakteristiky (závislost výstupní veličiny na vstupní veličině v ustáleném stavu) dostaneme statickou funkci ve tvaru

$$y(\infty) = \frac{b_0}{a_0} u(\infty), \qquad (2.4)$$

kde b_0/a_0 je směrnice přímky procházející počátkem. [Švarc, I 1992, Hanuš,B.,Balda, M. & kolektiv 1989]



Obrázek 2.13 - Příklad statické charakteristiky

Nyní uvedeme způsoby jak popsat dynamické vlastnosti spojitých systémů, jak v oblasti časové, kmitočtové, tak i v oblasti komplexní proměnné.

❑ Diferenciální rovnice

Je to matematický popis v časové oblasti. Řád diferenciální rovnice *n* [nejvyšší derivace výstupní veličiny *y*(*t*)] udává řád systému. obecný tvar lineárně diferenciální rovnice s konstantními koeficienty je

$$a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + \ldots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m u(t)}{dt^m} + \ldots + b_1 \frac{du(t)}{dt} + b_0 u(t)\,. \quad (2.5)$$

Podmínky fyzikální realizovatelnosti

n > m	**silná**
n = m	**slabá**
n < m	**nerealizovatelné**

Ustálený stav - výstupní i vstupní veličina jsou v čase konstantní

$$a_0 y(\infty) = b_0 u(\infty)\,,$$

$$y(\infty) = \lim_{t\to\infty} y(t) = \frac{b_0}{a_0} u(\infty)\,.$$

❑ Obrazový přenos

Je to popis oblasti komplexně proměnné. Je definován jako podíl Laplaceova obrazu výstupní veličiny k Laplacoeovu obrazu vstupní veličiny při nulových počátečních podmínkách.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \ldots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + \ldots + a_1 s + a_0}\,. \quad (2.6)$$

Podmínky fyzikální realizovatelnosti:

n > m	**silná** (stupeň polynomu jmenovatele *n* je vetší než stupeň polynomu čitatele *m*)
n = m	**slabá**

n < m **nerealizovatelné**

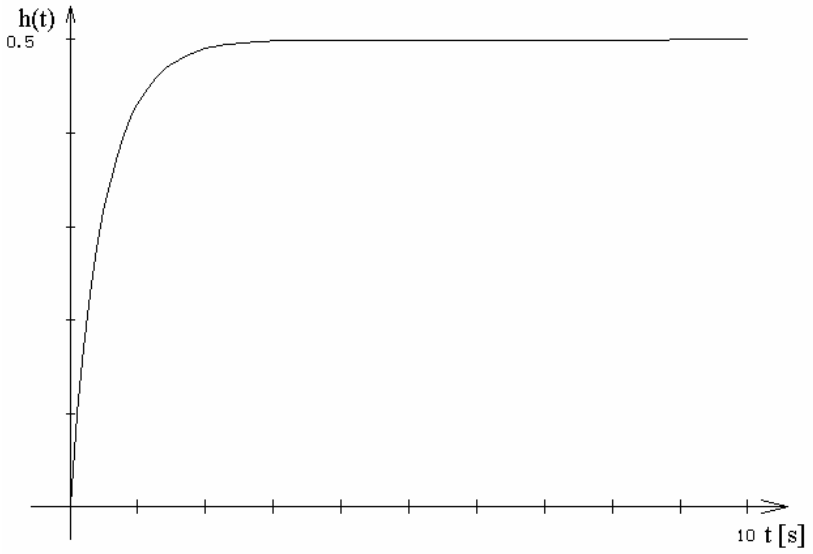
Ustálený stav:

$$y(\infty) = \lim_{s \to 0} G(s)u(\infty) \Rightarrow \frac{b_0}{a_0} u(\infty), \qquad a_0 \neq 0 .$$

❑ Přechodová funkce

Přechodová funkce systému je jeho odezva na vstup ve tvaru Heavisideova jednotkového skoku. Značí se $h(t)$ a její časová závislost se nazývá přechodová charakteristika. Přechodovou funkci můžeme určit analyticky z diferenciální rovnice nebo z obrazového přenosu systému $G(s)$.

$$h(t) = L^{-1}\{H(s)\} = L^{-1}\left\{\frac{1}{s} G(s)\right\} \tag{2.7}$$



Obrázek 2.14 - Příklad přechodové charakteristiky

Podmínky fyzikální realizovatelnosti:

$$h(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ \text{h(t)} & t > 0 \end{cases} \quad \text{slabá fyzikální realizovatelnost,} \tag{2.8}$$

$$h(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \text{h(t)} & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{silná fyzikální realizovatelnost.} \tag{2.9}$$

Příklad 2.6.

Určete přechodovou funkce a sestrojte přechodovou charakteristiku systému s přenosem $G(s) = \dfrac{3}{0{,}5s+1}$.

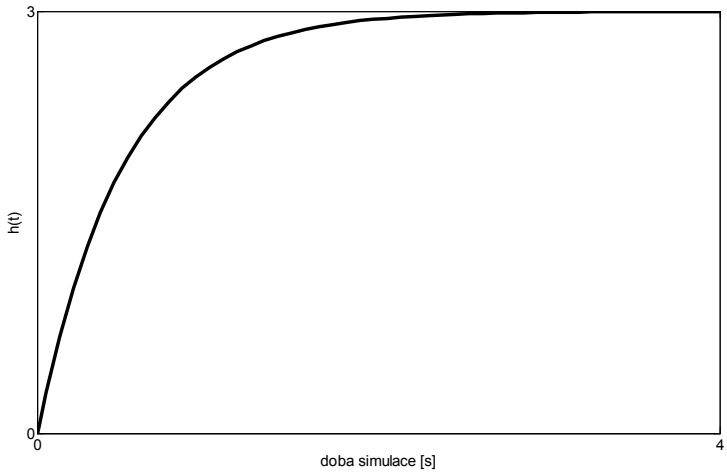
Řešení:

Přechodová funkce je dána (2.7), můžeme tedy psát

$$h(t) = \mathrm{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s}\ \frac{3}{0{,}5s+1}\right\} = 2.3\mathrm{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s}\ \frac{1}{s+2}\right\} = 3(1-e^{-2t}).$$

Pro vykreslení přechodové charakteristiky musíme spočítat počáteční a koncovou hodnotu přechodové funkce, tzn.

$$h(0) = 0,$$
$$h(\infty) = 3.$$



Obrázek 2.15 - Přechodová charakteristika k příkladu 2.6

Měření přechodové charakteristiky plyne z její definice, tedy na vstup soustavy přivedeme vstupní signál ve formě jednotkového skoku. Při této metodě určování přechodové charakteristiky musí být před zavedením změny vstupního signálu soustava v ustáleném stavu a vstupují-li do soustavy další signály je třeba je udržovat v průběhu měření na konstantní hodnotě. Účelné je měření několikrát opakovat (pro snížení vlivu náhodných poruch). Výslednou přechodovou charakteristiku lze potom stanovit podle následujícího vzorce:

$$f_i = \frac{\sum_{k=1}^{N} \mathrm{sign}(\Delta u_k)\, y_{ik}}{\sum_{k=1}^{N} |\Delta u_k|}$$

kde je N - počet opakovaných měření přechodové charakteristiky při obecně nestejně velkých skokových změnách vstupní veličiny soustavy, Δu_k – přírůstek řídicí veličiny při k-tém měření přechodové charakteristiky, f_i - pořadnice vyhodnocené přechodové charakteristiky v čase $t = i*\Delta t$, kde Δt je interval vzorkování, y_{ik} - hodnota odezvy vstupní veličiny soustavy v i-tém intervalu vzorkování při k-tém měření, i - pořadí vzorkovaných bodů přechodové charakteristiky $i = 0$ až m.

❑ Impulsní funkce

Impulsní (někdy též váhová) funkce $g(t)$ je odezva systému na vstup ve tvaru Diracova impulsu. Diracův nebo též jednotkový impuls $\delta(t)$ se nedá fyzikálně realizovat. Při jeho přibližné realizaci se udává, že musí mít co největší amplitudu a co nejkratší dobu trvání. Matematicky je $\delta(t) = 0$ pro $t \neq 0$ přičemž $\delta(t)$ není definováno pro $t = 0$, ale platí

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)dt = 1. \qquad (2.10)$$

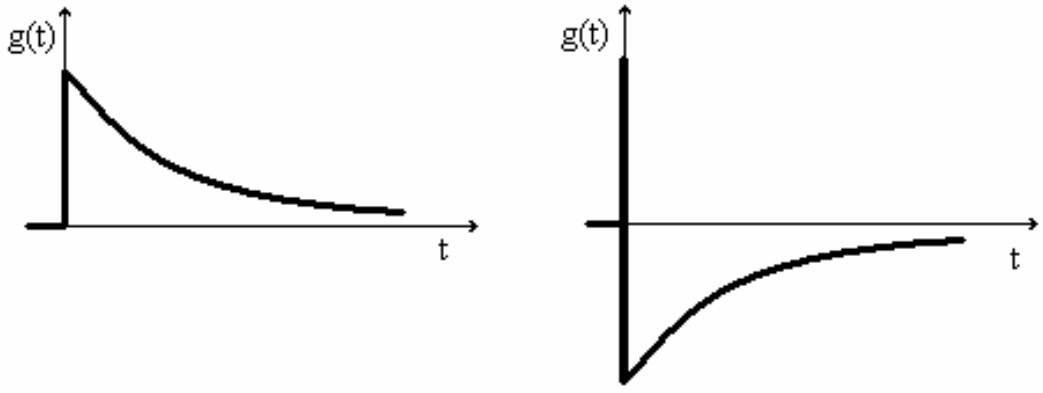
Časová závislost impulsní funkce se nazývá impulsní charakteristika. Impulsní funkce lze analyticky určit dle vztahu

$$g(t) = \mathrm{L}^{-1}\{G(s)\}. \qquad (2.11)$$

Podmínky fyzikální realizovatelnosti:

$$g(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ g(t) & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{silná fyzikální realizovatelnost,} \qquad (2.12)$$

$$g(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ g(t) + \delta(t) & t \geq 0 \end{cases} \quad \text{slabá fyzikální realizovatelnost.} \qquad (2.13)$$



Obrázek 2.16 - Příklad impulsní charakteristiky: z leva silně fyzikálně realizovatelná, slabě fyzikálně realizovatelná

Ustálený stav:

$$y(\infty) = \left[\lim_{t\to\infty} \int_0^t g(\tau) d\tau \right] \cdot u(\infty) .$$

Vztah mezi přechodovou a impulsní funkcí

$$H(s) = \frac{G(s)}{s} \Rightarrow h(t) = \int_0^t g(\tau) d\tau , \tag{2.14}$$

$$G(s) = sH(s) \Rightarrow g(t) = \frac{dh(t)}{dt} . \tag{2.15}$$

Příklad 2.7.

Určete impulsní funkci a sestrojte přechodovou charakteristiku systému s přenosem $G(s) = \dfrac{3}{0{,}5s+1}$.

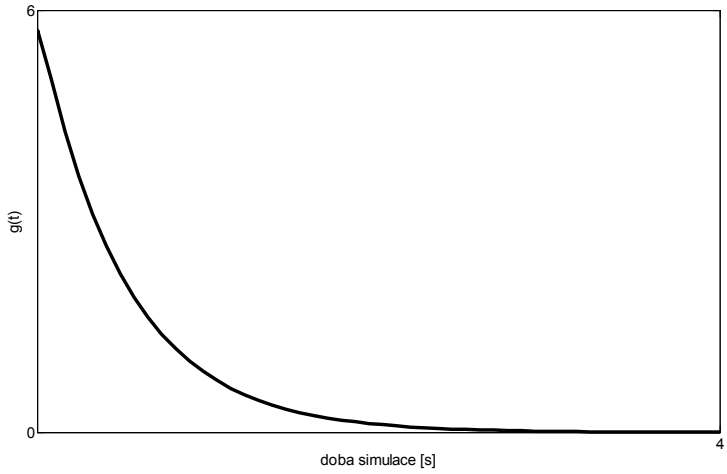
Řešení:

Impulsní funkce je dána (2.11) , můžeme proto psát

$$g(t) = \mathrm{L}^{-1}\left\{ \frac{3}{0{,}5s+1} \right\} = \mathrm{L}^{-1}\left\{ \frac{6}{s+2} \right\} = 6e^{-2t} .$$

Pro vykreslení impulsní charakteristiky musíme spočítat počáteční a koncovou hodnotu impulsní funkce, tzn.

$$g(0) = 6,$$
$$g(\infty) = 0.$$



Obrázek 2.17 - Přechodová charakteristika k příkladu 2.7

Měření impulsní charakteristiky plyne taktéž z její definice, tedy na vstup soustavy přivedeme vstupní signál ve formě jednotkového impulsu Požadavky při měření jsou stejné jako při zjišťování odezvy na skok u přechodové charakteristiky, metoda určení odezvy na impuls, i když je experimentálně náročnější, má přednost v tom, že zásah do provozu je při stejné výšce vstupního signálu podstatně menší.

❑ Kmitočtový přenos

Kmitočtový přenos popisuje vlastnosti systému v kmitočtové oblasti a je popsán vztahem

$$G(j\omega) = G(s)\big|_{s=j\omega} = \frac{b_m(j\omega)^m + \cdots b_1(j\omega) + b_0}{a_n(j\omega)^n + \cdots a_1(j\omega) + a_0} = \frac{M(j\omega)}{N(j\omega)}, \qquad (2.16)$$

kde ω je reálný kmitočet [s^{-1}], tzn. v intervalu $(0,\infty)$.
Podmínky fyzikální realizovatelnosti:

$m = n$	slabá fyzikální realizovatelnost,
$m < n$	silná fyzikální realizovatelnost.

Kmitočtový přenos $G(j\omega)$ je funkce komplexní proměnné, takže jej můžeme vyjádřit ve všech základních tvarech:

- algebraický tvar:
  $$G(j\omega) = Re\{G(j\omega)\} + j\,Im\{G(j\omega)\} = P(\omega) + jQ(\omega), \qquad (2.17)$$
  kde je $P(\omega)$ – reálná část kmitočtového přenosu, $Q(\omega)$ – imaginární část kmitočtového přenosu, j – imaginární jednotka, $j = \sqrt{-1}$,

- exponenciální tvar:
  $$G(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \qquad (2.18)$$
  $A(\omega)$ – modul kmitočtového přenosu, $A(\omega) = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}$, $\varphi(\omega)$ – fáze kmitočtového přenosu, $\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\dfrac{Q(\omega)}{P(\omega)}$.

- goniometrický tvar:
  $$G(j\omega) = A(\omega)\left[\cos\varphi(\omega) + j\sin\varphi(\omega)\right]. \qquad (2.19)$$

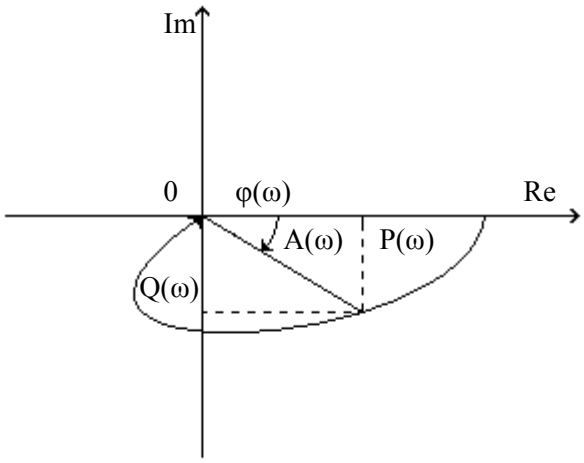
kde je: $P(\omega)$- reálná část, $Q(\omega)$ - imaginární část.

Ustálený stav:

$$y(\infty) = \lim_{\omega \to 0} G(j\omega)u(\infty)$$

Pro vyšetření vlastností systému v kmitočtové oblasti můžeme použít tři charakteristiky a to:

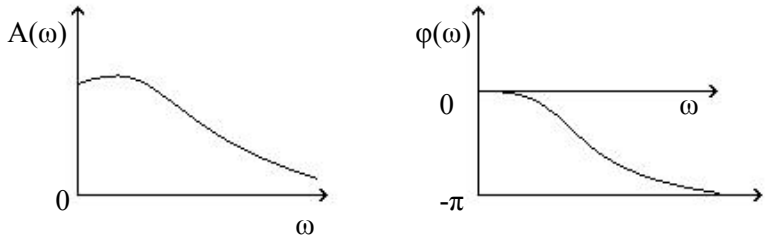
1) AFKCH (amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika)



Obrázek 2.18 - Charakteristika AFKCH.

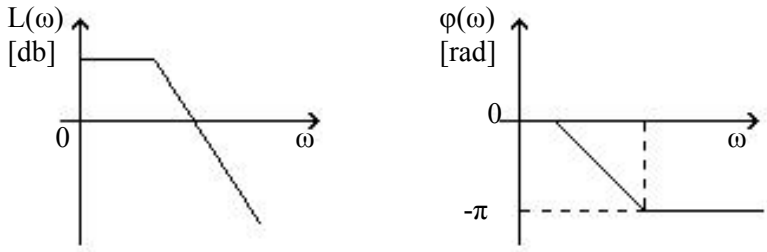
Silná podmínka – systém je silně fyzikálně realizovatelný, pokud charakteristika končí v nule. Jinak je systém slabě fyzikálně realizovatelný.

2) AKCH + FKCH (amplitudová a fázová kmitočtová charakteristika)



Obrázek 2.19 - Charakteristika AKCH+FKCH

3) LKCH (logaritmické kmitočtové charakteristiky)



Obrázek 2.20 - Charakteristika LKCH.

Měření kmitočtové charakteristiky. Měřením se určuje odezva soustavy na harmonicky proměnlivý vstupní signál konstantní amplitudy – budící kmity. Jenž lze popsat harmonickou funkcí

$$\Delta u(t) = \Delta u_A \cos \omega t$$

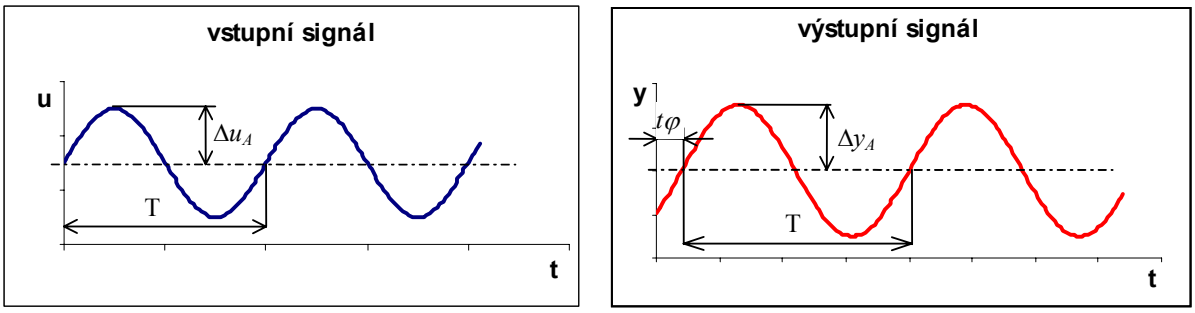
Měření se opakuje s různými kruhovými frekvencemi u vstupního signálu. Je nutno je volit tak, abychom pokryli celé kmitočtové pásmo harmonických kmitů, které zkoumaná soustava přenáší. U lineárních systémů lze výstupní signál soustavy – vynucené kmity, po odeznění přechodového děje, který jej zkresluje taktéž popsat harmonickou funkcí

$$\Delta y(t) = \Delta y_A \cos(\omega t + \varphi)$$

Výstupní signál – vynucené kmity má tedy stejnou frekvencí jako vstupní signál – budící kmity, avšak s různou amplitudou a oproti vstupnímu signálu je fázově posunut viz. obr. 2.21. Fázové posunutí lze popsat vztahem

$$\varphi = \omega \cdot t_\varphi ,$$

kde t_φ představuje časové posunutí úhlu.



Obrázek 2.21 - Tvar a vzájemný vztah vstupního a výstupního signálu

Vztah mezi budícími a vynuceními kmity vyjadřují dva parametry kmitočtové charakteristiky

- amplitudová určující poměr amplitud v závislosti na frekvenci

$$\frac{\Delta y_A}{\Delta u_A} = A(\omega)$$

- fázová určující fázové posunutí v závislosti na frekvenci

$$\varphi = \varphi(\omega)$$

Použití periodických impulsů

Určování kmitočtové charakteristiky z harmonických signálů je časově i technicky velmi náročné. Tento nedostatek lze zmírnit nahrazením harmonického signálů periodickými pravoúhlými impulsy s frekvencí $f_0 = \frac{\omega}{2\pi}$ a amplitudou A_0. Rozložením tohoto signálu do Fourierovy řady obdržíme

$$u(t) = \frac{2A_0}{\pi}\left[\sin\omega_0 t + \frac{1}{3}\sin 3\omega_0 t + \frac{1}{5}\sin 5\omega_0 t + \ldots.\right]$$

Odezvu na tento signál pomocí harmonické analýzy je možno rovněž rozložit do Fourierovy řady

$$y(t) = \frac{2A_0}{\pi}\left[A_1 \sin(\omega_0 t + \varphi_1) + \frac{A_3}{3}\sin(3\omega_0 t + \varphi_3) + \frac{A_5}{5}\sin(5\omega_0 t + \varphi_5) + \ldots.\right]$$

Porovnáním odpovídajících harmonických složek vstupního a výstupního signálu obdržíme pro $\omega_0, 3\omega_0, 5\omega_0, ...$ hodnoty amplitud a fází kmitočtové charakteristiky. Vzhledem k tomu, že hodnoty amplitud rychle klesají, využívají se jen první tři složky a další body kmitočtové charakteristiky se získají dalším měřením s pravoúhlými impulsy jiné frekvence.

Příklad 2.8. *Matematické modely*

Určete matematické modely (přenos, přechodová charakteristika, impulsní charakteristika, frekvenční přenos) pro systém popsaný diferenciální rovnicí

$$T_1 y'(t) + y(t) = u(t)$$

Řešení:

Pro určení obrazového přenosu musíme najít L- obraz diferenciální rovnice **při nulových počátečních podmínkách**, který v tomto případě je popsán vztahem
$T_1 sY(s) + Y(s) = U(s)$.
Vyjádřením podílu L-obrazu výstupní proměnné k L-obrazu vstupní proměnné dostaneme vztah pro **obrazový přenos**

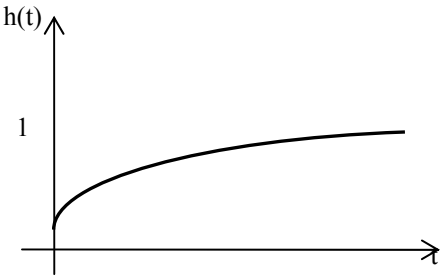
$$G(s) = \frac{1}{T_1 s + 1}.$$

Přechodová funkce se vypočte dle definičního vztahu:

$$h(t) = L^{-1}\left\{\frac{G(s)}{s}\right\} = L^{-1}\left\{\frac{1}{s(T_1 s + 1)}\right\} = 1 - e^{-\frac{1}{T_1}t}$$

$$h(0) = 0$$

$$h(\infty) = 1$$



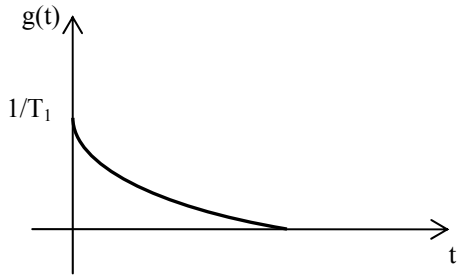
Obrázek 2.22 - Výsledný tvar přechodové charakteristiky.

Impulsní funkce se vypočte dle vztahu:

$$g(t) = L^{-1}\{G(s)\} = L^{-1}\left\{\frac{1}{T_1 s + 1}\right\} = \frac{1}{T_1} e^{-\frac{1}{T_1}t}$$

$$g(0) = \frac{1}{T_1}$$

$$g(\infty) = 0$$



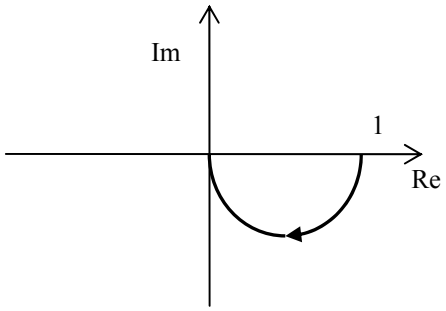
Obrázek 2.23 - Výsledný tvar impulsní charakteristiky

Kmitočtový přenos určíme tak, že do obrazového přenosu dosadíme za proměnnou *s* výraz $j\omega$ a určíme jeho reálnou a imaginární část:

$$G(j\omega)=\frac{1}{T_1 j\omega+1}=\frac{1}{T_1(j\omega)+1}\frac{-T_1 j\omega+1}{-T_1 j\omega+1}=\frac{-T_1 j\omega+1}{T_1^2\omega^2+1}=\frac{1}{T_1^2\omega^2+1}-j\frac{T_1\omega}{T_1^2\omega^2+1}$$

Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika:

ω	**0**	∞	**1**
P	1	0	+
Q	0	0	-



Obrázek 2.24 - Výsledný tvar amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky

---

Příklad 2.9. *Matematické modely*

Určete matematické modely (přenos, přechodová charakteristika, impulsní charakteristika, frekvenční přenos) pro systém popsaný diferenciální rovnicí.

$$T_1 y'(t)+y(t)=T_1 u'(t)$$

Řešení:

Přenos:

$$\mathrm{G(s)}=\frac{T_1 s}{T_1 s+1}.$$

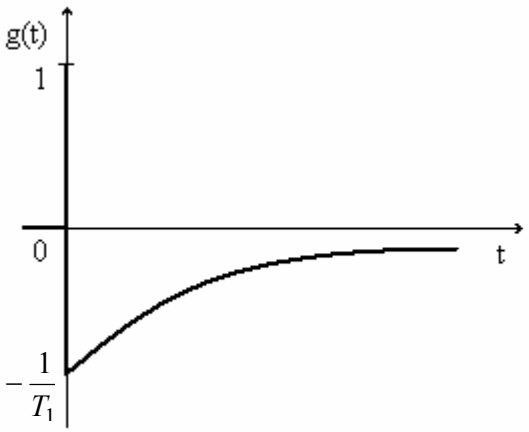
a) Impulsní funkce:

$$g(t) = L^{-1}\{G(s)\} = L^{-1}\left\{\frac{T_1 s}{T_1 s + 1}\right\} = \delta(t) - \frac{1}{T_1} e^{-\frac{1}{T_1}t},$$

$$g(0) = \delta(0) - \frac{1}{T_1},$$

$$g(\infty) = 0.$$

Podle podmínek je systém slabě fyzikálně realizovatelný.



Obrázek 2.25 - Výsledný tvar impulsní charakteristiky.

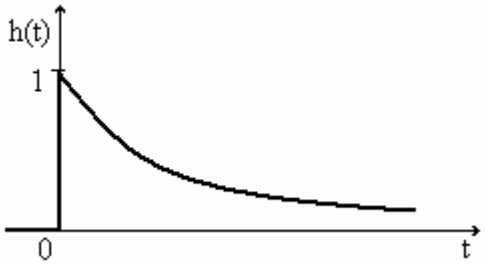
b) Přechodová funkce:

$$h(t) = L^{-1}\left\{\frac{G(s)}{s}\right\} = L^{-1}\left\{\frac{T_1}{T_1 s + 1}\right\} = e^{-\frac{1}{T_1}t},$$

$$h(0) = 1,$$

$$h(\infty) = 0.$$

Podle podmínek je systém slabě fyzikálně realizovatelný.



Obrázek 2.26 - Výsledný tvar přechodové charakteristiky.

c) Kmitočtový přenos:

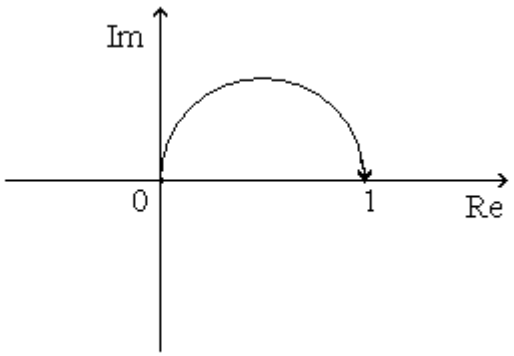
$$G(j\omega) = G(s)\big|_{s=j\omega} = \frac{T_1 j\omega}{T_1 j\omega + 1} \cdot \frac{1 - T_1 j\omega}{1 - T_1 j\omega} = \frac{T_1 j\omega + {T_1}^2 \omega^2}{{T_1}^2 \omega^2 + 1},$$

$$P(\omega) = \frac{{T_1}^2 \omega^2}{{T_1}^2 \omega^2 + 1} = \frac{{T_1}^2}{{T_1}^2 + \frac{1}{\omega^2}},$$

$$Q(\omega) = \frac{T_1 \omega}{T_1^2 \omega^2 + 1}.$$

ω	**0**	∞	**1**
P	0	1	+
Q	0	0	+

Podle podmínek je systém slabě fyzikálně realizovatelný.



Obrázek 2.27 - Výsledný tvar amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky.

Shrnutí pojmů 2.3.

Jsou zde uvedeny způsoby matematického popisu statických a dynamických vlastností spojitých systémů. Jedná se o statickou charakteristiku, obrazový přenos, přechodovou charakteristiku, impulsní charakteristiku, kmitočtovou charakteristiku. Dále jsou popsány převodní vztahy mezi jednotlivými popisy a způsoby měření charakteristik. Na závěr jsou uvedeny řešené příklady z dané problematiky.

Otázky 2.3.

1. Definujte statickou charakteristiku.
2. Kterými charakteristikami lze popsat dynamické vlastnosti systémů?
3. Jak je definován přenos?
4. Co je to Diracův impuls?
5. Čím se nahradí komplexní proměnná *s* ve vzorci pro kmitočtový přenos?

2.4. Logaritmické kmitočtové charakteristiky

Čas ke studiu: 1,5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat logaritmické charakteristiky, logaritmickou amplitudu.
- popsat logaritmické charakteristiky základních šesti členů.
- vypočítat logaritmickou amplitudu ze zesílení.

Výklad

Kmitočtové charakteristiky jsou grafickým znázorněním kmitočtového přenosu. Pro vykreslování logaritmických kmitočtových charakteristik LKCH rovnice (2.18) se musí zlogaritmovat:

$$\ln G(j\omega) = \ln A(j\omega) + j\varphi(\omega) = \ln|G(j\omega)| + j\arg G(j\omega). \qquad (2.20)$$

Ve skutečnosti se však využívá dekadického logaritmu pro osu úhlového kmitočtu ω, tj. log ω, a na osu pořadnic amplitudové charakteristiky se vynáší absolutní hodnota kmitočtového přenosu v decibelech, což jsou jednotky definované jako dekadický logaritmus poměru obrazu výstupního signálu násobeného dvaceti, tj.

$$|G(j\omega)|_{\mathrm{dB}} = 20\log|G(j\omega)|. \qquad (2.21)$$

Tabulka 2.2 – Příklady vybraných hodnot amplitudy a logaritmické amplitudy

$A(\omega)$	0,001	0,01	0,1	1	10	100	1000	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\sqrt{2}$
$L(\omega)$[dB]	-60	-40	-20	0	20	40	60	3	-3

Kmitočtové charakteristiky v logaritmických souřadnicích se znázorňují dvěmi charakteristikami: logaritmickou amplitudovou kmitočtovou charakteristikou (LAKCH) $L(\omega)$, logaritmickou fázovou kmitočtovou charakteristikou (LFKCH) $\varphi(\omega)$.

Význam zavedení logaritmických kmitočtových charakteristik (LKCH) spočívá ve zjednodušení vykreslení charakteristik složitých systémů a v jejich jednoduchém sestrojování. [Balátě, J. 2003]

Při vykreslování logaritmických kmitočtových charakteristik je důležité určit rozdělení na základní členy, pro které tyto charakteristiky umíme sestrojit, a dále určit zapojení těchto základních členů. V následujícím textu bude odvozeno sestrojení logaritmických charakteristik pro základní zapojení a základní členy.

LKCH základních zapojení

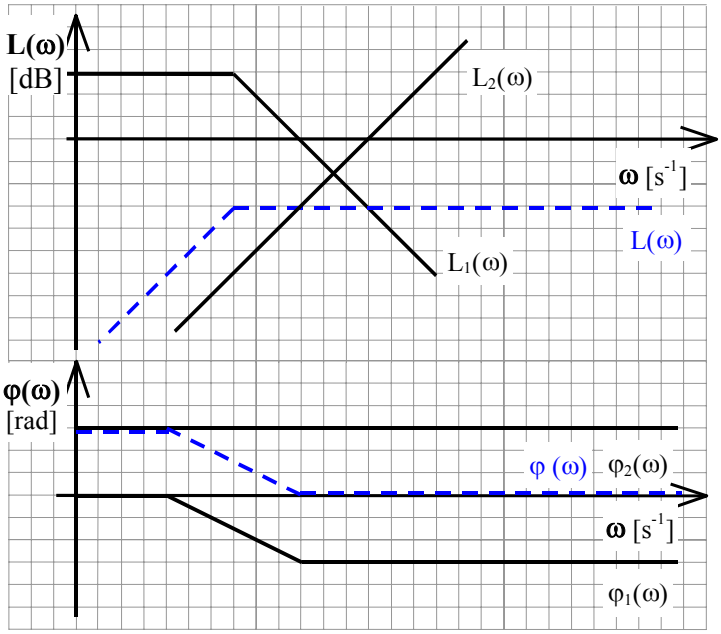
Sériové zapojení

Celkový přenos lineárních dynamických členů zapojených sériově (obrázek 2.75) je dán součinem přenosů jednotlivých členů, viz vztah (2.22). Amplituda a fáze výsledného přenosu se vypočte

$$A(\omega) = A_1(\omega)A_2(\omega) \quad \Rightarrow L(\omega) = L_1(\omega) + L_2(\omega)\,,$$

$$\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega)\,.$$

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že výsledná LKCH je dána součtem LKCH jednotlivých členů (viz obrázek 2.28).



Obrázek 2.28 - LKCH sériově zapojených členů

Paralelní zapojení

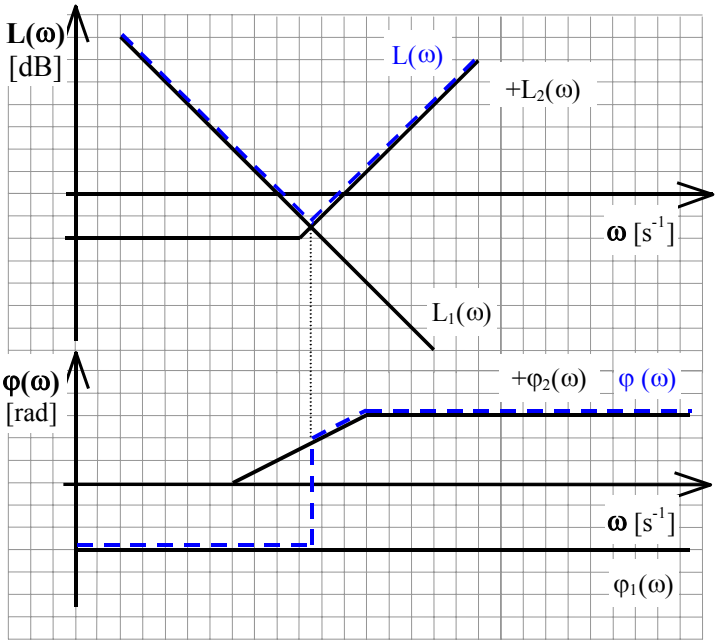
Celkový přenos lineárních dynamických členů zapojených sériově (obrázek 2.76) je dán součtem, resp. rozdílem přenosů jednotlivých členů, viz vztah (2.23). Také kmitočtový přenos je dán součtem, resp. rozdílem kmitočtových přenosů jednotlivých členů. Pokud v obvodu budou zařazeny jen členy s minimální fází (existuje jednoznačné přiřazení mezi LAKCH a LFKCH), stačí jen sestrojit LAKCH a LFKCH bude sestrojena na základě výsledné LAKCH.

Pro konstrukci LAKCH paralelně zapojených členů se uvažuje přibližný kmitočtový přenos

$$G(j\omega) = \begin{cases} G_1(\omega) \text{ pro} & A_1(\omega) >> A_2(\omega) \\ G_2(\omega) \text{ pro} & A_1(\omega) << A_2(\omega) \end{cases},$$

kde $A_1(\omega)$, $A_2(\omega)$ jsou moduly dílčích členů. Pak přibližná výsledná LAKCH je rovna vždy LAKCH členu s větší amplitudou.

$$L(\omega) = \begin{cases} L_1(\omega) \text{ pro} & L_1(\omega) >> L_2(\omega) \\ L_2(\omega) \text{ pro} & L_1(\omega) << L_2(\omega) \end{cases}.$$



Obrázek 2.29 - LKCH paralelního zapojení

Zpětnovazební zapojení

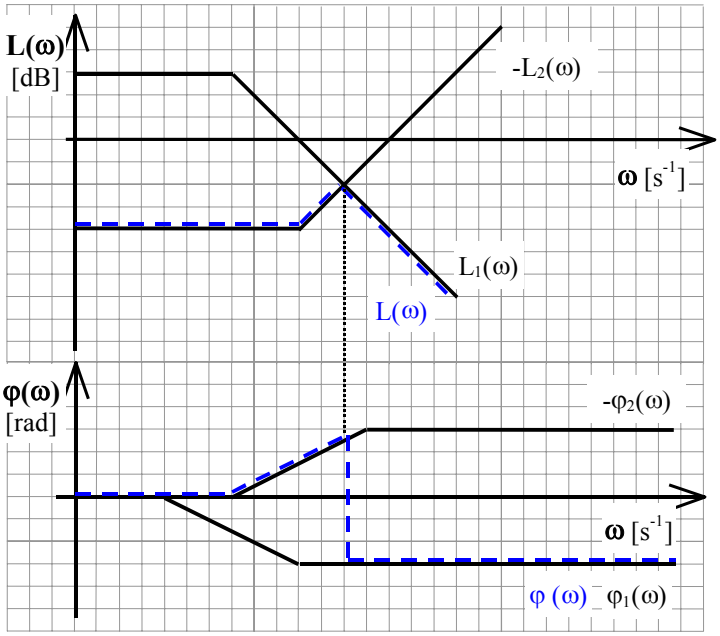
Rovněž u tohoto zapojení (obrázek 2.77) lze sestrojit přibližné LAKCH, za předpokladu, že v obvodu jsou jen dynamické členy s minimální fázi. Přibližný kmitočtový přenos je popsán rovnicí

$$G(j\omega)=\begin{cases} G_1(\omega) & \text{pro} \quad A_1(\omega) << A_2^{-1}(\omega) \\ G_2^{-1}(\omega) & \text{pro} \quad A_1(\omega) >> A_2^{-1}(\omega) \end{cases}.$$

Přibližná výsledná LAKCH zpětnovazebního obvodu je rovna

$$L(\omega)=\begin{cases} L_1(\omega) & \text{pro} \quad L_1(\omega) << -L_2(\omega) \\ -L_2(\omega) & \text{pro} \quad L_1(\omega) >> -L_2(\omega) \end{cases}.$$

Příklad sestrojení LKCH je na obrázku 2.30.



Obrázek 2.30 - LKCH zpětnovazebního zapojení

Inverzní člen

Pokud známe LKCH členu o přenosu $G_1(s)$, pak můžeme snadno sestrojit charakteristiku členu s inverzními dynamickými vlastnostmi, tj. s přenosem

$$G(s) = \frac{1}{G_1(s)}.$$

Kmitočtový přenos má tvar

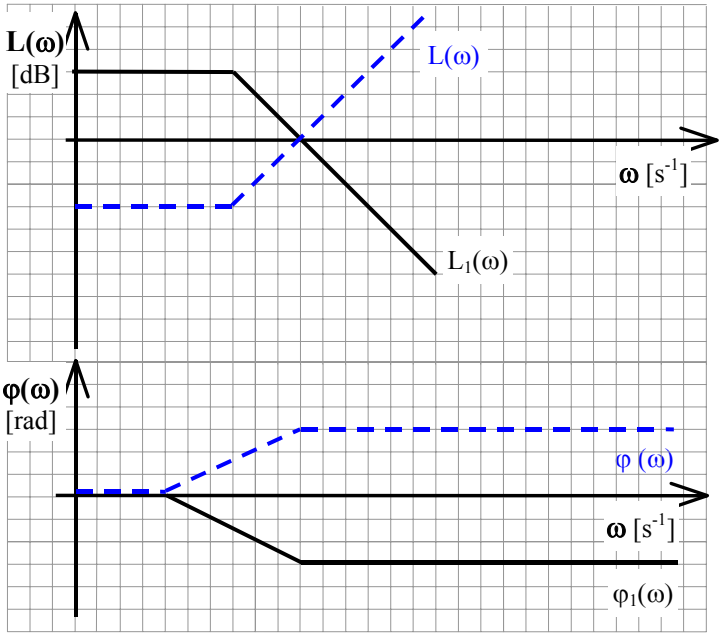
$$G(j\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} = \frac{1}{A_1(\omega)e^{j\varphi_1(\omega)}},$$

pak amplituda a fáze je dána vztahy

$$A(\omega) = \frac{1}{A_1(\omega)} \Rightarrow \qquad L(\omega) = -L_{-1}(\omega) = -20\log A_1(\omega)$$

$$\varphi(\omega) = -\varphi_1(\omega).$$

LKCH členů s inverzními vlastnostmi se liší jen znaménkem, tvar mají stejný, viz. obrázek 2.31.



Obrázek 2.31 - LKCH členů s inverzními vlastnostmi

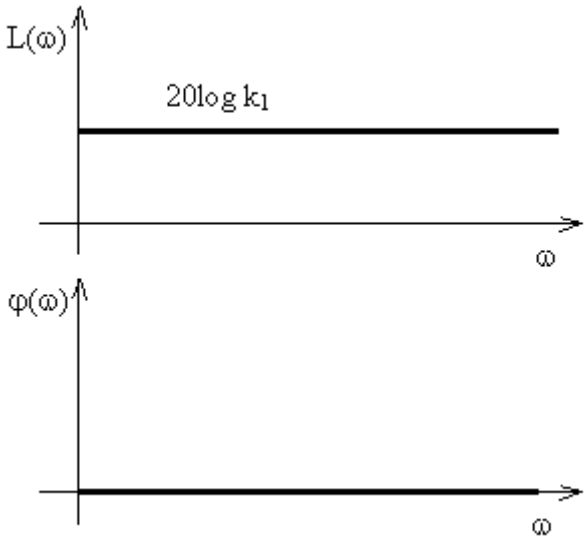
Základní členy přenosu

Ideální proporcionální člen, který lze popsat přenosem $G(s) = k_1$. Modul a fázi vypočteme podle vztahů

$$A(\omega) = k_1 \qquad \Rightarrow L(\omega) = 20 \log k_1 ,$$

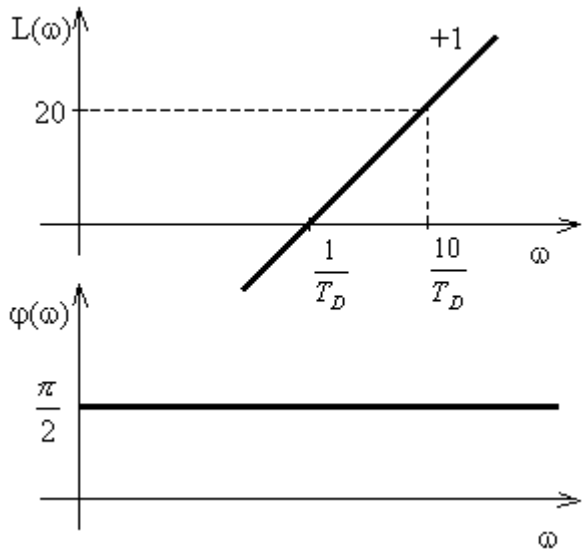
$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} 0 = 0.$$

Průběh LKCH je znázorněn na obrázku 2.32.



Obrázek 2.32 - LKCH pro ideální proporcionální člen

Ideální derivační člen, jehož vlastnosti popisuje přenos $G(s) = T_1 s$.



Obrázek 2.33 - LKCH kmitočtové charakteristiky pro ideální derivační člen

Vypočteme modul a fázi členu s kmitočtovým přenosem

$G(j\omega) = T_1 j\omega$. Pak

$P(\omega) = 0, Q(\omega) = T_1\omega$

proto

$A(\omega) = T_1\omega \quad \Rightarrow \quad L(\omega) = 20 \log T_1\omega$,

$\varphi(\omega) = \text{arctg}\,\frac{T_1\omega}{0} = \text{arctg}\,\infty = \frac{\pi}{2}$.

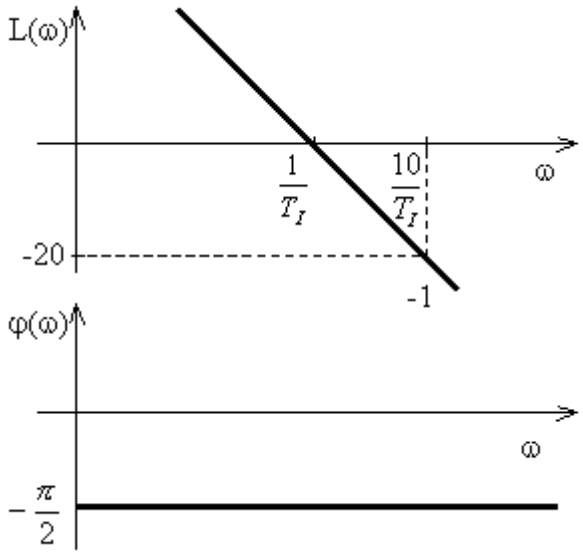
Je vidět, že fáze tohoto členu je konstantní, logaritmická amplituda je přímka protínající osu kmitočtu v $\omega_1 = \frac{1}{T_1}$ se sklonem 20 dB/dek [+1]. Tvar LKCH je na obrázku 2.33.

Ideální integrační člen, který je popsán přenosem $G(s) = \frac{1}{T_1 s}$. Pro výpočet a konstrukci jeho charakteristik použijeme vztahů (2.20), proto můžeme psát

$L(\omega) = -20 \log T_1\omega$,

$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$.

Výsledná LKCH tohoto členu je na obrázku 2.34.



Obrázek 2.34 - LKCH pro ideální integrační člen

Přenos typu $G(s) = T_1 s + 1$. Kmitočtový přenos, jeho reálná a imaginární část jsou popsány vztahy

$$G(j\omega) = 1 + T_1 j\omega \qquad \Rightarrow \qquad P(\omega) = 1, Q(\omega) = T_1\omega.$$

Proto modul a fáze jsou

$$L(\omega) = 20\log\sqrt{T_1^2\omega^2 + 1},$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg}\,\frac{T_1^2\omega^2}{1}$$

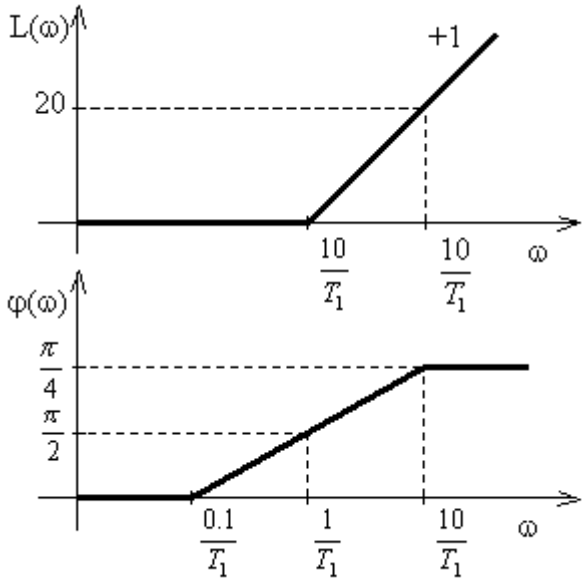
Pro LKCH platí následující vztahy:

$\omega << \frac{1}{T_1}$: $L(\omega) = 20\log 1 = 0$, $\varphi(\omega) = \text{arctg}0 = 0$

$\omega = \frac{1}{T_1}$: $L(\omega) = 20\log\sqrt{2} = 3 \approx 0$, $\varphi(\omega) = \text{arctg}1 = \frac{\pi}{4}$

$\omega >> \frac{1}{T_1}$: $L(\omega) = 20\log T_1\omega$, $\varphi(\omega) = \text{arctg}T_1\omega = \frac{\pi}{2}$

Pro jednoduchost se konstruuje LKCH tak, že se sestrojí pouze její asymptoty, viz obrázek 2.35. Toto přiblížení je poměrně přesné, pouze při kmitočtu zlomu $\omega_1 = \frac{1}{T_1}$ je odchylka od skutečného průběhu LAKCH největší a je 3 dB. Rovněž LFKCH se nesestrojuje přesná, ale při její konstrukci se používá aproximace sečnou.



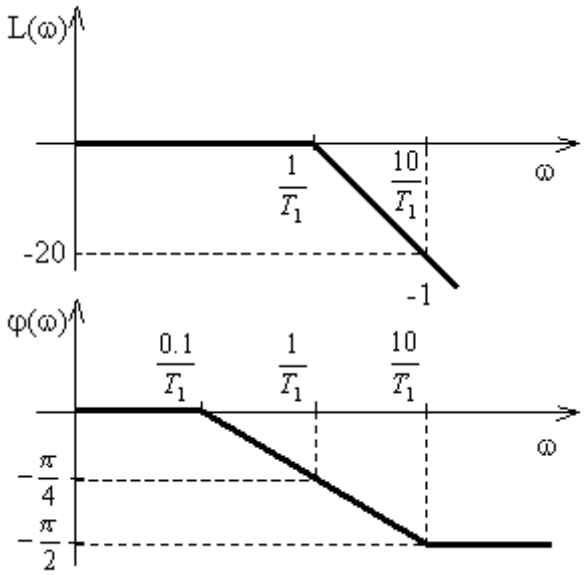
Obrázek 2.35 - LKCH pro přenos $G(s) = T_1 s + 1$

Proporcionální člen se setrvačností 1. řádu, který je popsán přenosem $G(s) = \dfrac{1}{T_1 s + 1}$. Pro určení LKCH opět použijeme vztahy (2.20), takže pro amplitudu a fázi dostaneme rovnice

$$L(\omega) = -20 \log \sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1},$$

$$\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg} \frac{T_1^2 \omega^2}{1}.$$

Odpovídající charakteristiky jsou na obrázku 2.36.



Obrázek 2.36 - LKCH pro proporcionální člen se setrvačností 1. řádu

Proporcionální člen se setrvačností 2. řádu, který je popsán přenosem ve tvaru $G(s) = \frac{1}{(T_0 s)^2 + 2\xi T_0 s + 1}$. Jde o případ, kdy jmenovatel přenosu $G(s)$ obsahuje kvadratický trojčlen s komplexně sdruženými kořeny. Amplituda a fáze tohoto členu se vypočte podle vztahů

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(1 - T_0^2\omega^2)^2 + 4T_0^2\xi_0^2\omega^2}} \Rightarrow L(\omega) = -20\log\sqrt{(1 - T_0^2\omega^2)^2 + 4T_0^2\xi_0^2\omega^2},$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\frac{2T_0\xi\omega}{1 - T_0^2\omega^2}.$$

Pro LKCH platí následující vztahy:

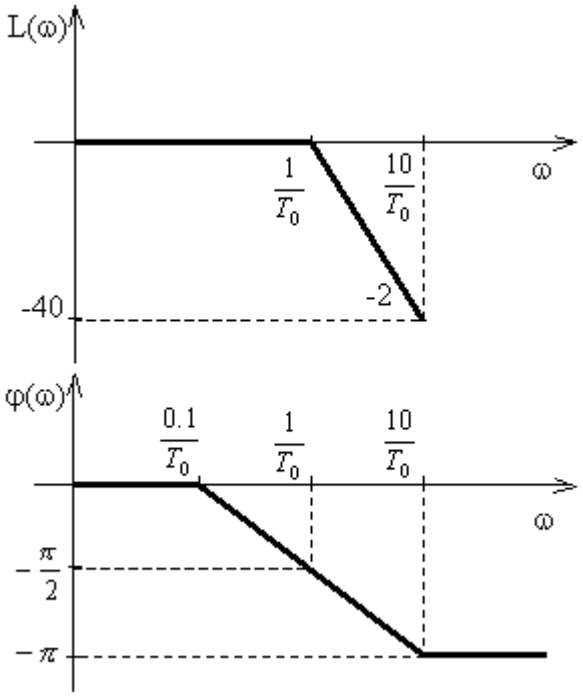
$\omega << \frac{1}{T_0}$: $L(\omega) = -20\log 1 = 0$, $\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg}0 = 0$,

$\omega = \frac{1}{T_0}$: $L(\omega) = -20\log 2\xi$, $\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg}\infty = -\frac{\pi}{2}$,

$\omega >> \frac{1}{T_0}$: $L(\omega) = -20\log T_0^2\omega^2 = -40\log T_0^2\omega^2$, $\varphi(\omega) = -\operatorname{arctg}0 = -\pi$.

Z vypočtených hodnot vidíme, že asymptota LAKCH bude mít pro $\omega << \frac{1}{T_0}$ sklon 0 dB/dek, v bodě $\omega = \frac{1}{T_0}$ dojde ke zlomu a dále bude asymptota klesat se sklonem –40 dB/dek [-2]. Ve zlomovém kmitočtu bude velikost chyby od skutečného průběhu záviset na hodnotě

poměrného tlumení ξ, její maximální hodnota je pro $\xi = 1$ a má hodnotu 6 dB. Pro konstrukci LFKCH se opět použila aproximace sečnou. Tvar LKCH je vidět na obrázku 2.37. [VÍTEČKOVÁ&POLÁKOVÁ 1989]



Obrázek 2.37 - LKCH pro kmitavý člen

Příklad 2.10. *Logaritmické kmitočtové charakteristiky*

Nakreslete logaritmické kmitočtové charakteristiky pro systém popsaný obrazovým přenosem $G(s) = \dfrac{100(s+1)}{(s+10)(s^3+s^2+100s)}$

Řešení:

Zadaný přenos musíme rozdělit na základní členy, jejichž logaritmické kmitočtové charakteristiky umíme sestrojit. V našem případě přenos můžeme rozdělit na 4 členy, které musíme upravit tak, aby absolutní člen se rovnal 1.

$$G(s) = \frac{100(s+1)}{10\left(\frac{s}{10}+1\right)100s\left(\frac{s^2}{100}+\frac{s}{100}+1\right)} = \frac{1}{10s}\cdot(s+1)\cdot\frac{1}{\frac{s}{10}+1}\cdot\frac{1}{\frac{1}{10^2}s^2+2\cdot\frac{1}{10}\cdot\frac{1}{20}\cdot s+1}$$

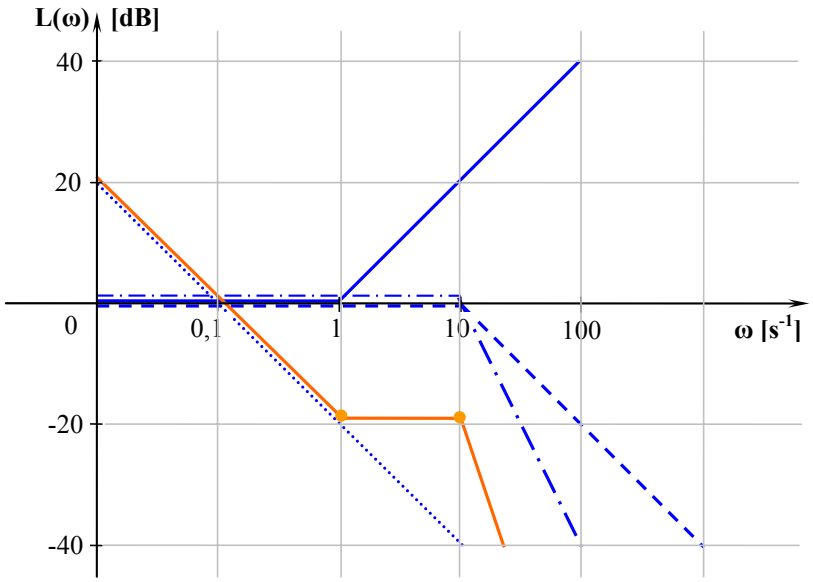
Určení rozsahu kmitočtu pro dílčí členy:

$$G_1(s) = \frac{1}{10s} \quad \rightarrow \quad \omega \in <0{,}01;1>$$

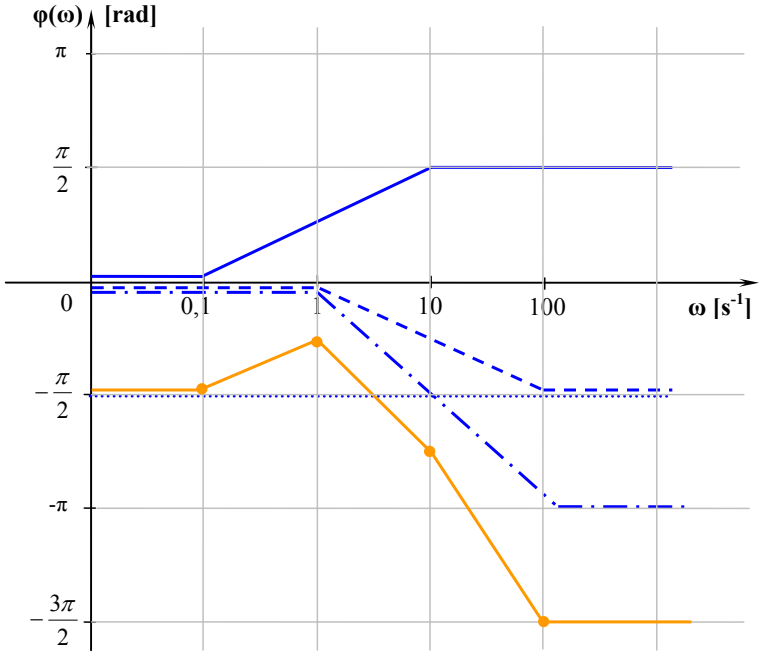
$$G_2(s) = s+1 \quad \rightarrow \quad \omega \in <0{,}1;10>$$

$$G_3(s) = \frac{1}{\frac{s}{10}+1} \qquad \rightarrow \qquad \omega \in <1;100>$$

$$G_4(s) = \frac{1}{\frac{1}{10^2}s^2 + 2\cdot\frac{1}{10}\cdot\frac{1}{20}\cdot s + 1} \qquad \rightarrow \qquad \omega \in <1;100>$$



a.)



b.)

Obrázek 2.38 - Aproximované logaritmické kmitočtové charakteristiky
a.) amplitudová, b.) fázová

Výsledné logaritmické kmitočtové charakteristiky jsou vidět na obrázku 2.38, modrou čárou jsou vykresleny dílčí členy a žlutá čáre je výsledná charakteristika, která vznikla součtem dílčích charakteristik (jedná se o sériové zapojení dílčích členů).

Shrnutí pojmů 2.4.

Kapitola definuje logaritmické kmitočtové charakteristiky a pravidla pro jejich vykreslování. Na konci je uveden přiklad vykreslení těchto charakteristik.

Otázky 2.4.

1. V jakých hodnotách se počítá s reálným kmitočtem?
2. Kolik dB odpovídá zesílení 10?
3. Jak se vykreslí LKCH pro systémy v sériovém zapojení?

2.5. Základní rozdělení spojitých dynamických členů

Čas ke studiu: 2 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

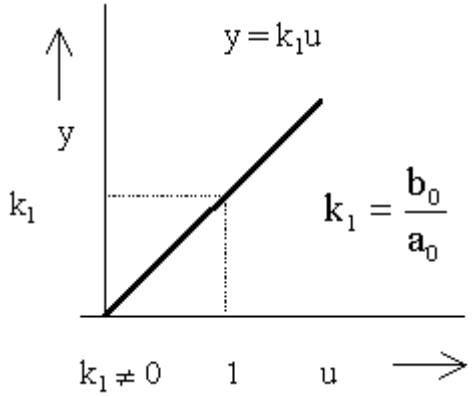
- definovat tři základní typy systémů – proporcionální, integrační, derivační – dle statické charakteristiky, přenosu, přechodové charakteristiky, amplitudo.fázové kmitočtové charakteristiky.
- definovat dopravní zpoždění a způsoby jeho aproximace.
- popsat minimálně přenos a dynamické charakteristiky pro první dva základní systémy každého typu.
- uvést reálné systémy patřící ke každému základnímu typu.

Výklad

Spojité dynamické systémy lze rozdělit na tři základní typy a to: proporcionální, derivační a integrační. V následující kapitole si ukážeme, jak lze jednotlivé typy poznat podle statické charakteristiky, obrazového přenosu, přechodové charakteristiky a amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky.

Proporcionální systémy

Statická charakteristika - existuje a je nenulová.

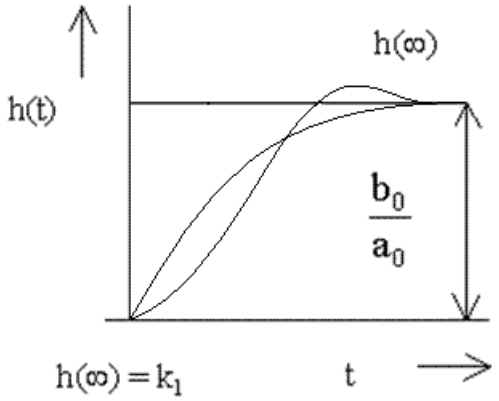


Obrázek 2.39 - Statická charakteristika.

Obrazový přenos – nelze vytknout proměnnou *s*.

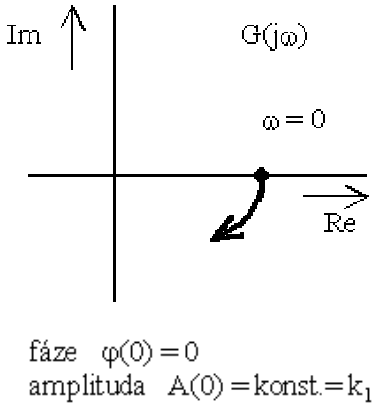
$$G(s) = \frac{b_m s^m + ... + b_1 s + b_0}{a_n s^n + ... + a_1 s + a_0}.$$

Přechodová charakteristika – ustálí se na nenulové hodnotě.



Obrázek 2.40 - Přechodová charakteristika.

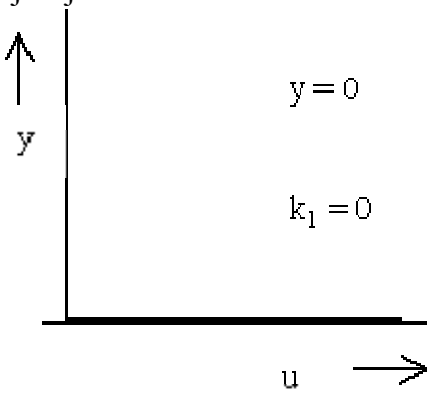
Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika – začíná na kladné reálné poloose a jde do 4-tého kvadrantu.



Obrázek 2.41 - Amplitudo fázová kmitočtová charakteristika.

- **Derivační systémy**

Statická charakteristika – existuje a je nulová.

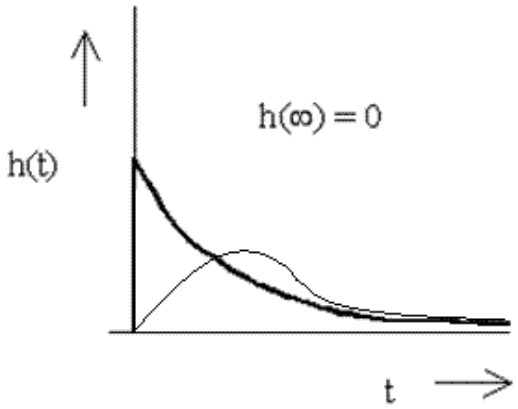


Obrázek 2.42 - Statická charakteristika.

Obrazový přenos – lze vytknout *s* v čitateli.

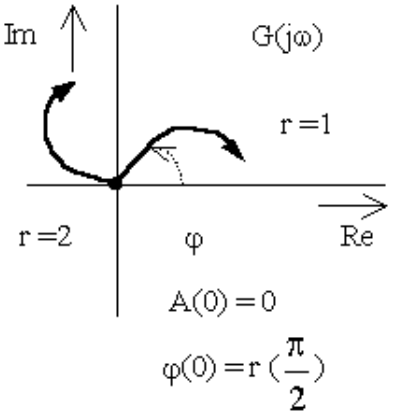
$$G(s) = \frac{s^r (b_m s^m + ... + b_1 s + b_0)}{a_n s^n + ... + a_1 s + a_0}.$$

Přechodová charakteristika – ustálí se na nule.



Obrázek 2.43 - Přechodová charakteristika.

Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika – začíná v nule.



Obrázek 2.44 - Amplitudo fázová kmitočtová charakteristika.

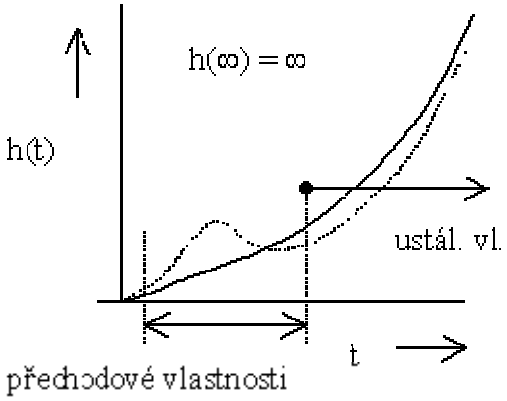
- **Integrační systémy**

Statická charakteristika – NEEXISTUJE.
$k_1 = \infty$

Obrazový přenos – proměnnou *s* lze vytknout ve jmenovateli; *q* je stupeň astatismu (mocnina vytknutého *s*).

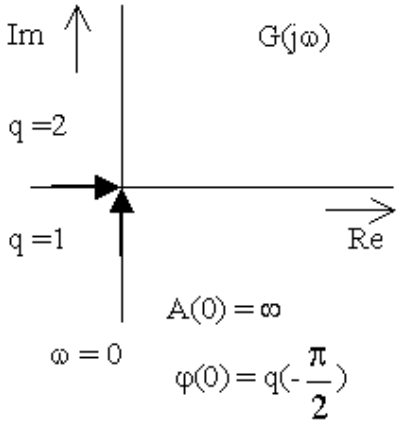
$$G(s) = \frac{b_m s^m + ... + b_1 s + b_0}{s^q (a_n s^n + ... + a_1 s + a_0)}.$$

Přechodová charakteristika – neustálí se.



Obrázek 2.45 - Přechodová charakteristika.

Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika – začíná v nekonečnu, stupeň astatismu určuje kvadrant.



Obrázek 2.46 - Amplitudo fázová kmitočtová charakteristika.

Nyní si uvedeme základní členy jednotlivých typů systémů, včetně tvaru přenosu, charakteristik a příklady reálných systémů.

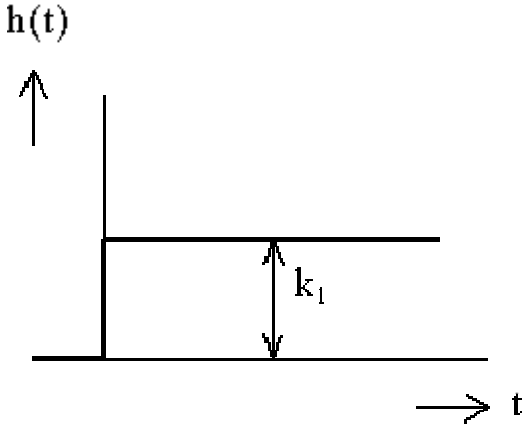
- **Proporcionální systémy**

Ideální proporcionální systém

Obrazový přenos:

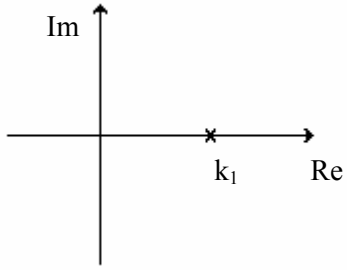
$G(s) = k_1$ k_1 – zesílení přenosu.

Přechodová charakteristika:



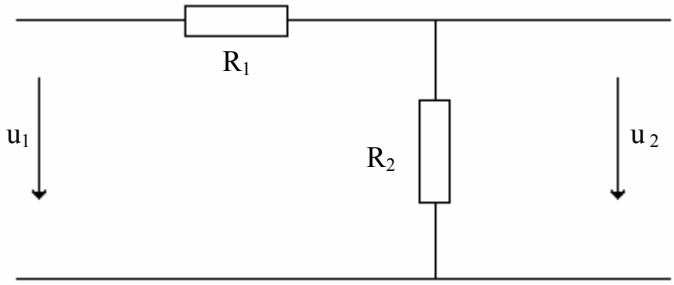
Obrázek 2.47 - Přechodová charakteristika ideálního proporcionálního členu.

Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika:



Obrázek 2.48 - Kmitočtová charakteristika ideálního proporcionálního členu.

Příklad: páka, dělič napětí s odpory, …

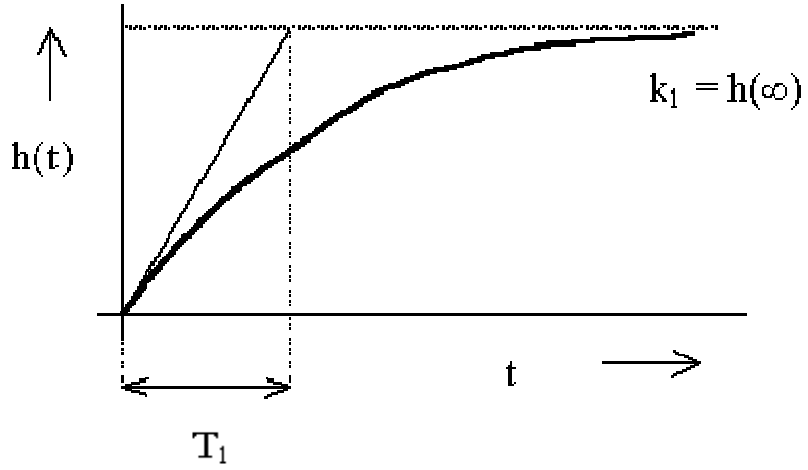


Obrázek 2.49 – Příklad ideálního proporcionálního členu.

Proporcionální systém se setrvačností 1. řádu (setrvačný článek)
Obrazový přenos:

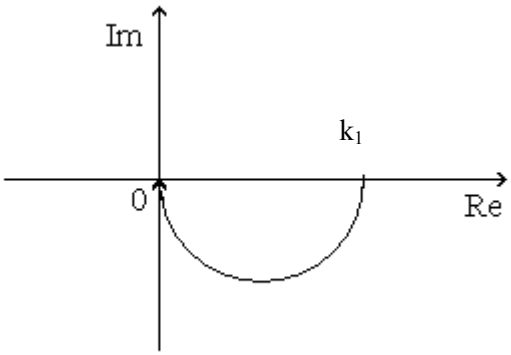
$$G(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1}.$$

Přechodová charakteristika:
$t = T_1. \rightarrow .h(t) = 63{,}2\%$ ustálené hodnoty,
$t = 3T_1 \rightarrow h(t) = 95\%$ ustálené hodnoty,
$t = 4T_1 \rightarrow h(t) = 98\%$ ustálené hodnoty.

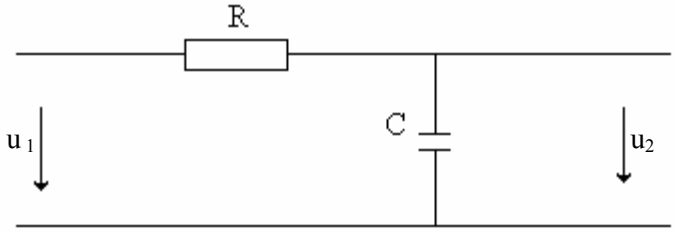


Obrázek 2.50 - Přechodová charakteristika proporcionálního členu se setrvačností 1. řádu.

Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika: nepřekročí IV kvadrant



Obrázek 2.51 - Kmitočtová charakteristika proporcionálního členu se setrvačností 1. řádu.
Příklad: nádrž s volným odtokem, dělič napětí s odporem a kondenzátorem, …



Obrázek 2.52 – Příklad proporcionálního členu se setrvačností 1. řádu.

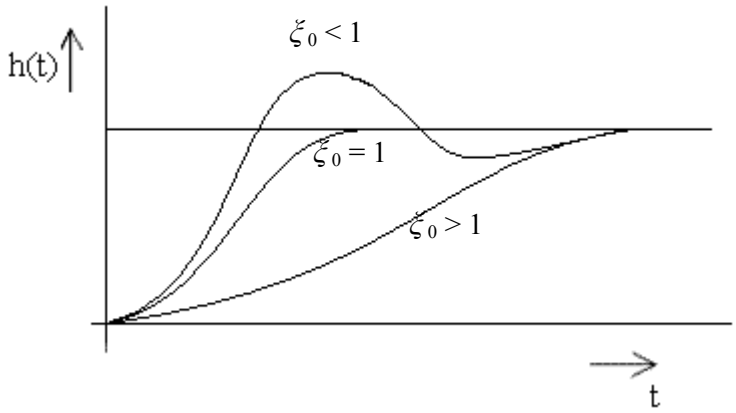
Proporcionální systém se setrvačností 2. řádu (kmitavý článek)

Obrazový přenos:

$$G(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)^2} = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} = \frac{k_1}{T_0^2 s^2 + 2T_0 \xi_0 s + 1}.$$

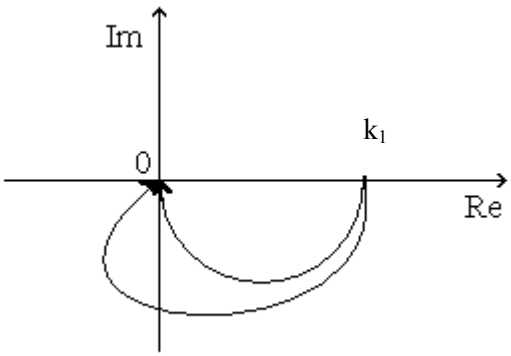
Přechodová charakteristika:
- podle koeficientu poměrného tlumení ξ_0 dělíme proporcionální členy se setrvačností 2. řádu.
$\xi_0 > 1$ aperiodický

$\xi_0 = 1$ mezní aperiodický
$0 \leq \xi_0 < 1$ kmitavý



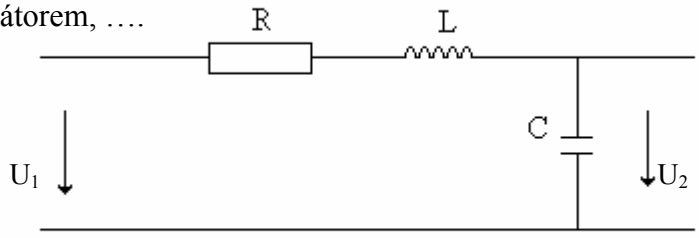
Obrázek 2.53 - Přechodová charakteristika proporcionálního členu se setrvačností 2. řádu.

Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika:



Obrázek 2.54 - Kmitočtová charakteristika proporcionálního členu se setrvačností 2. řádu.

Příklad: hmota na pružině a tlumiči, dvě nádrže s volným odtokem, dělič napětí s odporem, cívkou a kondenzátorem, ….



Obrázek 2.55 – Příklad proporcionálního členu se setrvačností 2. řádu.

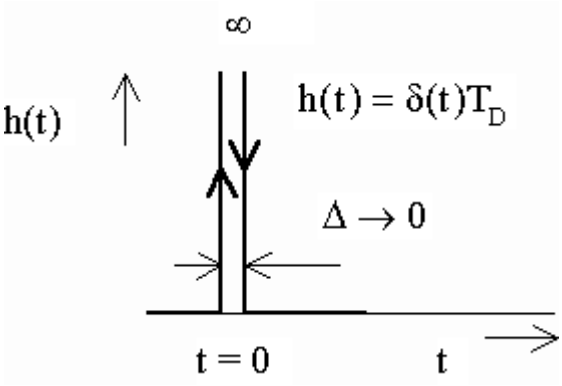
❑ Derivační systémy

Ideální derivační systém

Obrazový přenos:

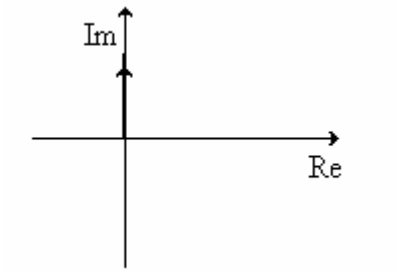
$G(s) = T_D s$ T_D - derivační časová konstanta.

Přechodová charakteristika:



Obrázek 2.56 - Přechodová charakteristika ideálního derivačního členu.

Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika:



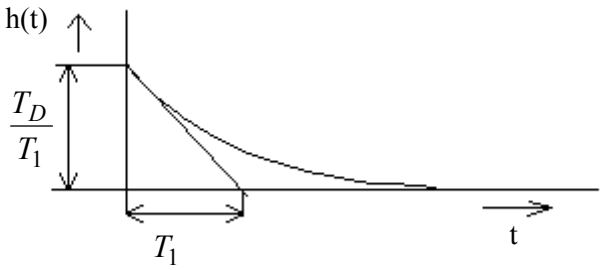
Obrázek 2.57 - Kmitočtová charakteristika ideálního členu.

Derivační systém se setrvačností 1. řádu

Obrazový přenos:

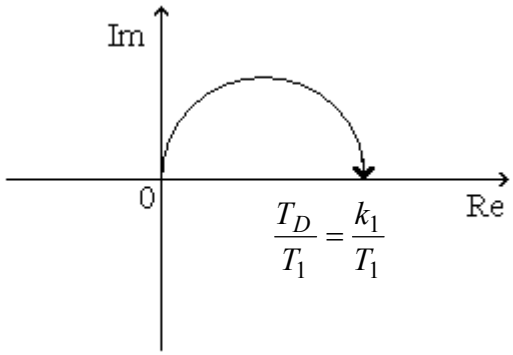
$$G(s) = \frac{T_D s}{T_1 s + 1} = \frac{k_1 s}{T_1 s + 1}.$$

Přechodová charakteristika:



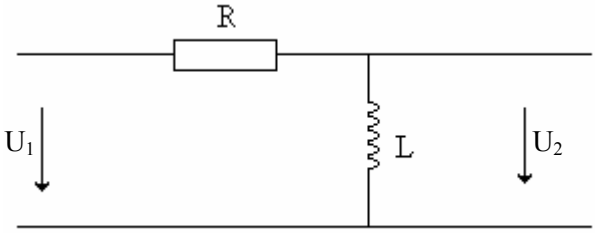
Obrázek 2.58 - Přechodová charakteristika derivačního členu se setrvačností 1. řádu.

Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika:



Obrázek 2.59 - Kmitočtová charakteristika derivačního členu se setrvačností 1. řádu.

Příklad: dělič napětí s odporem a cívkou, …



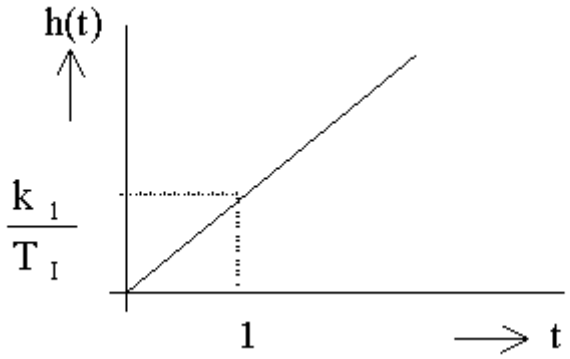
Obrázek 2.60 – Příklad derivačního členu se setrvačností 1. řádu.

❑ Integrační systém

Ideální integrační systém (integrátor)
Obrazový přenos:

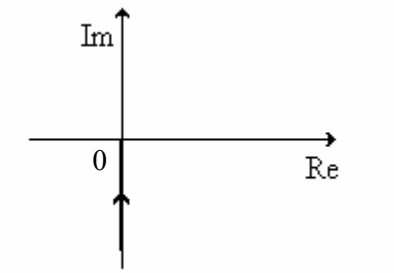
$$G(s) = \frac{1}{T_I s} = \frac{k_1}{s} \qquad T_I \text{ - integrační časová konstanta.}$$

Přechodová charakteristika:



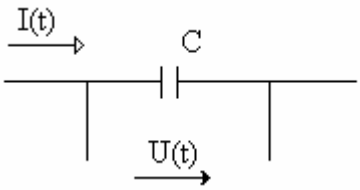
Obrázek 2.61 - Přechodová charakteristika ideálního integračního členu.

Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika:



Obrázek 2.62 - Kmitočtová charakteristika ideálního integračního členu.

Příklad: kondenzátor, nádrž bez odtoku, …



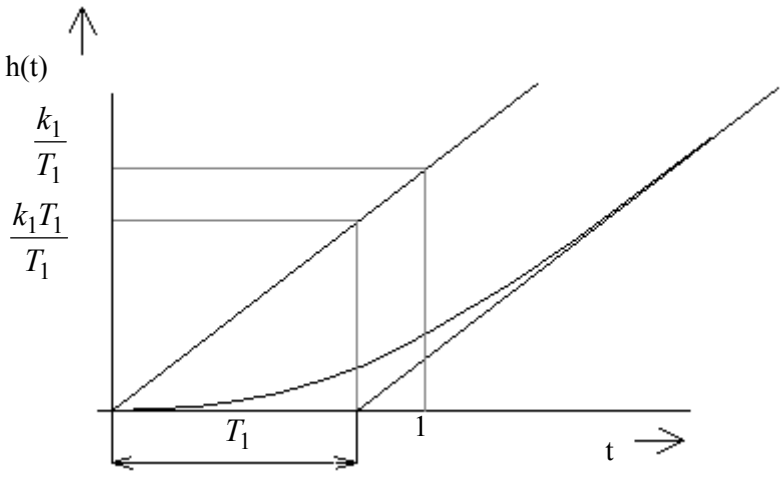
Obrázek 2.63 – Příklad ideálního integračního členu.

Integrační systém se setrvačností 1. řádu

Obrazový přenos:

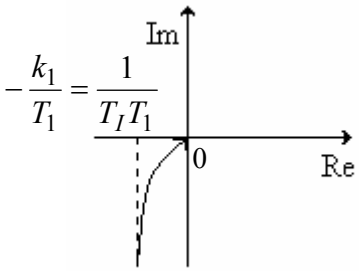
$$G(s) = \frac{1}{T_I s(T_1 s + 1)} = \frac{k_1}{s(T_1 s + 1)}.$$

Přechodová charakteristika:



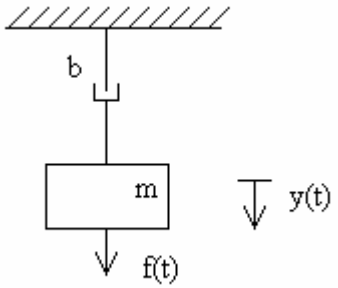
Obrázek 2.64 - Přechodová charakteristika integračního členu se setrvačností 1. řádu.

Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika:



Obrázek 2.65 - Kmitočtová charakteristika integračního členu se setrvačností 1. řádu.

Příklad: hmota na tlumiči, ….



Obrázek 2.66 – Příklad integračního členu se setrvačností 1. řádu.

❑ Dopravní zpoždění

V chování systému, kromě toho že je můžeme dělit na základní typy, lze vysledovat vlastnost dopravního zpoždění, tzn. že hodnota výstupu je v čase zpožděná; změna se neprojeví okamžitě na výstupu systému. Následující příklad proporcionálního systému se setrvačností 1. řádu ukazuje, jak rozpoznáme vlastnost dopravního zpoždění v diferenciální rovnici, obrazovém přenosu, přechodové charakteristice a amplitudo-fázové kmitočtové charakteristice.

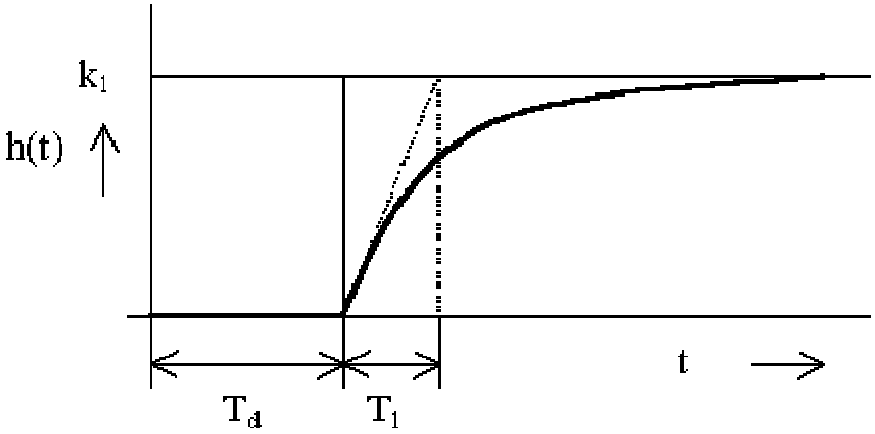
Obrazový přenos:

$$G(s)=\frac{k_1}{1+T_1 s}e^{-sT_d} \qquad T_d \text{ - časová konstanta dopravního zpoždění.}$$

Diferenciální rovnice:

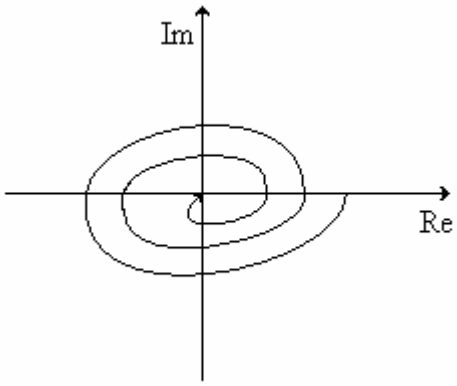
$$T_1\frac{dy}{dt}+y=k_1 u(t-T_D).$$

Přechodová charakteristika:



Obrázek 2.67 - Přechodová charakteristika proporcionálního členu se setrvačností 1. řádu a s dopravním zpožděním.

Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika:



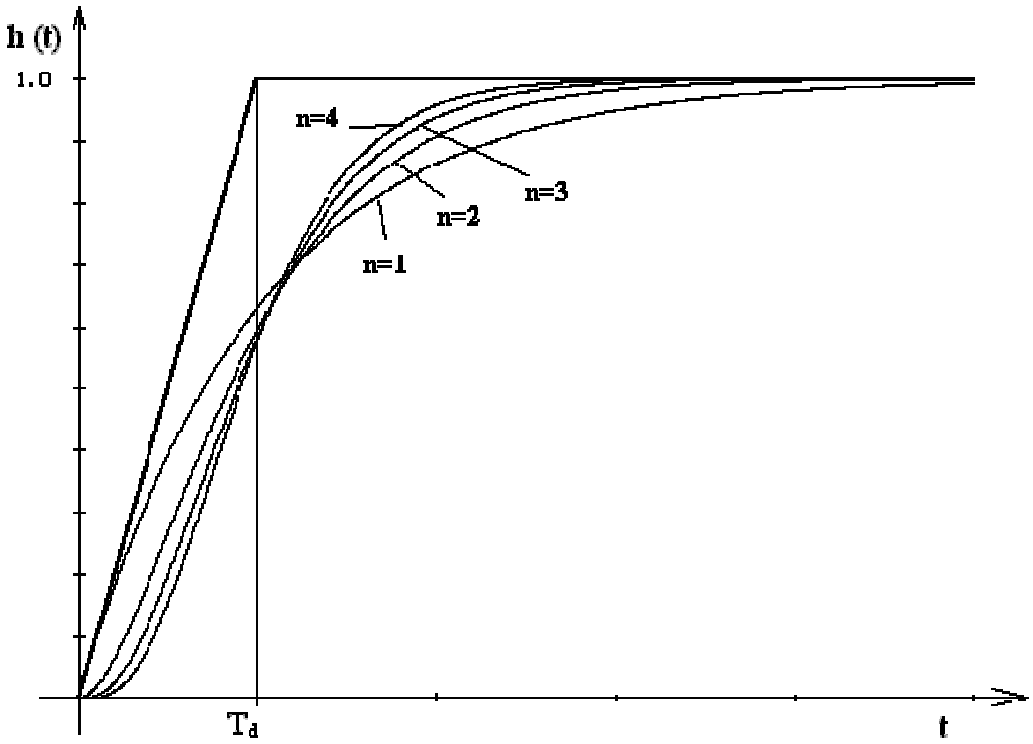
Obrázek 2.68 - Kmitočtová charakteristika proporcionálního členu se setrvačností 1. řádu a s dopravním zpožděním.

Člen dopravního zpoždění v obrazovém přenosu představuje exponenciální výraz $e^{-T_d s}$, v diferenciální rovnicí je to výraz (t-T_d) u vstupní nebo výstupní veličiny. Jak je vidět porovnáním obrázku 2.59 a 2.42, tvar přechodové charakteristiky se nezmění, jen začátek je z nulové hodnoty posunut do hodnoty T_d. Oproti tomu tvar amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky se významně změnil, pro systém s dopravním zpožděním tato charakteristika krouží kolem počátku, takže v kmitočtové oblasti se dopravní zpoždění významně projevuje a to tím, že fáze systému klesá k nekonečné hodnotě, a proto tyto členy označujeme jako *členy s neminimální fází*.

Aproximace dopravního zpoždění

V regulačních obvodech se často vyskytuje člen dopravního zpoždění. Tento člen je buď vlastností regulované soustavy nebo se vyskytne v případě použití číslicového regulátoru. Tím máme vlastnosti regulačního obvodu popsány vztahem, který obsahuje exponenciální funkci a pokud chceme použít metody syntézy regulačních obvodů pro lineární regulační obvody neobsahující dopravní zpoždění, musíme toto dopravní zpoždění aproximovat. Dále jsou uvedeny používané aproximace.

$$e^{-T_d s} \approx \frac{1}{\left(\frac{T_d}{n} s + 1\right)^n}$$ → nahrazujeme zpoždění setrvačností.



Obrázek 2.69 - Aproximace dopravního zpoždění

V praxi se používá $n = 1$, $n = 2$. Čím větší je n, tím je aproximace přesnější. Tato aproximace se vyznačuje jednoduchostí, avšak málo se používá, neboť člen s neminimální fází (člen s dopravním zpožděním) se nahrazuje členem s minimální fází.

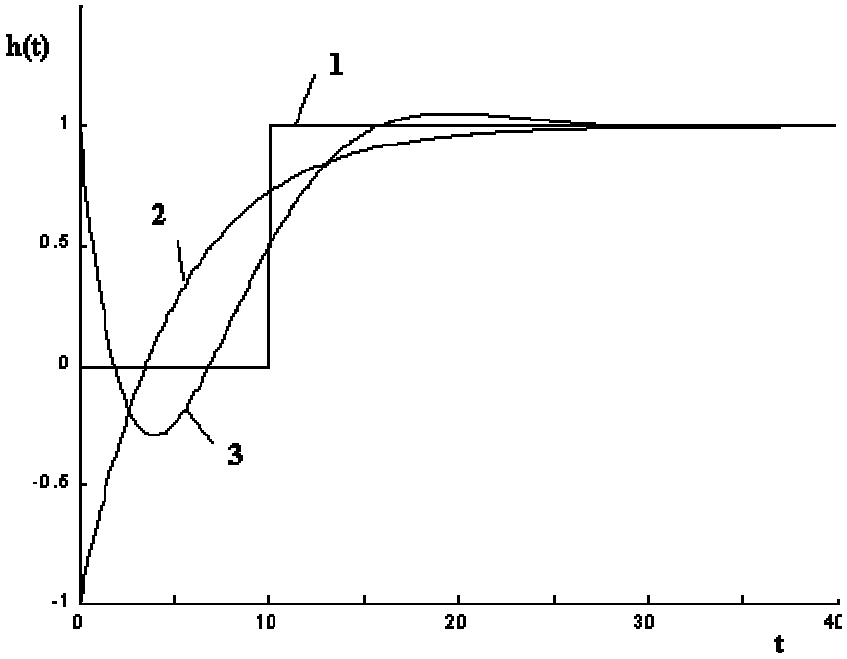
Aproximace Taylorovým rozvojem:

I. řádu.

$$e^{-T_d s} \approx \frac{1-\frac{T_d s}{2}}{1+\frac{T_d s}{2}},$$

II. řádu

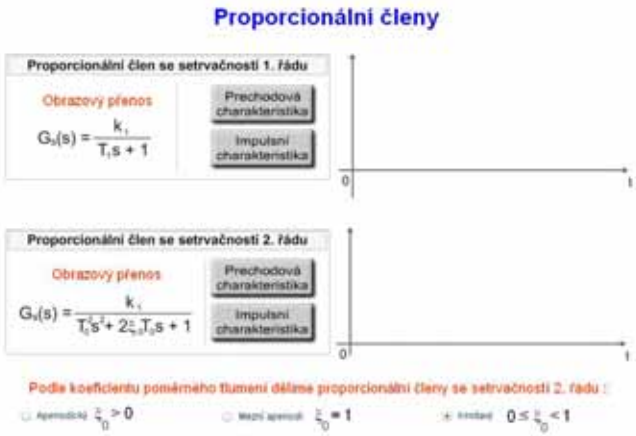
$$e^{-T_d s} \approx \frac{1-\frac{T_d s}{2}+\frac{{T_d}^2 s^2}{8}}{1+\frac{T_d s}{2}+\frac{{T_d}^2 s^2}{8}}.$$



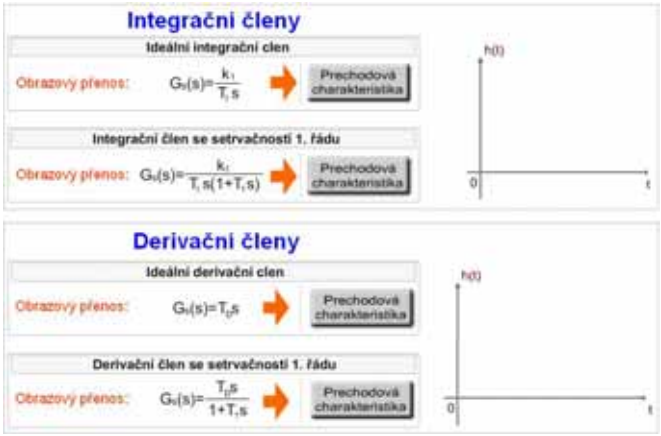
1 – dopravní zpoždění e^{-Td} s, 2 – aproximace Taylorovým rozvojem I. řádu, 3 – aproximace Taylorovým rozvojem II. řádu

Obrázek 2.70 – Aproximace dopravního zpoždění Padého a Taylorovým rozvojem

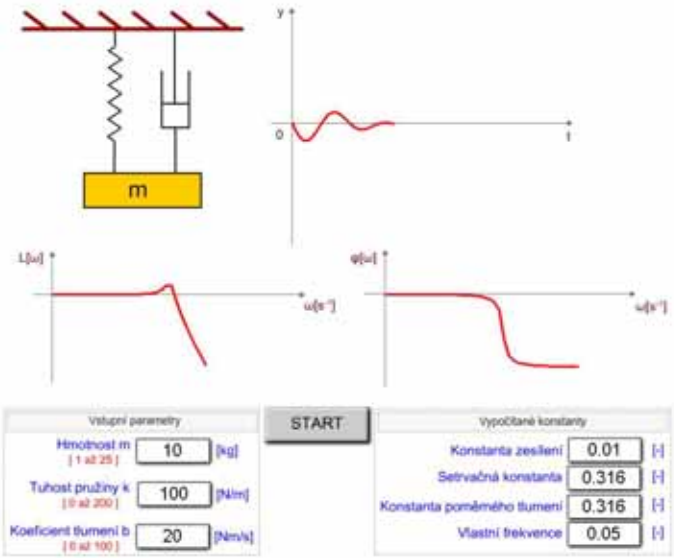
Na následujících obrázcích 2.64 až 2.67 lze spustit animace, které umožňují vykreslovat charakteristiky základních typů systémů nebo animují chování vybraných systémů.



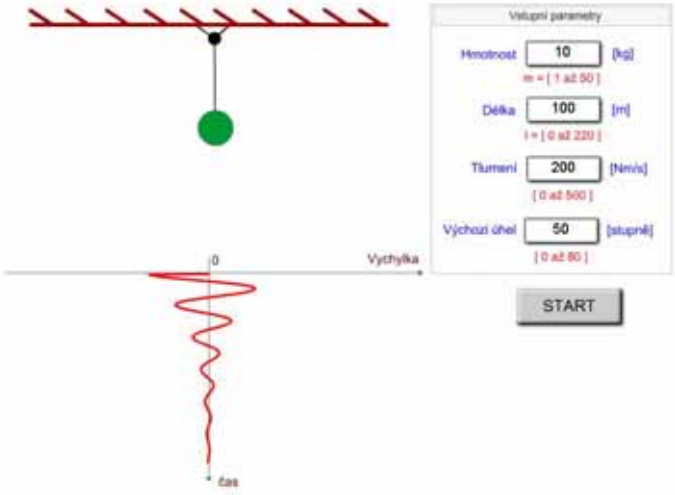
Obrázek 2.71 – Animace chování proporcionálních systémů



Obrázek 2.72 – Animace chování integračních a derivačních systémů



Obrázek 2.73 – Animace chování systému hmota na tlumiči a pružině



Obrázek 2.74 – Animace chování kyvadla

Shrnutí pojmů 2.5.

Definice tří základní typů systémů (proporcionální, integrační, derivační) a jejich určení na základě statické charakteristiky, obrazového přenosu, přechodové charakteristiky a amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky. Pak jsou uvedeny tvary charakteristik pro základní členy a příklady reálných systémů s danými vlastnostmi. Na závěr je vysvětlena vlastnost dopravního zpoždění a jeho vliv na tvar charakteristik.

Otázky 2.5.

1. Jak vypadá přechodová charakteristika setrvačného článku s časovou konstantou T_1?
2. Nakreslete přechodovou charakteristiku integračního článku.
3. Uveďte příklad ideálního derivačního systému.
4. Jaká je ustálená hodnota přechodové charakteristiky pro derivační systémy?
5. V jaké hodnotě začíná amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika proporcionálního systému?
6. Lze vytknout proměnnou s v čitateli přenosu integračních systémů?

2.6. Algebra blokových schémat

Čas ke studiu: 2 hodiny

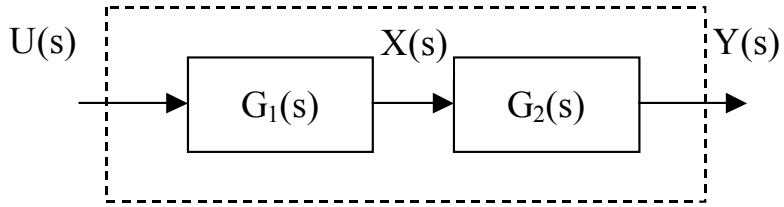
Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat výsledné přenosy základních zapojení systémů, regulační obvod a jeho základní prvky.
- popsat rozdíl mezi spojitým a diskrétním regulačním obvodem.
- vyřešit výsledný přenos libovolně složitého blokového schématu.
- vypočítat základní přenosy regulačního obvodu.

Výklad

Blokovým schématem lze popsat vlastnosti systémů, je to ekvivalentní zápis k rovnicím. Blokové schéma je tvořeno bloky (vlastnosti lze popsat matematickými výrazy, nejčastěji obrazovými přenosy) a šipkami (veličiny). Algebra blokových schémat jsou pravidla, podle nichž vytváříme matematický model systému tvořeným z více bloků. Nejdříve je nutné v blokových schématech určit základní zapojení bloků. Rozlišujeme tři základní zapojení bloků v blokových schématech a to: sériové, paralelní a zpětnovazební (antiparalelní) zapojení. Budeme předpokládat, že vlastnosti systémů jsou popsány obrazovými přenosy.

- **Sériové zapojení**



Obrázek 2.75 - Blokové schéma sériového zapojení

Pro jednotlivé členy platí vztahy:

$$X(s) = G_1(s)U(s)\,;\, Y(s) = G_2(s)X(s)\,.$$

Vztah pro výstupní veličinu odvodíme eliminací proměnné *X(s)*

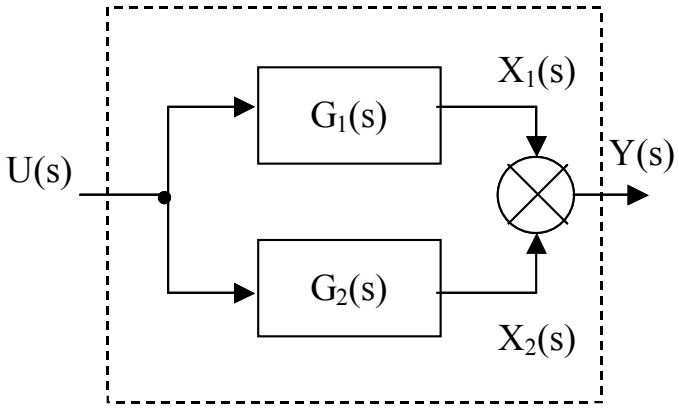
$$Y(s) = G_2(s)\,X(s) = G_1(s)G_2(s)U(s)\,.$$

Je tedy možno sériově zapojené členy nahradit jedním členem s přenosem

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = G_1(s).G_2(s) \qquad (2.22)$$

Při zapojení členů za sebou je výsledný přenos dán součinem přenosů jednotlivých členů.

- **Paralelní zapojení**



Obrázek 2.76 - Blokové schéma paralelního zapojení

Pro jednotlivé členy a pro součtový uzel platí vztahy:

$$X_1(s) = G_1(s)U(s)\,,\, X_2(s) = G_2(s)U(s)\,,.\, Y(s) = X_1(s) + X_2(s)$$

Eliminací $X_1(s)$, $X_2(s)$ vypočítáme výstupní veličinu *Y(s)*

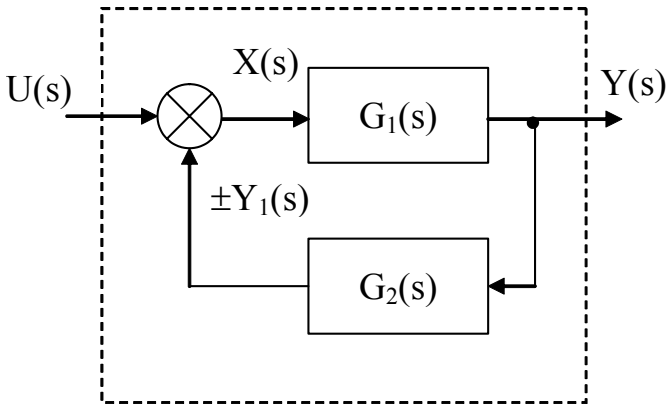
$$Y(s) \;=\; G_1(s)\,U(s) \;+\; G_2(s)\,U(s) = \;\left[G_1(s) \;+\; G_2(s)\right]U(s)\,.$$

Při paralelním zapojení členů je možné je nahradit jedním členem s přenosem

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = G_1(s) + G_2(s)\,. \qquad (2.23)$$

Při paralelním zapojení je výsledný přenos dán součtem (respektive rozdílem) přenosů jednotlivých členů.

❑ Zpětnovazební zapojení (antiparalelní)



Obrázek 2.77 - Blokové schéma zpětnovazebního zapojení

Pro jednotlivé členy a rozdílový uzel platí následující vztahy:

$$Y(s) = G_1(s)X(s)\,, Y_1(s) = G_2(s)Y(s)\,,\ X(s) = U(s) \pm Y_1(s)\,.$$

Eliminací $X(s)$ a $Y_1(s)$ obdržíme vztah pro výstupní veličinu $Y(s)$

$$Y(s) = G_1(s)\,X(s) = \left[U(s) \pm Y_1(s)\right]G_1(s) = [U(s) \pm G_2(s)Y(s)]G_1(s),$$

$$Y(s) \mp G_1(s)G_2(s)Y(s) = G_1(s)U(s)\,.$$

Při zpětnovazebním zapojení je možno takto zapojené členy nahradit jedním členem s přenosem

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{G_1(s)}{1 \mp G_1(s)G_2(s)}\,. \qquad (2.24)$$

Při zpětnovazebním zapojení je výsledný přenos dán zlomkem, kdy v čitateli je tzv. přenos přímé větve a ve jmenovateli $1 \mp$ součin přenosů přímé větve a zpětné vazby:

$$\text{celkový přenos} = \frac{\text{přenos přímé větve}}{1 \mp (\text{přenos přímé větve}).(\text{přenos zpětné vazby})}$$

Znalost blokové algebry umožňuje zjednodušovat složitá bloková schémata a stanovit výsledný přenos zapojení. Zjednodušovat je nejlépe tak, že uvnitř blokového schématu hledáme některé z uvedených základních zapojení a postupně nahazujeme tato zapojení jediným členem.[ŠVARC 1992]

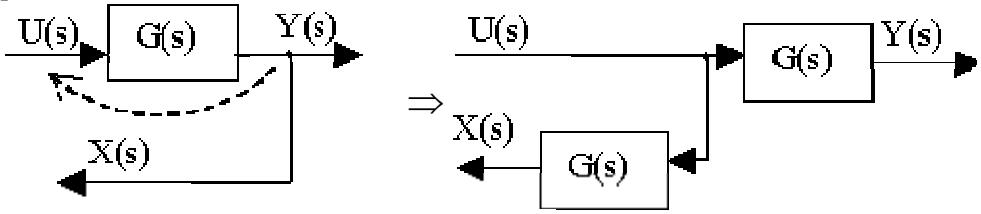
Pravidla pro úpravu blokového schématu

Při zjednodušení blokového schématu se vychází z náhradních přenosů pro základní zapojení (sériové, paralelní, zpětnovazební). Avšak často je nutno upravit blokové schéma,

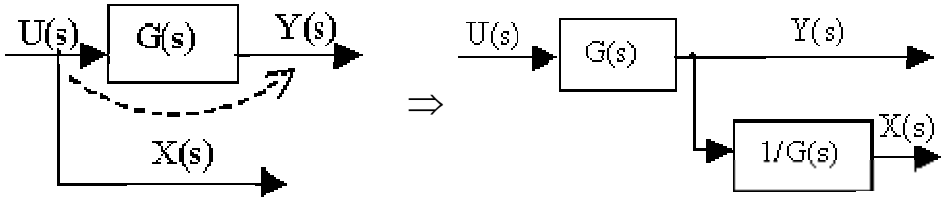
aby byla základní zapojení jednoznačně určena. Při úpravě blokových schémat se využívají dvě základní pravidla, a to:

1. Pravidlo pro přesun uzlu

- před blok

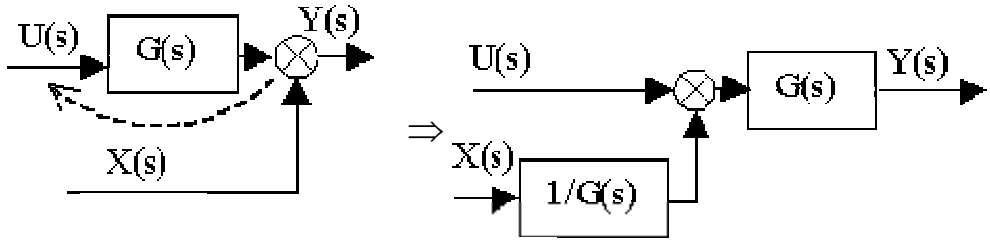


- za blok

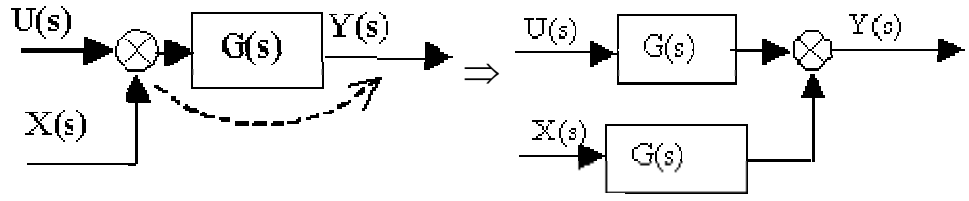


2. Pravidlo pro přesun sumačního členu:

- před blok

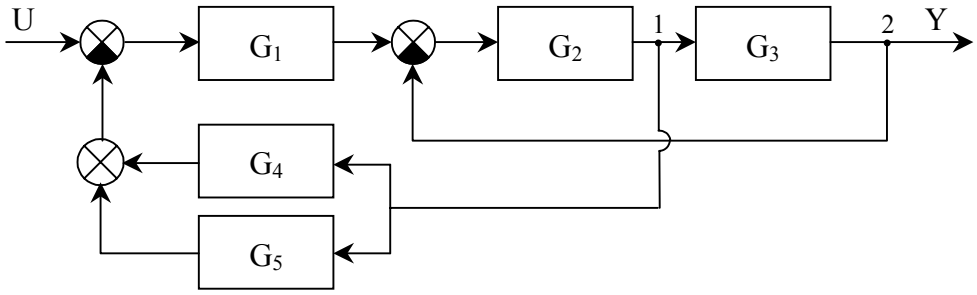


- za blok



Příklad 2.11. *Algebra blokových schémat*

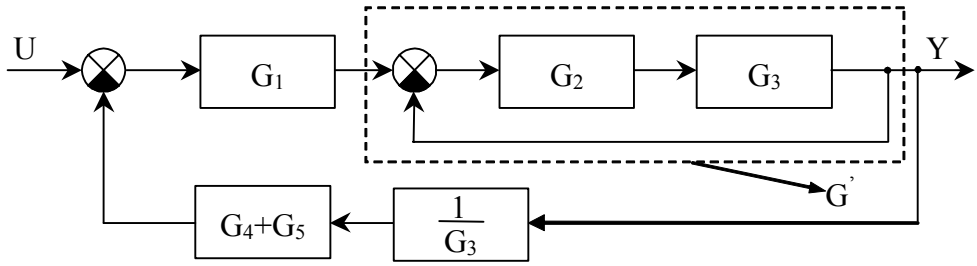
Určete výsledný přenos systému, jehož blokové schéma je na obr. 2.71.



Obrázek 2.78 - Blokové schéma

Řešení:

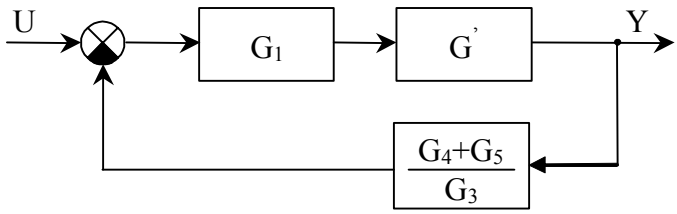
Zadané blokové schéma je tvořeno paralelním (bloky G_4,G_5), sériovým a dvěmi zpětnovazebními zapojeními. Zpětné vazby se nám však kříží, proto budeme muset přesunout uzel (1) za G_3 nebo uzel (2) před G_3. Dostaneme upravené blokové schéma:



Nyní lze vypočítat náhradní přenos G' vnitřního zpětnovazebního zapojení:

$$G' = \frac{G_2 G_3}{1 + G_2 G_3}$$

Pak blokové schéma má tvar

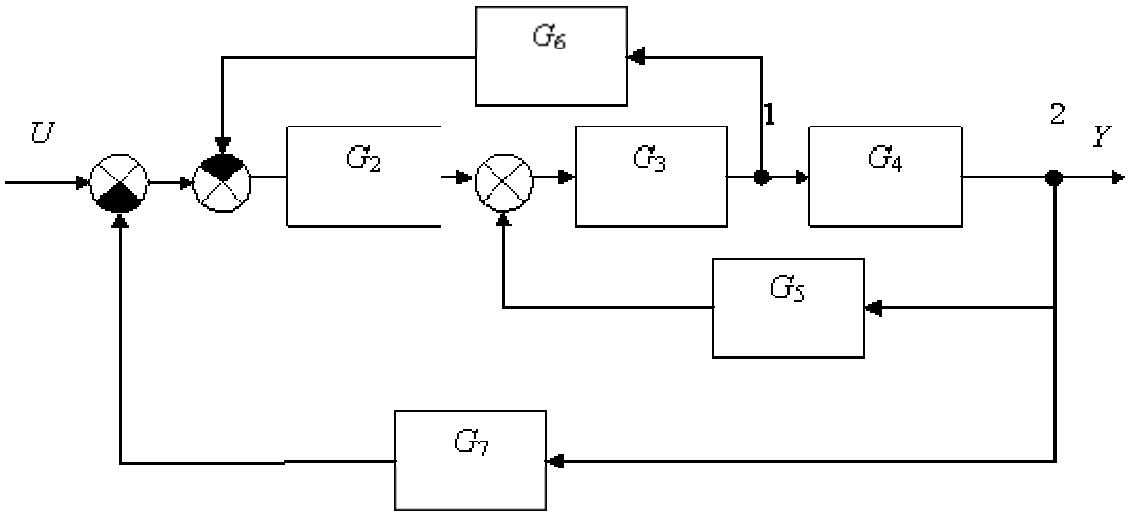


Výsledný přenos systému je:

$$G = \frac{G_1 G'}{1 + G_1 G' (G_4 + G_5)\dfrac{1}{G_3}} = \frac{G_1 G_2 G_3}{1 + G_2 G_3 + G_1 G_2 G_4 + G_1 G_2 G_5}$$

Příklad 2.12. *Algebra blokových schémat*

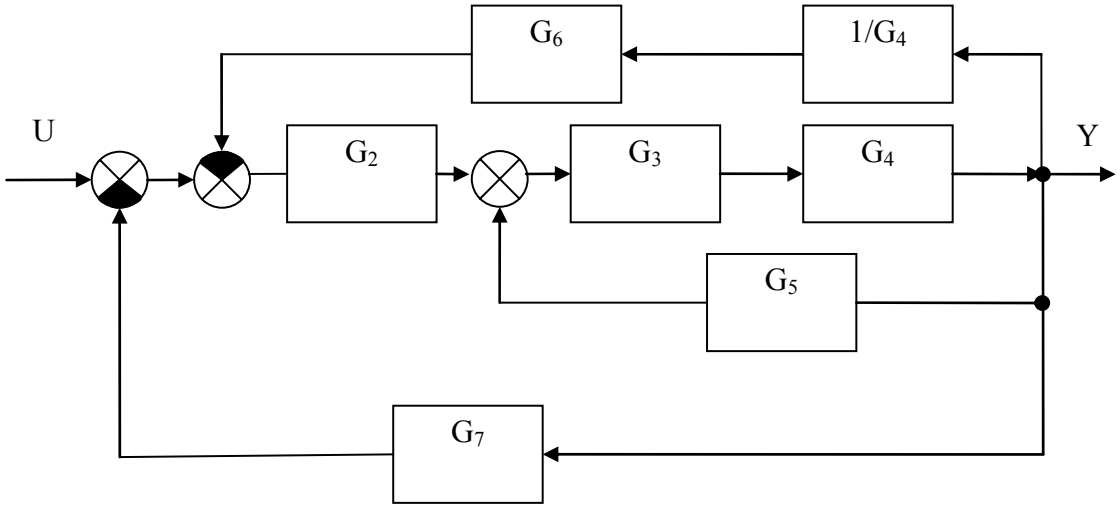
Určete výsledný přenos systému, jehož blokové schéma je na obr. 2.8.



Obrázek 2.79 - Blokové schéma

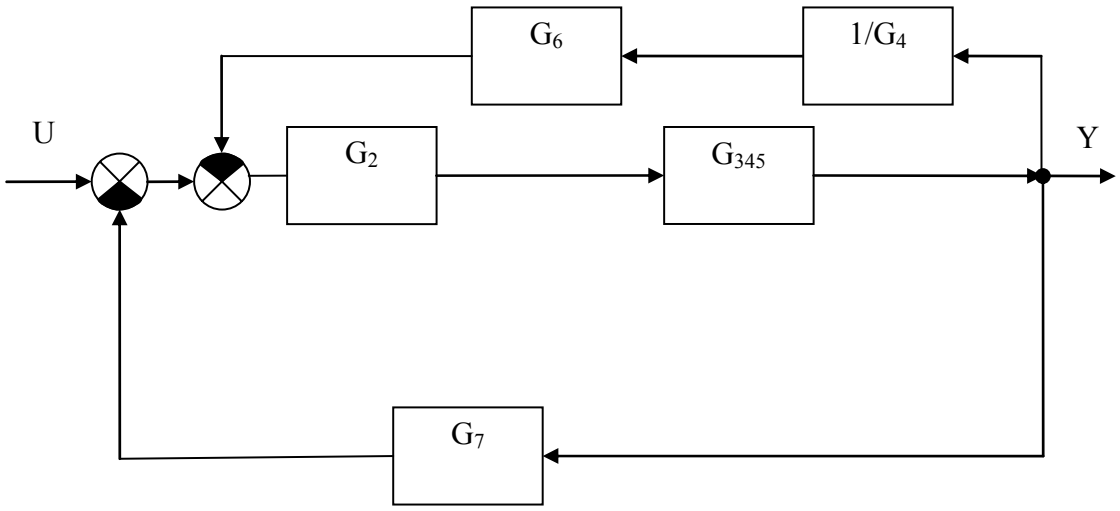
Řešení:

Zadané blokové schéma je tvořeno sériovým a třemi zpětnovazebními zapojeními. Zpětné vazby se nám však kříží, proto budeme muset přesunout uzel (1) za G_3 nebo uzel (2) před G_3. Dostaneme upravené blokové schéma:Přesuneme uzel od přenosu G_4.



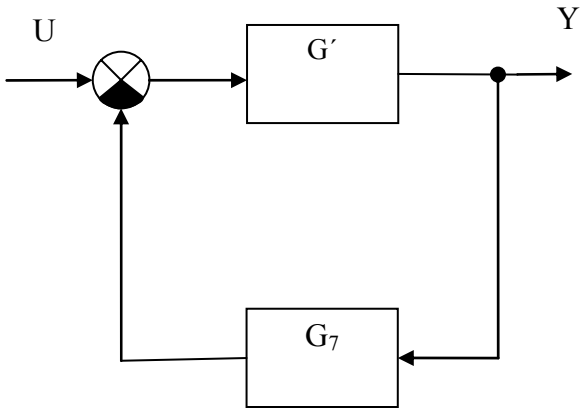
Vypočítáme přenos G_{345}

$$G_{345} = \frac{G_3 G_4}{1 - G_3 G_4 G_5}$$



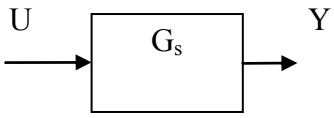
Vypočítáme přenos G´.

$$G' = \frac{G_2 G_{345}}{1 + G_2 G_{345} G_6 \frac{1}{G_4}}$$



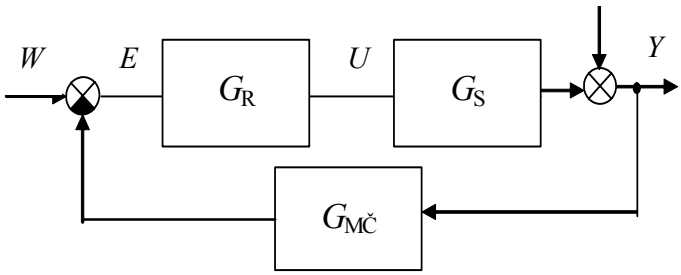
Vypočítáme konečný přenos G_s.

$$G_s = \frac{G'}{1 + G_7 G'}$$



❑ Základní přenosy RO.

Předpokládejme, že vlastnosti jednotlivých členů RO jsou popsány obrazovými přenosy, viz obrázek 2.71.



W – žádaná veličina, *Y* – regulovaná veličina, *U* – řídicí veličina, *E* – regulační odchylka, *V* – poruchová veličina, G_R – přenos regulátoru, G_S – přenos regulované soustavy, $G_{MČ}$ – přenos měřícího členu

Obrázek 2.80 - Blokové schéma regulačního obvodu

Uvažujme vstupní veličinu regulačního obvodu žádanou veličinu *w* a výstupní veličinu regulačního obvodu regulovanou veličinu *y*. Za předpokladu, že poruchová veličina bude rovna nule, tedy *v* = 0, dostáváme přenos mezi řídící veličinou a regulovanou veličinou, nazývaný jako **přenos řízení**

$$G_{wy} = \frac{Y}{W} = \frac{G_S G_R}{1 + G_S G_R G_{MČ}} . \qquad (2.25)$$

Jestliže uvažujeme jako vstupní veličinu regulačního obvodu poruchovou veličinu *v* a výstupní veličinu opět regulovanou veličinu *y*, za předpokladu, že žádaná veličina je rovna

nule, tedy $w = 0$, dostáváme přenos mezi poruchovou a regulovanou veličinou, nazývaný jako **přenos poruchy**.

$$G_{vy} = \frac{Y}{V} = \frac{1}{1 + G_S G_R G_{MČ}} . \tag{2.26}$$

Pro vyšetřování vlastností regulačních obvodů je nutná znalost obou přenosů, přenosu řízení i poruchy. Druhou možností popisu vlastností regulačních obvodů je znalost odchylkových přenosů. Uvažujme vstupní veličinu regulačního obvodu žádanou veličinu w a výstupní veličinu regulačního obvodu regulační odchylku e. Za předpokladu, že poruchová veličina bude rovna nule, tedy $v = 0$, dostáváme přenos mezi řídící veličinou a regulační odchylkou, nazývaný jako **odchylkový přenos řízení**

$$G_{we} = \frac{E}{W} = \frac{1}{1 + G_S G_R G_{MČ}} . \tag{2.27}$$

Jestliže uvažujeme jako vstupní veličinu regulačního obvodu poruchovou veličinu v a výstupní veličinu opět regulační odchylku e, za předpokladu, že žádaná veličina je rovna nule, tedy $w = 0$, dostáváme přenos mezi poruchovou a regulační odchylkou, nazývaný jako **odchylkový přenos poruchy**.

$$G_{ve} = \frac{Y}{V} = \frac{-G_{MČ}}{1 + G_S G_R G_{MČ}} . \tag{2.28}$$

Regulátor působí na regulovanou soustavu tak, aby byl splněn **cíl regulace**, tj. $y \to w$, resp. $e(t) \to 0$. Při znalosti základních přenosů řízení lze vypočítat regulovanou veličinu a regulační odchylku podle vztahů

$$Y = G_W W + G_V V \ , \ E = G_{WE} W + G_{VE} V \ . \tag{2.29}$$

Aby byl splněn cíl regulace, musí pro základní přenosy platit:

$$G_W \to 1, G_V \to 0, G_{WE} \to 0, G_{VE} \to 0 . \tag{2.30}$$

Ve všech základních přenosech regulačního obvodu se vyskytuje součin přenosů regulované soustavy, regulátoru a měřicího členu, který je nazýván jako **přenos otevřeného regulačního obvodu** (ORO)

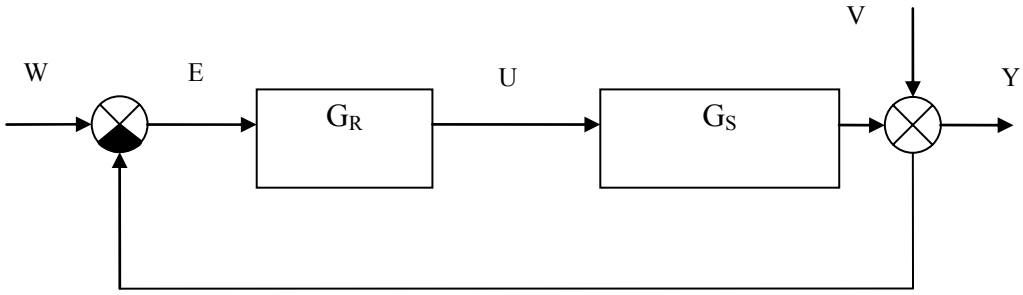
$$G_0 = G_S G_R G_{MČ} . \tag{2.31}$$

Ve všech základních přenosech regulačního obvodu je stejný výraz ve jmenovateli, který rozhoduje o stabilitě a nazývá se **charakteristický mnohočlen**. Pokud jej položíme roven nule, dostaneme **charakteristickou rovnici**. [ŠVARC 1992]

$$1 + G_0 = 0 . \tag{2.32}$$

Příklad 2.13. *Základní přenosy regulačního obvodu*

Vypočítejte všechny základní přenosy regulačního obvodu dle schématu.



$$G_R = 5(1+0{,}25) \qquad G_S = \frac{2}{(s+0{,}3)^2}$$

Řešení:

Přenos řízení:

$$G_{wy} = \frac{G_R G_S}{1+G_R G_S} = \frac{(5+s)\dfrac{2}{(s+0{,}3)^2}}{1+(5+s)\dfrac{2}{(s+0{,}3)^2}} = \frac{2(5+s)}{(s+0{,}3)^2+2(5+s)} = \frac{10(0{,}2s+1)}{s^2+2{,}6s+10{,}09}$$

Přenos poruchy:

$$G_{vy} = \frac{1}{1+G_R G_S} = \frac{1}{1+(5+s)\dfrac{2}{(s+0{,}3)^2}} = \frac{(s+0{,}3)^2}{10+2s+(s+0{,}3)^2} = \frac{(s+0{,}3)^2}{s^2+2{,}6s+10{,}09}$$

Odchylkový přenos řízení:

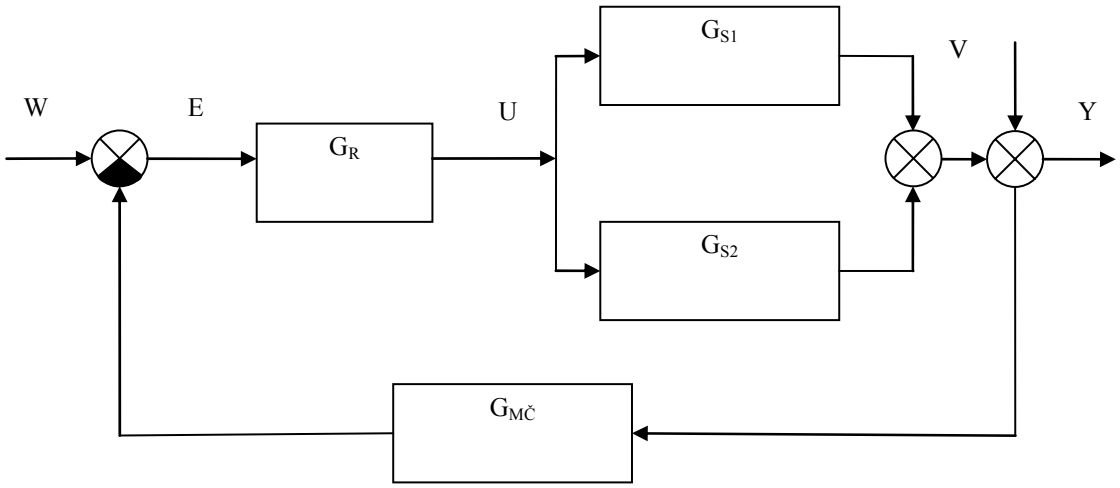
$G_{we} = G_{vy}$

Odchylkový přenos poruchy:

$G_{ve} = -G_{vy}$

Příklad 2.14. *Základní přenosy regulačního obvodu*

Vypočítejte všechny základní přenosy regulačního obvodu dle schématu.



Řešení:

Přenos regulované soustavy:

$$G_S = G_{S1} + G_{S2}$$

Přenos řízení:

$$G_{wy} = \frac{G_R G_S}{1 + G_R G_S G_{MČ}}$$

Přenos poruchy:

$$G_{vy} = \frac{1}{1 + G_R G_S G_{MČ}}$$

Odchylkový přenos řízení:

$$G_{we} = \frac{1}{1 + G_R G_S G_{MČ}}$$

Odchylkový přenos poruchy

$$G_{ve} = -\frac{G_{MČ}}{1 + G_R G_S G_{MČ}}$$

Shrnutí pojmů 2.6.

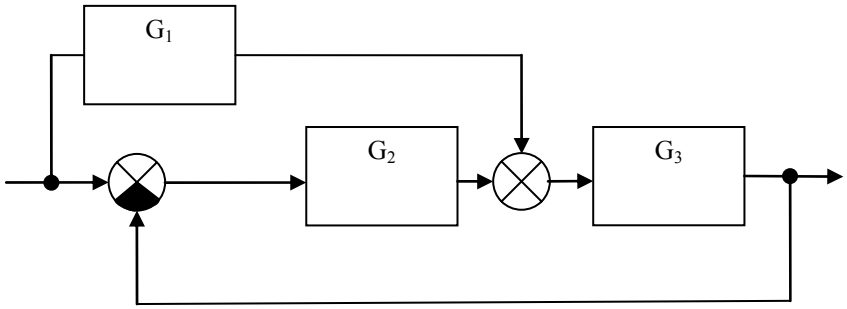
V této kapitole jsou studenti seznámeni s algebrou blokových schémat, se základními zapojeními bloků a výpočtem jejich výsledného přenosu. Pak se naučí zjednodušovat složité blokové schémata a počítat jejich výsledný přenos. Závěr je věnován popisu struktury regulačních obvodů a způsobu výpočtu jejich základních přenosů.

Otázky 2.6.

1. Jak se spočítá náhradní přenos paralelně zapojených soustav?
2. Co je to zesílení otevřené smyčky a jak se vypočte?
3. Jak se vypočítá odchylkový přenos řízení?
4. Co obsahují číslicové regulační obvody navíc než analogové?

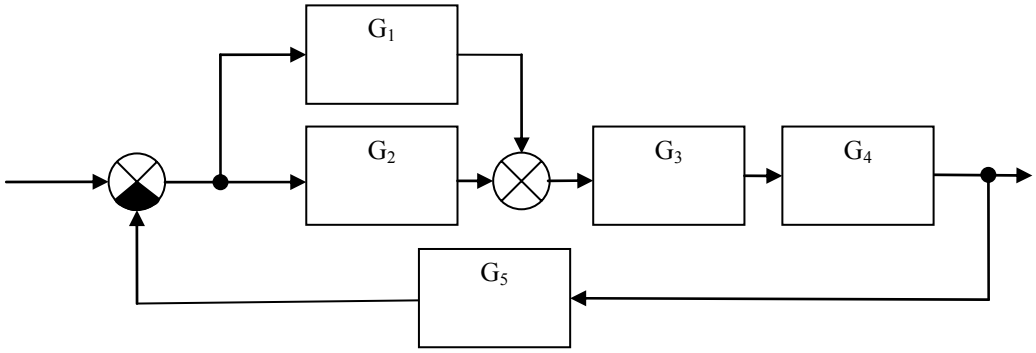
Úlohy k řešení 2.2.

1. Zjednodušte obvod a napište výsledný přenos.



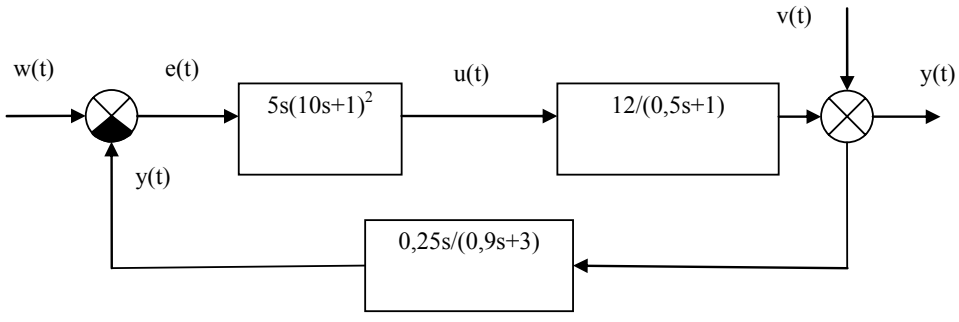
1.

2. Zjednodušte obvod a napište výsledný přenos.



1.

3. Vypočítejte přenos řízení a odchylkový přenos řízení.



1.

2.7. Stabilita

Čas ke studiu: 2 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

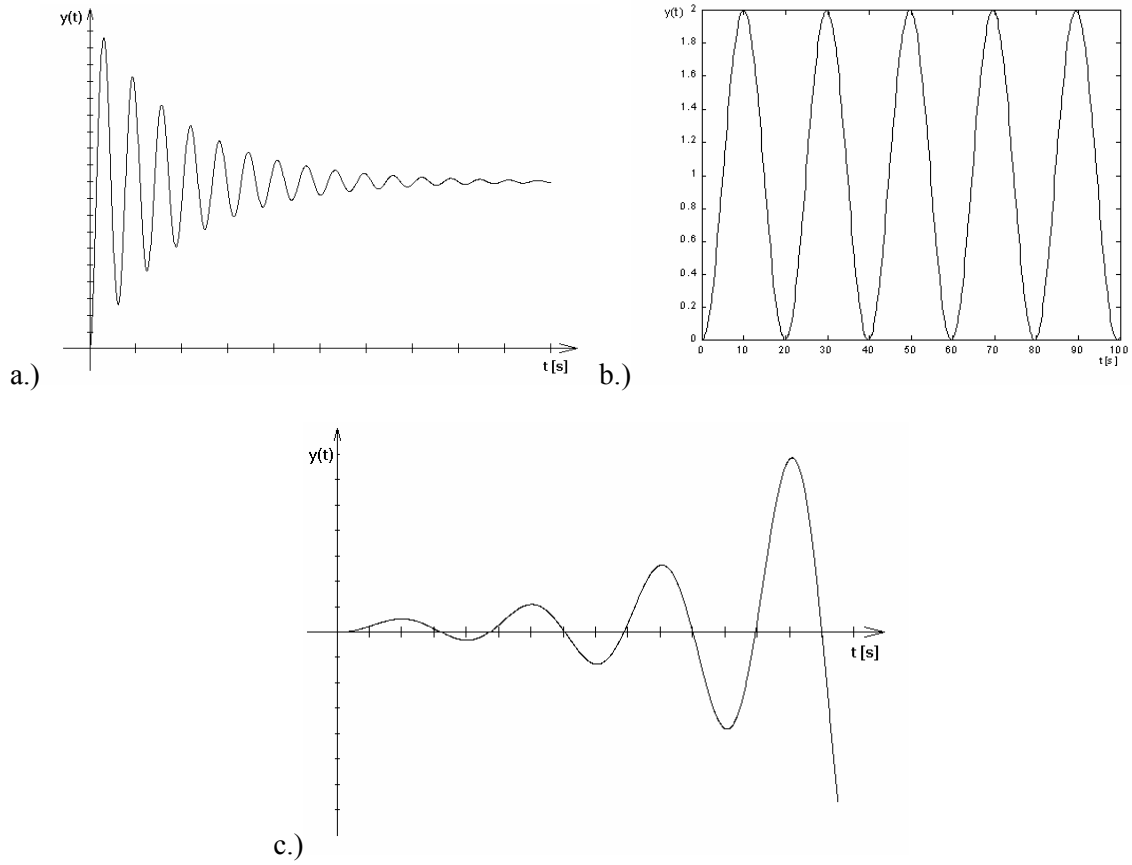
- definovat pojem stabilita spojitých systémů, nutnou a postačující podmínku stability, nutnou podmínku stability.
- popsat kritéria stability a jejich použití.
- Určit, zda regulační obvod je stabilní.

Výklad

Stabilita je jedním ze základních požadavků, které klademe na regulační obvod. Regulační obvod je stabilní, jestliže pro vychýlení regulačního obvodu z rovnovážného stavu a odeznění vnějších sil, které tuto odchylku způsobily, se regulační obvod během času znovu vrátí do původního rovnovážného stavu. Jinak řečeno je stabilita vlastnost regulačního obvodu udržet se v okolí rovnovážného stavu nebo se do něj vrátit po odeznění vnějších **působících sil.** Matematicky lze stabilitu definovat

$$\lim_{t\to\infty} y(t) = 0. \tag{2.33}$$

Z hlediska stability rozlišujeme RO stabilní, na mezi stability a nestabilní. RO na mezi stability se považují za stabilní. Průběh regulačního výše uvedené typy RO je znázorněn na obr. 2.81. Vždy se vyžaduje, aby regulační obvod byl za všech okolností stabilní. Zatímco parametry a dynamické vlastnosti regulované soustavy jsou dány konstrukcí soustavy, technologickým procesem apod. a nemůžeme je tudíž měnit, můžeme měnit dynamické vlastnosti regulátoru nastavováním volitelných parametrů regulátoru. Tím můžeme dosáhnout stability (a dalších vlastností) regulačního obvodu.



a.) stabilní, b.) mez stability, c.) nestabilní

Obrázek 2.81 - Příklady průběhů regulačního pochodu – shora: stabilní, na mezi stability, nestabilní RO

Při vyšetřování stability se vychází z tzv. charakteristického mnohočlenu, který je ve jmenovateli všech základní přenosů RO a je popsán vztahem (2.30). Má-li charakteristická rovnice (2.30) pouze nenásobené reálné kořeny s_i, je řešení rovnice (2.31) – tedy hledaný přechodný děj – ve tvaru

$$y = c_1 e^{s_1 t} + c_2 e^{s_2 t} + ... + c_n e^{s_n t} = \sum_{i=1}^{n} c_1 e^{s_i t}, \tag{2.34}$$

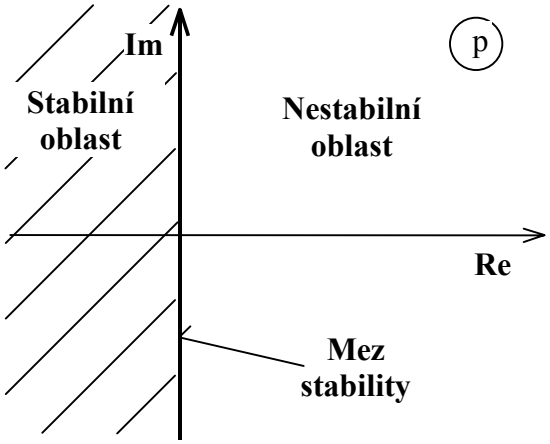
kde c_i jsou konstanty vypočtené z počátečních podmínek.

Jestliže má charakteristická rovnice (2.30) dvojici komplexně sdružených kořenů, $s_k = a + jb$, $s_{k+1} = a - jb$, bude řešení rovnice (2.31) mít tvar

$$y = ... + e^{at}(c_k \sin bt + c_{k+1} \cos bt) + ... \tag{2.35}$$

Ze vztahů (2.32), (2.33) vyplývá nutná a postačující podmínka stability RO, která se týká kořenů charakteristické rovnice (2.30). Regulační obvod je stabilní právě tehdy, když všechny kořeny charakteristické rovnice mají záporné reálné části, tedy leží-**li v levé komplexní polorovině**, viz obr. 2.82**,** [ŠVARC 1992]

$$\mathrm{Re}\, s_i \le 0 \qquad \text{pro} \qquad i = 1,\ldots,n\,. \tag{2.36}$$



Obrázek 2.82 - Oblast stability spojitých RO

Kontrola stability RO spočívá v určení rozložení kořenů charakteristické rovnice v komplexní rovině kořenů. Pokud lze kořeny vyčíslit, použijeme nutnou a postačující podmínku stability. Jinak je nutno použít pravidla, která umožní rozhodnout o stabilitě bez přímého výpočtu kořenů, tyto pravidla se nazývají kritéria stability. V následujících odstavcích jsou uvedeny kritéria, která se často používají.

❑ Hurwitzovo kriterium stability

Vycházíme z charakteristické rovnice (3.8) a platí zde tzv. Stodolova nutná podmínka stability, která zní: „Všechny koeficienty charakteristické rovnice a_i musí existovat a musí mít stejné znaménko“. Je-li charakteristický mnohočlen řádu $n \le 2$, Stodolova podmínka přechází v nutnou a postačující podmínku stability. Jinak je nutno sestrojit z koeficientů charakteristické rovnice Hurwitzův determinant *n*-tého stupně ve tvaru

$$H_{n-1} = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \cdots & 0 \\ a_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-4} & \cdots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_0 \end{vmatrix} \qquad (2.37)$$

Hlavní rohové subdeterminanty jsou

$$H_1 = a_{n-1}; H_2 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} \\ a_n & a_{n-2} \end{vmatrix}; H_3 = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} \end{vmatrix}; \ \ldots; H_n = a_0 H_{n-1}. \qquad (2.38)$$

Podle Hurwitzova kriteria je RO stabilní právě tehdy, když hlavní subdeterminanty (7.6) jsou kladné,

$$H_i > 0 \quad pro \quad i = 2, \ldots, n-1. \qquad (2.39)$$

První a poslední rohový subdeterminant se počítat nemusí, protože je-li splněna Stodolova podmínka, jsou dané subdeterminanty vždy kladné. Pokud je jeden z rohových

subdeterminantů roven nule, RO je na **kmitavé mezi stability**, tzn. charakteristická rovnice má dvojici ryze imaginárních kořenů. Je-li koeficient charakteristické rovnice a_0=0 a všechny rohové subdeterminanty jsou kladné, RO je na **nekmitavé mezi stability**, tzn. charakteristická rovnice má nulový kořen.

Příklad 2.15. *Stabilita*

Pomocí Hurwitzova kriteria stability určete, zda je obvod stabilní.

$$G_O(s) = \frac{4s^2 + 1}{10s^4 + 3s^3 + 14s^2}$$

Řešení:

V zadání je přenos otevřeného regulačního obvodu, a proto charakteristický mnohočlen je součet čitatele a jmenovatele.

$$N(s) = 10s^4 + 3s^3 + 18s^2 + 1$$

$a_i > 0$ splněno

$$H = \begin{vmatrix} 3 & 1 & 0 \\ 10 & 18 & 0 \\ 0 & 3 & 1 \end{vmatrix} \qquad H_2 = \begin{vmatrix} 3 & 1 \\ 10 & 18 \end{vmatrix} = 54 - 10 = 44 > 0$$

Regulační obvod je stabilní.

Příklad 2.16. *Stabilita*

Rozhodněte, zda RO je stabilní, když přenos regulované soustavy a regulátoru mají tvar

$$G_S(s) = \frac{1}{0.3s^3 + s^2 + 2s + 1}; G_R(s) = 1 + \frac{1}{3s}.$$

Řešení:

Přenos otevřeného RO je

$$G_0(s) = \frac{3s + 1}{0{,}9s^4 + 3s^3 + 6s^2 + 6s + 1}.$$

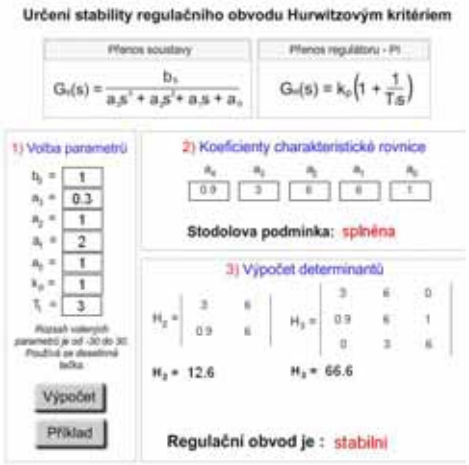
Pak charakteristická rovnice má tvar

$$0{,}9s^4 + 3s^3 + 6s^2 + 9s + 2 = 0.$$

Nutná Stodolova podmínka je splněna, musíme sestavit tedy determinant H_4 a subdeterminanty H_2 a H_3 vyčíslit.

$$H_4 = \begin{vmatrix} 3 & 9 & 0 & 0 \\ 0{,}9 & 6 & 2 & 0 \\ 0 & 3 & 9 & 0 \\ 0 & 0{,}9 & 6 & 2 \end{vmatrix} \Rightarrow H_2 = \begin{vmatrix} 3 & 9 \\ 0{,}9 & 6 \end{vmatrix} = 9{,}9;\ H_3 = \begin{vmatrix} 3 & 9 & 0 \\ 0{,}9 & 6 & 2 \\ 0 & 3 & 9 \end{vmatrix} = 71{,}1\,.$$

Oba subdeterminanty jsou kladné a RO je tedy stabilní.



Obrázek 2.83 – Animace kontroly stability pomocí Hurwitzova kritéria stability

❑ Routhovo-Schurovo kriterium stability

Vycházíme opět z charakteristické rovnice ve tvaru (3.8). Podle daného algoritmu provádíme postupnou redukci charakteristické rovnice na rovnici nižšího stupně, až se dostaneme ke kvadratické rovnici. Podle Routhova-Schurova kriteria je **RO stabilní právě tehdy, když při redukci se neobjeví záporné koeficienty a poslední tři koeficienty výsledné rovnice jsou kladné**. Koeficienty napíšeme v řadě od nejvyšších nebo nejnižších mocnin a podtrhneme sudé koeficienty v pořadí. Každý sudý koeficient v pořadí násobíme podílem prvních dvou a napíšeme pod předcházející řadu posunutý o člen vlevo. Tuto výslednou řadu, která má členy vždy ob jeden předcházející řady, od ní odečteme. Výsledná řada koeficientů je pak o první člen kratší (stupeň předchozí rovnice se snížil o jednotku). Stejným postupem pokračujeme dále, až zbudou koeficienty rovnice druhého stupně – tři koeficienty.
Výpočet lze znázornit schématem

$$\begin{array}{llllll} a_n & a_{n-1} & a_{n-2} & a_{n-3} & a_{n-4} & a_{n-5} \quad \ldots\ldots \Big/ \left(\frac{a_n}{a_{n-1}}\right) \\ \frac{a_n}{a_{n-1}} a_{n-1} & & \frac{a_n}{a_{n-1}} a_{n-3} & & \frac{a_n}{a_{n-1}} a_{n-5} & \\ \hline 0 & a_{n-1} & a_{n-2} - \frac{a_n}{a_{n-1}} a_{n-3} & a_{n-3} & a_{n-4} - \frac{a_n}{a_{n-1}} a_{n-5} & a_{n-5} \quad \ldots\ldots \end{array} \qquad (2.39)$$

Toto kritérium je účelné použít hlavně tehdy, jsou koeficienty charakteristické rovnice vyjádřené číselně. Stodolova podmínka zůstává v platnosti a je podmínkou nutnou.

Příklad 2.17. *Stabilita*

Pomocí Routhova-Schurova kriteria stability určete, zda je obvod stabilní.

$$N(s) = s^6 + 3s^5 + 5s^4 + 12s^3 + 6s^2 + 9s + 1$$

Řešení:

Routhovo-Schurovo kriterium opět vychází z charakteristického mnohočlenu. Regulační obvod je stabilní, když jsou koeficienty všech rovnic při postupné redukci charakteristické rovnice kladné.
Schéma redukce je následující:

- napíšeme koeficienty redukované rovnice do řádku od nejvyšší mocniny k nejnižší (možno i naopak)
- podtrhneme sudé koeficienty v pořadí (každý druhý)
- každý podtržený koeficient násobíme podílem dvou nejvyšších koeficientů a_n / a_{n-1} a výsledek napíšeme do druhého řádku posunutý o jedno místo vlevo
- druhý řádek (který má členy vždy ob jeden prvního řádku) odečteme od prvého řádku a dostaneme třetí řádek
- koeficienty třetího řádku jsou koeficienty rovnice o jeden stupeň nižší, než byla redukovaná rovnice, neboť na místě nejvyššího koeficientu jsme dostali nulu
- redukci provádíme tímto způsobem dále až na rovnici 2. stupně (tři koeficienty). Nulu na začátku řady koeficientů neuvažujeme. Koeficienty u všech redukovaných rovnic musí být kladné. To je podmínka stability.

1 3 5 12 6 9 1		$/\frac{a_n}{a_{n-1}} = \frac{1}{3}$
-(1 4 3)		
0 3 1 12 3 9 1		/3
-(3 9 3)		
0 1 3 3 6 1		$/\frac{1}{3}$
-(1 2)		
0 3 1 6 1		/3
-(3 3)		
0 1 3 1		

Regulační obvod je stabilní, protože jsou koeficienty kladné.

Příklad 2.18. *Stabilita*

Pomocí Routhova-Schurova kriteria stability určete, zda je obvod stabilní.

$$G_w(s) = \frac{3s^2 + 2s + 1}{s^4 + 5s^3 + 13s^2 + 19s + 10}$$

Řešení:

V zadání je přenos řízení, a proto charakteristický mnohočlen je jen jmenovatel.

$N(s) = s^4 + 5s^3 + 13s^2 + 19s + 10$

	1	5	13	19	10
-(	1		19/5		)
	0	5	46/5	19	10
-(		5		250/46	)
	0	0	46/5	624/46	10

$/\frac{a_n}{a_{n-1}} = \frac{1}{5}$

$/\frac{35}{46}$

Regulační obvod je stabilní, protože jsou koeficienty kladné.

Příklad 2.19. *Stabilita*

K regulaci statické soustavy o přenosu

$$G_S(s) = \frac{1}{0{,}33s^5 + s^4 + 1{,}66s^3 + 4s^3 + 2s + 1},$$

je použit PI regulátor s přenosem

$$G_R(s) = 1 + \frac{1}{3s}.$$

Rozhodněte, zda RO je stabilní.

Řešení:

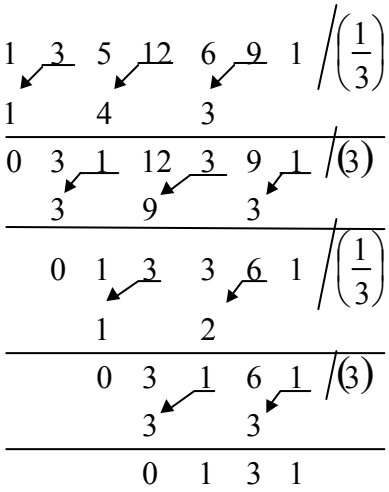
Přenos ORO je

$$G_{O(s)} = \frac{3s + 1}{s^6 + 3s^5 + 5s^4 + 12s^3 + 6s^2 + 6s}.$$

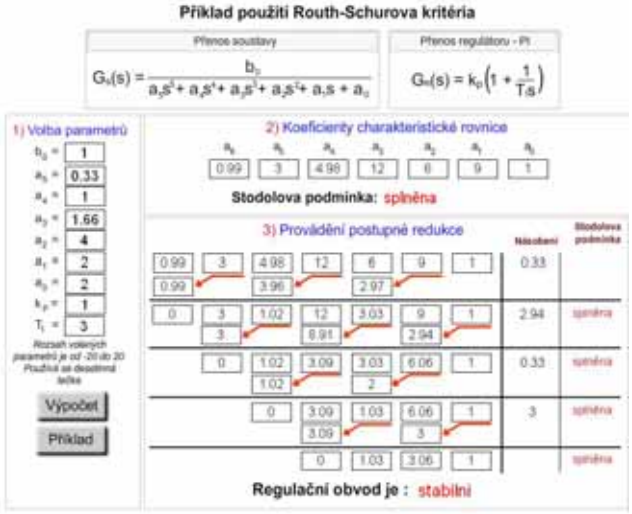
Charakteristická rovnice RO je

$$s^6 + 3s^5 + 5s^4 + 12s^3 + 6s^2 + 9s + 1 = 0$$

Podle algoritmu (6.8) provádíme nyní postupnou redukci stupně charakteristické rovnice:



Koeficienty u všech stupňů rovnic jsou kladné a proto je RO **stabilní**.



Obrázek 2.84 – Animace kontroly stability pomocí Routhova-Schurova kritéria stability

Předchozí dvě kritéria stability spadají do **algebraických kritérií stability**, tyto kritéria nedávají dosti dobrý názor o vlivu jednotlivých součinitelů na stabilitu regulačního pochodu a nemohly být použity pro řešení stability u systémů s dopravním zpožděním. Tyto chybějící vlastnosti nacházíme až u **kmitočtových kritérií stability**.

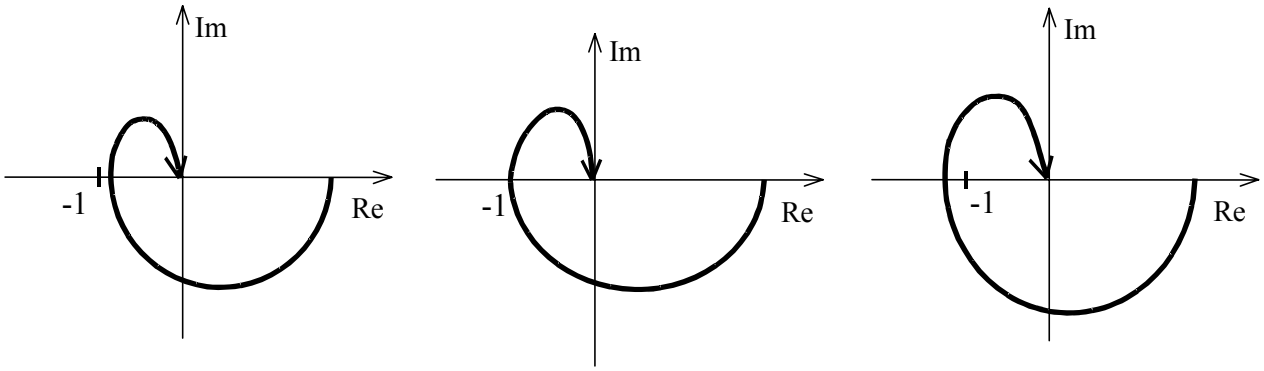
❑ Nyquistovo kriterium stability

Je to kmitočtové kriterium, které rozhoduje o stabilitě RO na základě průběhu kmitočtové charakteristiky otevřeného regulačního obvodu. Tuto charakteristiku lze určit analyticky nebo experimentálně. Skutečnost, že při vyšetřování stability pomocí Nyquistova kritéria lze vycházet z experimentálně získaných hodnot, zvýhodňuje toto kritérium v porovnání s ostatními kritérii stability. Další výhodou je, že ho lze použít i pro RO s dopravním zpožděním.

Charakteristická rovnice uzavřeného RO je dána vztahem

$$N(s) = 1 + G_o(s) = \frac{N_o(s) + M_o(s)}{N_o(s)} = 0\,. \qquad (2.40)$$

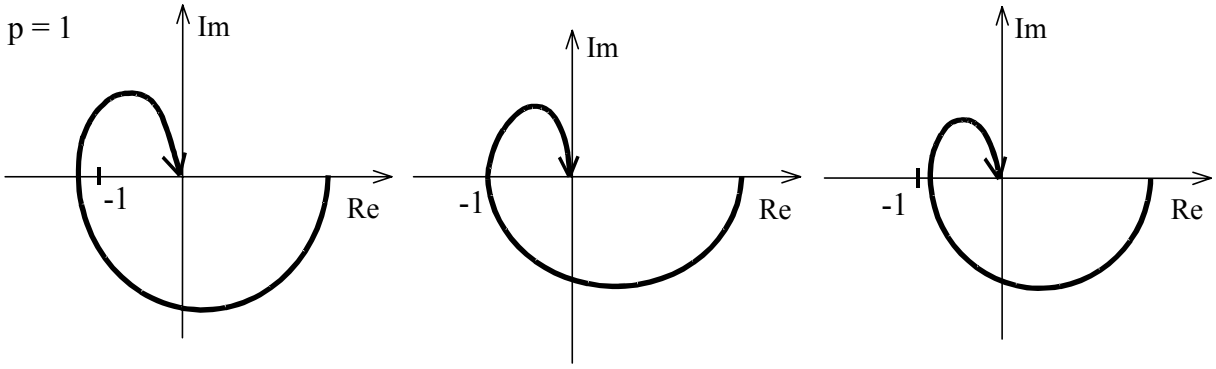
Nyquistovo kritérium stability: **„Je-li otevřený RO stabilní, pak uzavřený RO bude stabilní právě tehdy, když amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika otevřeného regulačního obvodu $G_O(j\omega)$ neobklopuje kritický bod [-1, j0].“**



stabilní systém systém na mezi stability nestabilní systém

Obrázek 2.85 - Příklady průběhů amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky

Nyquistovo kritérium stability: **„Je-li otevřený RO nestabilní a má p nestabilních kořenů, pak uzavřený RO bude stabilní právě tehdy, když amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika otevřeného RO obklopí kritický bod [-1, j0] p/2 krát.”**



stabilní systém systém na mezi stability nestabilní systém

Obrázek 2.86 - Příklady průběhů amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky

V případě, že určujeme stabilitu lineárních RO a otevřený RO je stabilní, můžeme použít **analytické formulace** Nyquistova kritéria. To spočívá v určení modulu a fáze kmitočtového přenosu otevřeného RO nebo v určení reálné a imaginární části kmitočtového přenosu otevřeného RO. Uzavřený RO bude stabilní právě tehdy, když

$$\arg G_o(j\omega_k) = -\pi \qquad \Rightarrow \qquad \operatorname{mod} G_o(j\omega_k) < 1\,, \qquad (2.41)$$

resp.

$$\arg G_o(j\omega_k) = -\pi \qquad \Rightarrow \qquad L(\omega_k) < 0 \qquad (2.42)$$

nebo

$$\mathrm{Im}\left\{G_o(j\omega_k)\right\}=0 \qquad \Rightarrow \qquad \mathrm{Re}\left\{G_o(j\omega_k)\right\}>-1. \tag{2.43}$$

Příklad 2.20. *Stabilita*

Vyšetřete stabilitu regulačního obvodu, jenž je tvořen regulovanou soustavou a regulátorem o přenosech

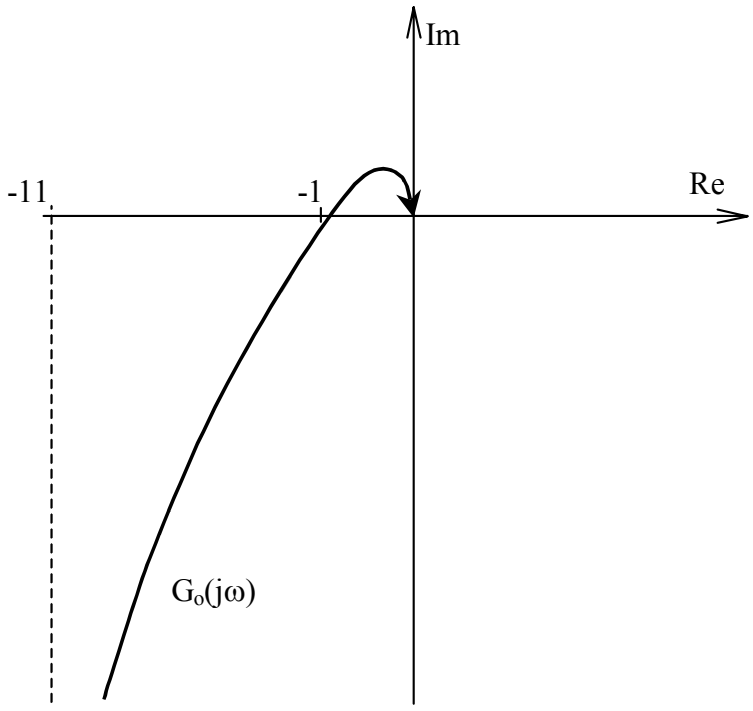
$$G_S(s)=\frac{1}{(10s+1)(s+1)}, G_R(s)=\frac{1}{s}.$$

Řešení:

Přenos otevřeného RO je

$$G_O(s)=\frac{1}{s(10s+1)(s+1)}.$$

Kořeny charakteristického mnohočlenu $N_o(s)$ jsou 0; -0,1; -1, tzn. otevřený RO je stabilní.



Obrázek 2.87 - Amplitudo-fázová KCH pro příklad

Na obr. 2.87 je nakreslena kmitočtová charakteristika rozpojeného obvodu $G_O(j\omega)$. Kritický bod –1 leží vlevo od kmitočtové charakteristiky $G_O(j\omega)$ a je proto obvod **stabilní.** [ŠVARC 1992], [BALÁTĚ 2003]

Shrnutí pojmů 2.7.

Definice stability a způsoby jejího ověřování buď na základě odezvy nebo pomocí nutné a postačující podmínky stability nebo pomocí kritérií stability.

Otázky 2.7.

1. Co to je stabilita?
2. S čím je svázáno jméno Nyquist?
3. Která kritéria stability patří mezi algebraická?
4. Jak určíme charakteristický mnohočlen regulačního obvodu popsaného přenosem otevřené smyčky?

Úlohy k řešení 2.3.

1. Ověřte, zda je daný regulační obvod stabilní.

   $G_R(s) = 4s + 1 \qquad G_S(s) = \dfrac{1}{5s(0{,}5s+1)(8s+1)}$

2. Ověřte, zda je daný regulační obvod stabilní.

   $G_O(s) = \dfrac{2s^2 + 8}{s^4 + 3s^3 + 4s^2 + 12s}$

3. Ověřte, zda je daný regulační obvod stabilní.

   $G_R(s) = k_p(1 + T_D s) \quad G_S(s) = \dfrac{2}{3s(0{,}5s+1)(3s+1)}$

4. Ověřte, zda je daný regulační obvod stabilní.

   $G_R(s) = k_p(1 + \dfrac{1}{T_I s}) \quad G_S(s) = \dfrac{k_1}{s(T_1 s + 1)}$

2.8. Regulátory

Čas ke studiu: 1,5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat základní typy regulátorů – spojitých, číslicových, nespojitých.
- popsat přenosy regulátorů odvozených z PID regulátorů.
- nakreslit průběh regulované veličiny pro regulační obvod s nespojitým regulátorem.

Výklad

V této kapitole si uvedeme základní typy regulátorů, které se používají běžně v technické praxi. Jedná se o analogové, číslicové a nespojité regulátory.

Analogové regulátory

Analogový (spojitý) regulátor je dán obecným vztahem

$$u(t) = k_p\left[e(t) + \frac{1}{T_I}\int_0^t e(\tau)d\tau + T_D\frac{de(t)}{d(t)}\right], \qquad (2.44)$$

kde k_p - zesílení regulátoru T_I - integrační časová konstanta regulátoru T_D. derivační časová konstanta regulátoru.
Přenos spojitého regulátoru je dán vztahem

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p\left(1 + \frac{1}{T_1 s} + T_D s\right). \qquad (2.45)$$

Konvenční algoritmy regulace popsané vztahem (2.45) buď obsahují kombinaci dvou nebo tří složek, popř. jednotlivé složky samostatně. Tím vzniká pět základních typů regulátorů, viz. tabulka 2.3.

Tabulka 2.3 - Popis používaných typů spojitých regulátorů

Typ spojitého regulátoru	Přenos regulátoru
P	$G_R(s) = k_p$
I	$G_R(s) = \frac{1}{T_I s}$
PD	$G_R(s) = k_p(T_D s + 1)$
PI	$G_R(s) = k_p\left(1 + \frac{1}{T_I s}\right)$
PID	$G_R(s) = k_p\left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s\right)$

P-reg - v uzavřeném obvodu pracuje s trvalou regulační odchylkou. Má dobrou stabilitu. Používá se velmi často např. na stabilizaci pevných bodů, stabilizaci napětí, proudu. Nezáleží na kvalitě.

I-reg - v uzavřeném obvodu pracuje pouze s přechodovou regulační odchylkou. Regulační pochod se ustálí tehdy, kdy regulační odchylka $e(t) = 0$. Nevyhoví podmínkám stability regulačního obvodu, když by měl regulovat astatickou regulovanou soustavu.

D-člen - není schopen samostatné funkce, jako regulátor připojený k regulované soustavě, protože vstupním signálem je derivace regulační odchylky a neví tedy nic o velikosti (hodnotě) odchylky $e(t)$. Připustí libovolně velkou ustálenou regulační odchylku. V kombinovaném regulátoru zlepšuje stabilitu regulačního obvodu. Natáčí fázi amplitudové fázové charakteristiky v komplexní rovině o +90°. Informuje regulátor o změně regulační odchylky a tedy regulátor může v "předstihu" na tuto změnu reagovat. Rozpojí regulační obvod

PI-reg - v uzavřeném regulačním obvodu odstraňuje trvalou regulační odchylku, kterou bychom měli při použití P-regulátoru. Zlepšuje stabilitu vzhledem k použití čistě I-regulátoru. Pro určitá nastavení stavitelných parametrů regulátoru vyhovuje z hlediska stability i pro astatické regulované soustavy. V počátku regulačního pochodu převládá vliv proporcionální složky, s narůstajícím časem převládá vliv integrační složky. Nejrozšířenější spojitý regulátor.

PD-reg - zlepšuje stabilitu regulačního obvodu ve srovnání s použitím čistě P-regulátoru. Je tedy možné pracovat s vyšším zesílením regulátoru a tedy menší trvalou regulační odchylkou vzhledem k použití čistě P-regulátoru. V počátku regulačního pochodu převládá vliv derivační složky, s narůstajícím časem převládá vliv proporcionální složky; regulátor pracuje s přechodným zvýšeným zesílením.

PID-reg - v uzavřeném regulačním obvodu odstraňuje vlivem I složky trvalou regulační odchylku a vlivem D složky zlepšuje stabilitu regulačního obvodu. V počátku přechodového děje převládá derivační složka regulátoru, s narůstajícím časem převládá integrační složka regulátoru [BALATĚ 1991].

Mechanické a pneumatické regulátory jsou drahé, elektrické jsou levné a většinou PID. Fyzikální realizace regulátorů a jejich charakteristiky jsou popsány v kapitole 3.

Číslicové regulátory

Číslicový (diskrétní) regulátor je dán obecným vztahem

$$u(kT) = k_p\left[e(kT) + \frac{T}{T_I}\sum_{i=0}^{k} e(kT) + \frac{T_D}{T}\nabla e(kT)\right], \tag{2.46}$$

kde $\nabla e(kT) = e(kT) - e[(k-1)T]$.

Přenos diskrétního regulátoru je dán vztahem

$$G_R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = k_p\left(1 + \frac{T}{T_I}\frac{z}{z-1} + \frac{T_D}{T}\frac{z-1}{z}\right). \tag{2.47}$$

Tabulka 2.4 - Popis jednotlivých diskrétních regulátorů

Typ diskrétního regulátoru	Přenos regulátoru
P	$G_R(z) = k_p$
S (číslicový I)	$G_R(z) = \frac{T}{T_I}\frac{z}{z-1}$
PD	$G_R(z) = k_p\left(1+\frac{T_D}{T}\frac{z-1}{z}\right)$
PS (číslicový PI)	$G_R(z) = k_p\left(1+\frac{T}{T_I}\frac{z}{z-1}\right)$
PSD (číslicový PI)	$G_R(z) = k_p\left(1+\frac{T}{T_I}\frac{z}{z-1}+\frac{T_D}{T}\frac{z-1}{z}\right)$

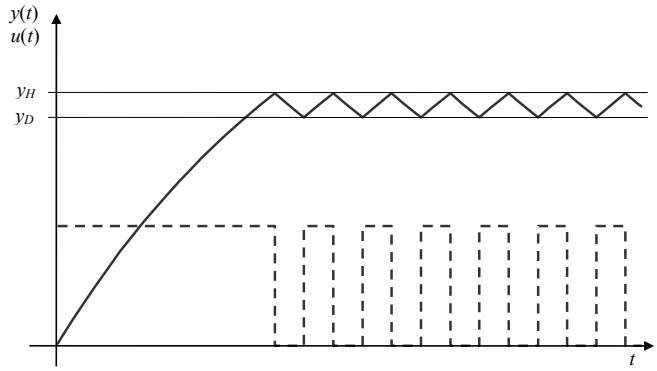
Pozn.: Diskrétní **regulátor S** nelze použít na astatické soustavy.

Nespojité regulátory

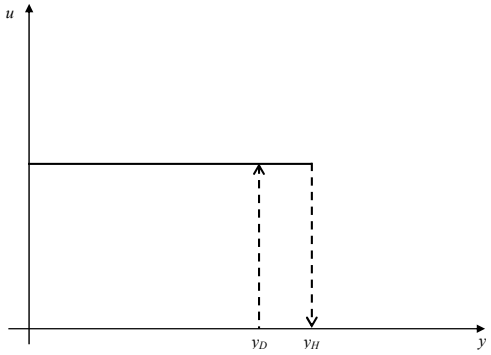
Nejjednodušší úlohy regulace spojitých proměnných veličin se velmi často realizují pomocí nespojitých regulátorů, nejčastější způsob je **dvoupolohová regulace**. To je zvláštní aplikace logického řízení. Hlavní důvod je jeho technická jednoduchost – nízká cena a dobrá spolehlivost. Dvoupolohový regulátor má pouze nastavení dvou hodnot, tj.

$$u(t) = \begin{cases} \text{zapnuto, v činnosti} \\ \text{vypnuto, zastaveno} \end{cases}.$$

Typický průběh regulované a akční veličiny při dvoupolohové regulaci je vidět na obr. Statická charakteristika dvoupolohového regulátoru je vidět na obr. Akční veličina nabývá pouze dvou hodnot a to maximální a nulovou. Přepínáni mezi mezními hodnotami se řídí dvěmi hodnotami regulované veličiny, tzn spínací y_D a vypínací y_H. rozdíl mezi oběma hodnotami se nazývá hystereze a je stavitelným parametrem dvoupolohových regulátorů. Jak je vidět, regulovaná veličina se pohybuje v okolí žádané hodnoty, jehož velikost závisí jednak na dynamice řízeného systému, tak i na hysterezi regulátoru.

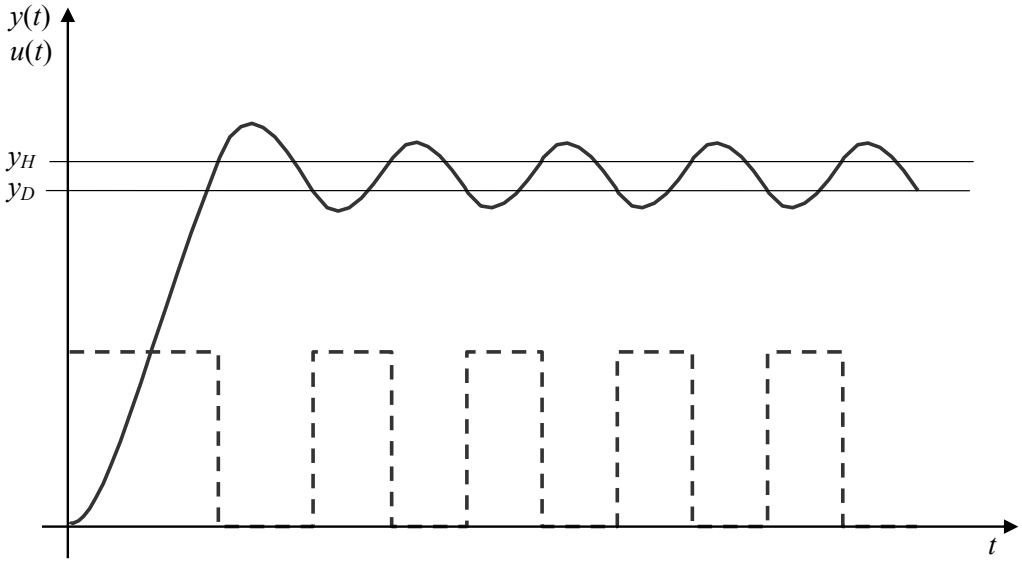


Obrázek 2.88 - Průběh regulované a akční veličiny při dvoupolohové regulaci



Obrázek 2.89 - Statická charakteristika dvoupolohového regulátoru

Pokud má regulovaná soustava dopravní zpoždění nebo se jedná a soustavu s vyššího řádu, pak lze předpokládat, že regulovaná veličina po přepnutí u nezmění směr tak náhle, jak je vidět v obr. , ale rozkmit regulované veličiny bude větší.



Obrázek 2.90 - Průběh regulované a akční veličiny při dvoupolohové regulaci regulované soustavy vyššího řádu

Shrnutí pojmů 2.8.

Kapitola je věnována základním typům regulátorů používaným v technické praxi – jedná se o analogové, číslicové a nespojité regulátory. Dále jsou zde uvedeny tvary jejich matematického popisu a charakteristik, realizace a stavitelné parametry, tvary přechodových charakteristik.

Otázky 2.8.

1. Existují regulátory typu PD?
2. Co je to pásmo proporcionality?
3. Jaké jsou stavitelné parametry PID regulátoru?
4. Napište zkratky pro regulátory odvozené od typu PID?
5. Existuje regulátor typu D?
6. Ustálí se regulovaná veličina v regulačním obvodu s nespojitým regulátorem?
7. Jak se realizují analogové regulátory?

2.9. Kvalita regulačního pochodu

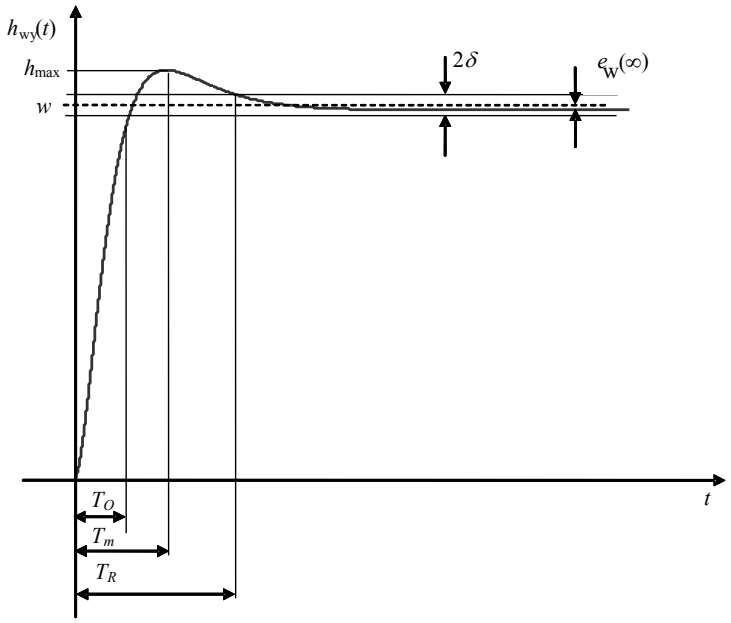
Čas ke studiu: 1 hodin

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat integrační kritéria.
- popsat hodnocení kvality regulačního pochodu v časové oblasti.
- vypočítat trvalé regulační odchylky.

Výklad

Kvalitu regulace lze posuzovat ve třech oblastech: časové, kmitočtové a komplexní proměnné. Časová oblast je velmi oblíbená, protože umožňuje rychlé zhodnocení kvality regulace a základě průběhu odezvy regulované veličiny $y(t)$ vyvolané skokovou změnou žádané $w(t)$ nebo poruchové $v(t)$ veličiny, proto se budeme věnovat jen této oblasti.



Obrázek 2.91 - Průběh regulované veličiny na skokovou změnu žádané veličiny

Nejdříve se určuje, zda se jedná o kmitavý děj nebo nekmitavý, s překmitem nebo bez překmitu, viz. obrázek 2.91. U děje s překmitem jsou měřítkem kvality velikost relativního překmitu κ v procentech a rychlost odezvy T_0, která je určena dobou potřebnou k prvnímu dosažení ustálené hodnoty regulované veličiny. Doba regulace T_R je hodnota potřebná k dosažení 95% žádané hodnoty regulované veličiny. Dále se uvádí počet překmitů n za dobu regulace T_R.

Dalším důležitým parametrem kvality je velikost trvalé regulační odchylky. Určujeme trvalou regulační odchylku pro žádanou nebo poruchovou veličinu a pro tři základní testovací signály a to skok polohy, rychlosti a zrychlení. Odchylku lze velmi jednoduše spočítat pomocí následujících vztahů

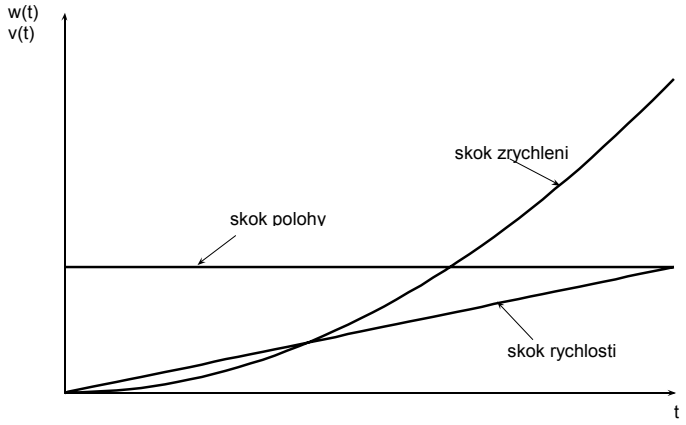
$$e_w(\infty) = \lim_{s\to 0} sE_w(s),\ e_v(\infty) = \lim_{s\to 0} sE_v(s), \tag{2.48}$$

$$E_w(s) = G_{we}(s)W(s),\ E_v(s) = G_{ve}(s)V(s). \tag{2.49}$$

Skok polohy $W(s) = \frac{w_0}{s},\ V(s) = \frac{v_0}{s}.$ (2.50)

Skok rychlosti $W(s) = \frac{w_1}{s^2},\ V(s) = \frac{v_1}{s^2}.$ (2.51)

Skok zrychlení $W(s) = \frac{2w_2}{s^3},\ V(s) = \frac{2v_2}{s^3}.$ (2.52)



Obrázek 2.92 - Průběh testovacích signálů pro výpočet trvalých regulačních odchylek

Pro komplexní zhodnocení kvality regulačního pochodu jsou velmi vhodná integrální kritéria, která udávají velikost regulační plochy. Čím bude regulační plocha menší, tím bude kvalita větší. Nejčastěji se používají následující integrální kritéria.
Lineární regulační plocha (IE – Integral Error) – pouze pro pochody bez překmitu, lze řešit analyticky.

$$I_{IE} = \int_0^\infty e(t)dt$$

Absolutní regulační plocha (IAE – Integral Absolute Error) – vhodná i pro pochody s překmitem, nelze řešit analyticky.

$$I_{IAE} = \int_0^\infty |e(t)|dt$$

Kvadratická regulační plocha (ISE – Integral Square Error) – vhodná pro pochody s překmitem, lze řešit analyticky, může nabývat vysokých hodnot

.

$$I_{ISE} = \int_0^\infty e^2(t)dt$$

ITAE - Integral Time Absolute Error – zohledňuje dobu regulace.

$$I_{ITAE} = \int_0^\infty t|e(t)|dt$$

Příklad 2.21. *Výpočet trvalých regulačních odchylek*

Vypočítejte trvalé regulační odchylky řízení pro skok polohy, rychlosti a zrychlení.

$$G_R(s) = k_p(1 + \frac{1}{T_I s}) \quad G_S(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}.$$

Řešení:

$$e_w(\infty) = \lim_{s\to 0} sE_w(s)$$

$$E_w(s) = G_{we}(s)W(s)$$

$$G_{we}(s) = \frac{1}{1 + G_R G_S} = \frac{1}{1 + \frac{k_1 k_p (T_I s + 1)}{T_I s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}} = \frac{T_I s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{T_I s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + k_1 k_p (T_I s + 1)}$$

Pro skok polohy

$$e_w(\infty) = \lim_{s\to 0} sG_{we}(s)W(s) = \lim_{s\to 0}\left[s \frac{T_I s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{T_I s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + k_1 k_p (T_I s + 1)} \frac{W_0}{s} \right] = 0$$

Pro skok rychlosti

$$e_w(\infty) = \lim_{s\to 0} sG_{we}(s)W(s) = \lim_{s\to 0}\left[s \frac{T_I s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{T_I s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + k_1 k_p (T_I s + 1)} \frac{W_1}{s^2} \right] = \frac{T_I W_1}{k_1 k_r}$$

Pro skok zrychlení

$$e_w(\infty) = \lim_{s\to 0} sG_{we}(s)W(s) = \lim_{s\to 0}\left[s \frac{T_I s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{T_I s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1) + k_1 k_p (T_I s + 1)} \frac{2W_2}{s^3} \right] = \infty$$

Shrnutí pojmů 2.9.

Kapitola se věnuje popisu kvality regulačního pochodu v časové oblasti a to jak pomocí průběhu odezvy regulačního pochodu, tak pomocí integrálních kritérií.

Otázky 2.9.

1. Vznikne trvalá regulační odchylka v regulačním obvodu bez integrátoru a se skokem polohy žádané hodnoty?
2. K čemu slouží integrální kritéria?
3. Jak se určí doba regulace?

Úlohy k řešení 2.4.

1. Vypočítejte trvalé regulační odchylky řízení pro skok polohy.
   $G_R(s) = k_p(1 + T_D s + \frac{1}{T_I s})$ $G_S(s) = \frac{3k_1}{s(T_1 s + 1)^2}$
2. Vypočítejte trvalé regulační odchylky poruchy pro skok polohy.
   $G_R(s) = k_p(1 + T_D s)$ $G_S(s) = 3(T_1 s + 4) + T_1 T_2 + 8$

2.10. Syntéza regulačních obvodů

Čas ke studiu: 2 hodin

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat pojem syntéza regulačního obvodu.
- popsat čtyři metody syntézy regulačních obvodů (Zieglerovy – Nicholsovy metody, metodu požadovaného modelu).
- popsat způsoby identifikace naměřených přechodových charakteristik.
- seřídit regulátor metodou kritických parametrů.

Výklad

Syntézou regulačních obvodů rozumíme návrh struktury regulačního obvodu a jeho parametrů tak, aby obvod splňoval požadavky kladené na regulační pochod. Do syntézy zahrnujeme pouze teoretický návrh regulačního obvodu a nikoliv i následnou volbu technické realizace návrhu. Při návrhu regulačního obvodu však vycházíme z provozních podmínek (např. rozměry a hmotnost zařízení, pracovní prostředí, režim provozu apod.), kladených na regulační obvod.

Můžeme se setkat s těmito výchozími předpoklady pro syntézu:

1. Můžeme libovolně měnit strukturu i parametry regulačního obvodu a jsme omezeni jen splněním podmínek fyzikální realizovatelnosti.
2. Je zadaná část struktury i část parametrů regulačního obvodu.
3. Struktura obvodu je plně zadána a jsou zadány i některé parametry regulačního obvodu.

První případ se v praxi vyskytuje pouze ojediněle, většina regulačních obvodů patří pod bod 3. Jsou to obvody, které lze rozdělit na regulovanou soustavu a regulátor. Úloha syntézy se zde redukuje pouze na určení stavitelných parametrů regulátoru. Vhodnost správné volby typu regulátoru a jeho parametrů můžeme ověřit jednak simulací na matematickém modelu navrženého regulačního obvodu a jednak provozními zkouškami regulovaného objektu přímo v provozu.

Pod 2. bod patří regulační obvody, u kterých nelze provést rozdělení na regulovanou soustavu a regulátor. Jsou to např. servomechanismy, regulační obvody sloužící k vlečné regulaci polohy a rychlosti. U těchto regulačních obvodů navrhujeme částečně jak jejich strukturu, tak i jejich parametry.

Při syntéze regulačního obvodu potřebujeme znát:

1. dynamické vlastnosti regulované soustavy (přenos, diferenciální rovnici přechodovou charakteristiku),
2. předpokládaný průběh řídící veličiny,
3. předpokládané průběhy poruchových veličin a místo jejich vstupu do regulované soustavy,
4. omezení akčních veličin (výstupní hodnota z regulátoru nemůže nabývat libovolně velké hodnoty),
5. požadavky na kvalitu regulace.

Pro zjednodušení výpočtu uvažujeme u bodu 2 a 3 jako vstupní veličiny funkce, jejichž matematické vyjádření je snadné a z odezvy regulačního na tyto funkce můžeme posoudit přesnost a kvalitu regulace. Nejčastěji používané funkce jsou jednotkový skok, jednotkový impuls a skok rychlosti a zrychlení vstupního průběhu.

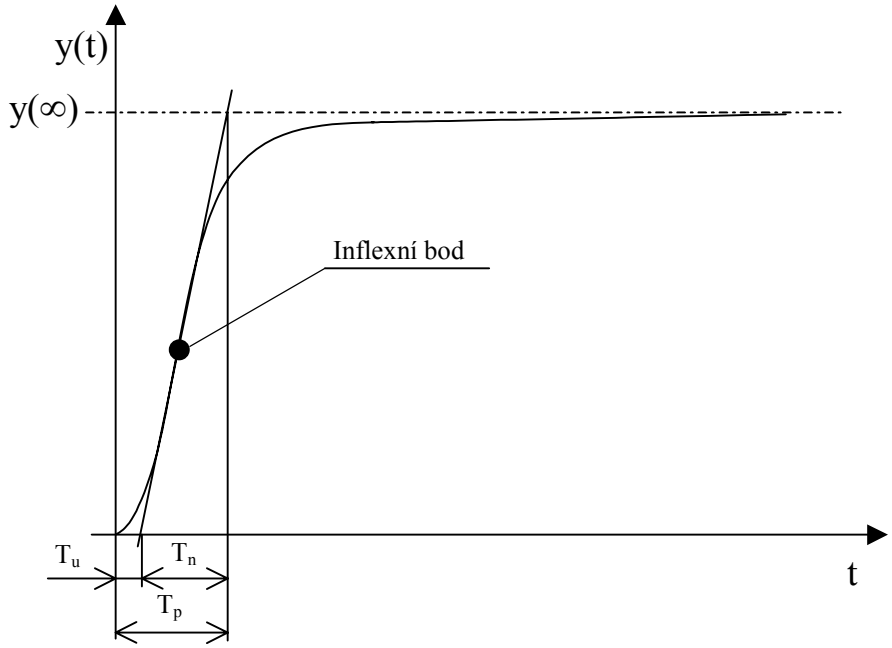
Ziegler-Nicholsova metoda přechodové charakteristiky (1.modifikace)

Tato metoda je použitelná pro lineární spojité i diskrétní regulační obvody. Předpokladem je aperiodická regulovaná soustava (pro regulované soustavy, které nemají přechodovou charakteristiku s překmitem). Vycházíme z odměřené přechodové charakteristiky regulované soustavy, kde určíme tyto parametry:

k_1 – zesílení přenosu proporcionální soustavy 1. řádu

T_u – doba průtahu ($T_u = T_d$ – dopravní zpoždění)

T_n – doba náběhu ($T_n = T_1$ – časová konstanta regulované soustavy)



Obrázek 2.93 - Určení parametrů přechodové charakteristiky regulované soustavy

Následující tabulka nám umožní určit optimální hodnoty stavitelných parametrů.

Tabulka 2.5 - Určení optimálních hodnot stavitelných parametrů regulátoru

Typ regulátoru	k_p^*	T_I^*	T_D^*
P	$\frac{T_n}{T_u \cdot k_1}$		
PI	$0{,}9\frac{T_n}{T_u \cdot k_1}$	$3{,}5\ T_u$	
PD	$1{,}2\ \frac{T_n}{T_u \cdot k_1}$		$0{,}25\ T_u$
PID	$1{,}25\frac{T_n}{T_u \cdot k_1}$	$2\ T_u$	$0{,}05\ T_u$

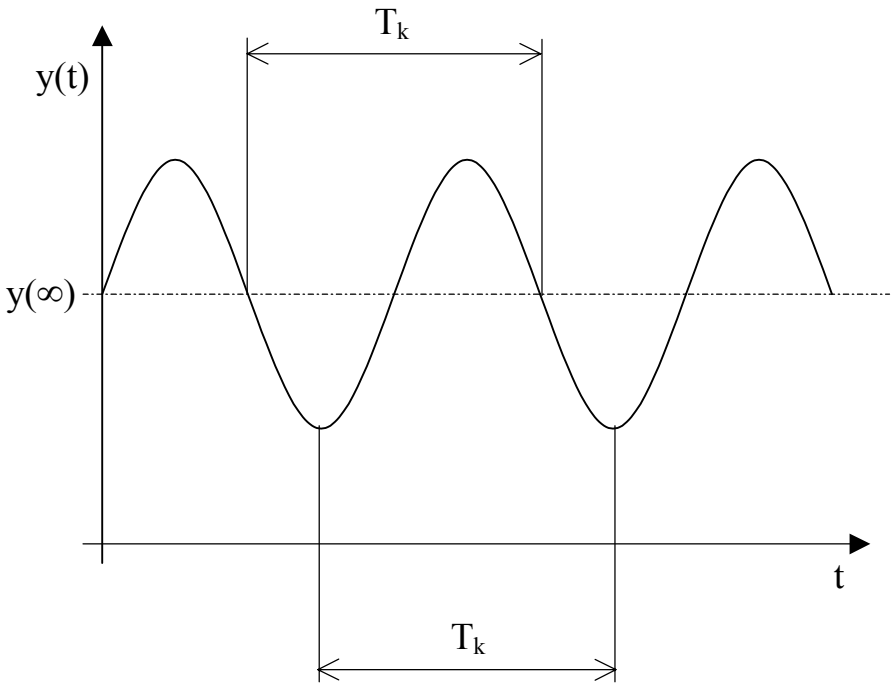
Ziegler-Nicholsova metoda kritických parametrů (2.modifikace)

Tato metoda je použitelná rovněž pro lineární spojité i diskrétní regulační obvody. Princip této metody spočívá v tom, že přivedeme regulační obvod do tzv. kritického stavu, tj. na kmitavou mez stability, přičemž regulátor pracuje pouze s proporcionální složkou a tedy integrační a derivační jsou vyřazeny nastavením $T_D = 0, T_I = \infty$.

a.) experimentální řešení

Postup pro seřizování regulátoru zapojeného do regulačního obvodu:

1. Vyřadíme integrační a derivační složku regulátoru. To provedeme nastavením integrační a derivační konstanty $(T_D \to 0, T_I \to \infty)$.
2. Postupně zvyšujeme zesílení regulátoru k_p, až obvod začne kmitat s konstantní amplitudou (dosáhne kmitavé meze stability). Hodnotu zesílení regulátoru k_p, při kterém regulační obvod dosáhne meze stability, označíme jako kritické zesílení k_{pk}. Periodu kmitů, při které k tomu došlo, pak nazýváme periodu kritických kmitů $T = T_k$.



Obrázek 2.94 - Určení kritické periody

3. Konstanty regulátoru nastavíme s využitím hodnot k_{pk} a T_k viz tabulka 2.6.

Tabulka 2.6 - Optimální hodnoty stavitelných parametrů spojitého regulátoru

Typ regulátoru	k_p^*	T_I^*	T_D^*
P	0,5 k_{pk}		
PI	0,45 k_{pk}	0,83 T_k	
PD	0,4 k_{pk}		0,05 T_k
PID	0,6 k_{pk}	0,5 T_k	0,125 T_k

V případě, že se jedná o čistě integrační regulátor, přivedeme regulační obvod do kritického stavu tím, že zmenšujeme integrační časovou konstantu T_I, až dosáhneme kmitavé

meze stability. Potom je nejvhodnější nastavení integrační časové konstanty $T_I = 2T_K$ pro periodický tlumený průběh regulačního pochodu a $T_I = 4T_K$ pro aperiodický průběh.

b) analytické řešení

Při analytickém řešení musíme vypočítat k_{pk} a T_k, které charakterizují kmitavou mez stability. Využijeme Nyquistovo kritérium stability. Vyřadíme integrační a derivační složky regulátoru $(T_D \to 0, T_I \to \infty)$ a určíme přenos otevřeného regulačního obvodu $G_O(s)$

$$G_o(s) = G_s(s).G_R(s) = \frac{M_o(s)}{N_o(s)}. \qquad (2.58)$$

Určíme reálnou a imaginární část kmitočtového přenosu otevřeného regulačního obvodu. Imaginární část položíme rovnu 0 a určíme kritický kmitočet

$$\mathrm{Im}\{G_0(j\omega)\} = 0 \qquad \Rightarrow \qquad \omega_k. \qquad (2.59)$$

Kritický kmitočet dosadíme do reálné části a ta musí být rovna hodnotě -1 a určíme kritické zesílení.

$$\mathrm{Re}\{G_0(j\omega_k)\} = -1 \qquad \Rightarrow \qquad k_{pk}. \qquad (2.60)$$

Periodu kritických kmitů T_k určíme z kritického kmitočtu dle vztahu

$$\omega_k = \frac{2\pi}{T_k}. \qquad (2.61)$$

Pro výpočet doporučeného seřízení příslušného regulátoru použijeme vztahy, které obsahuje tabulka 2.6.

Příklad 2.22. *Seřízení regulátorů.*

Pro regulovanou soustavu popsanou přenosem $G_S(s)$ seřiďte PID regulátor, použijte metodu kritických parametrů.

$$G_S(s) = \frac{2}{(s+1)^3}.$$

Řešení:

Nejdříve musíme vyřadit integrační a derivační složku regulátoru

$$T_I \to \infty, T_D = 0 \qquad \Rightarrow \qquad G_R(s) = k_p.$$

Teď určíme přenos otevřeného regulačního obvodu

$$G_0(s) = G_R G_S = \frac{2k_p}{(s+1)^3} = \frac{2k_p}{s^3 + 3s^2 + 3s + 1}$$

a vypočítáme kmitočtový přenos otevřeného regulačního obvodu a určíme jeho reálnou a imaginární část

$$G_0(j\omega) = G_0(s)\Big|_{s=j\omega} = \frac{2k_p}{-j\omega^3 - 3\omega^2 + 3j\omega + 1} = \frac{2k_p(1-3\omega^2) + 2k_p j\omega(\omega^2-3)}{(1-3\omega^2)^2 + \omega^2(\omega^2-3)^2},$$

$$\mathrm{Re}\{G_0(j\omega)\} = \frac{2k_p(1-3\omega^2)}{(1-3\omega^2)^2 + \omega^2(\omega^2-3)^2}, \mathrm{Im}\{G_0(j\omega)\} = \frac{2k_p\omega(\omega^2-3)}{(1-3\omega^2)^2 + \omega^2(\omega^2-3)^2}.$$

Teď určíme kritický kmitočet, periodu kritických kmitů a kritické zesílení:

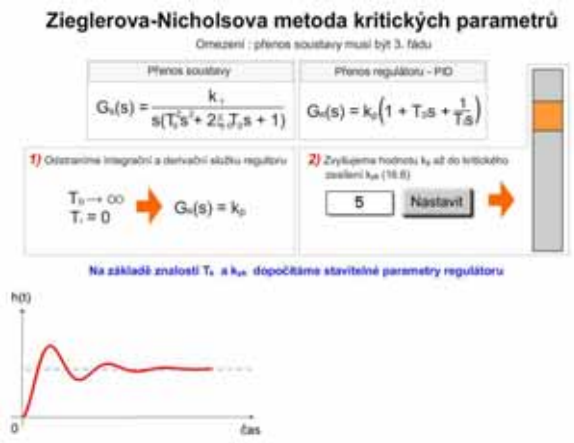
$$\mathrm{Im}\{G_0(j\omega)\} = 0 \quad \Rightarrow \quad 2k_p\omega(\omega^2-3) = 0 \quad \Rightarrow \quad \omega_k = \sqrt{3},$$

$$\mathrm{Re}\{G_0(j\omega_k)\} = -1 \quad \Rightarrow \quad \frac{2k_{pk}(1-3.3)}{(1-3.3)^2 + 3(3-3)^2} = -1 \quad \Rightarrow \quad k_{pk} = 4,$$

$$T_k = \frac{2\pi}{\omega_k} = \frac{2\pi\sqrt{3}}{3}.$$

Na základě tabulky 2.6 můžeme určit hodnoty stavitelných parametrů regulátoru:

$$k_p^* = 0{,}6k_{pk} = 2{,}4$$
$$T_I^* = 0{,}5T_k = 1{,}81$$
$$T_D^* = 0{,}125T_k = 0{,}43$$



Obrázek 2.95 – Animace seřízení RO pomocí metody Ziegler-Nichols

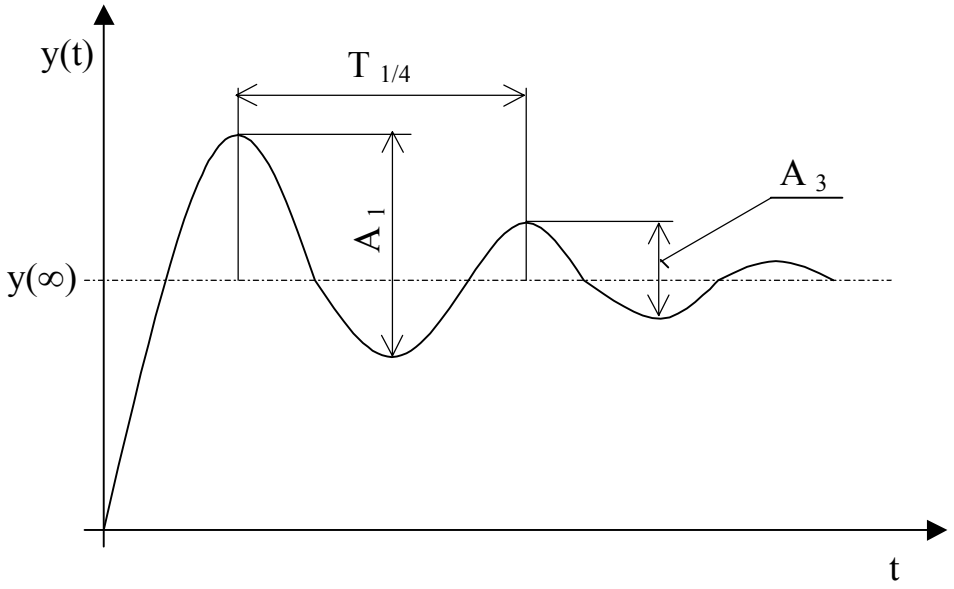
Ziegler-Nicholsova metoda čtvrtinového tlumení (3.modifikace)

Tato metoda je použitelná pro lineární spojité i diskrétní regulační obvody. Řeší pouze experimentálně, analyticky by se dala jen stěží využít. Používá se v případě, že nelze použít rozkmitání na kmitavou mez stability. Opět odstraníme integrační i derivační složky regulátoru ($T_D \to 0, T_I \to \infty$) a hodnotu k_p zvyšujeme tak dlouho, až průběh výstupní (regulované) veličiny bude ve tvaru

$$\frac{A_3}{A_1} = \frac{1}{4}, \tag{2.62}$$

kde A_1, A_3 -amplituda,

čili dojde ke čtvrtinovému tlumení, tzn. dvě po sobě jdoucí amplitudy v poměru 1:4.



Obrázek 2.96 - Určení periody tlumených kmitů $T_{1/4}$

Z průběhu regulované veličiny se stanoví hodnota čtvrtinové periody $T_{1/4}$, viz obrázek 2.96, a ze stupnice regulátoru čtvrtinové zesílení $k_{p1/4}$. Pro zvolený typ regulátoru se určí optimální hodnoty jeho stavitelných parametrů, viz . tabulka 2.7.

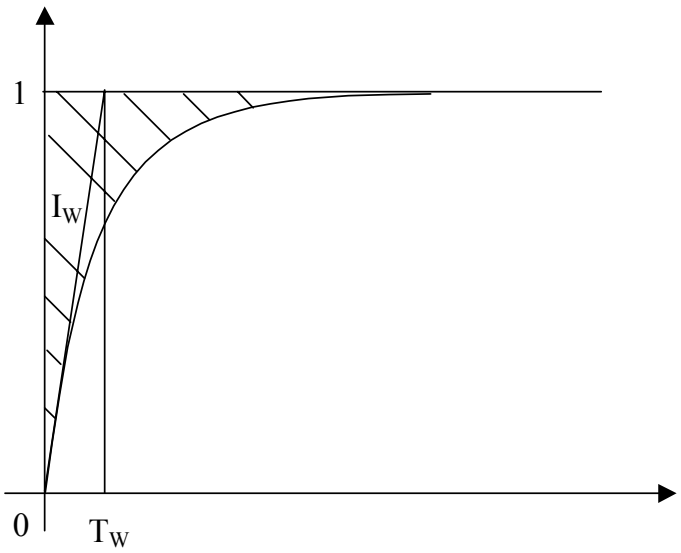
Tabulka 2.7 - Optimální hodnoty stavitelných parametrů regulátoru.

Typ regulátoru	k_p^*	T_I^*	T_D^*
P	$k_{p1/4}$		
PI	$0{,}9\ k_{p1/4}$	$T_{1/4}$	
PID	$1{,}2\ k_{p1/4}$	$T_{1/4}$	$0{,}25\ T_{1/4}$

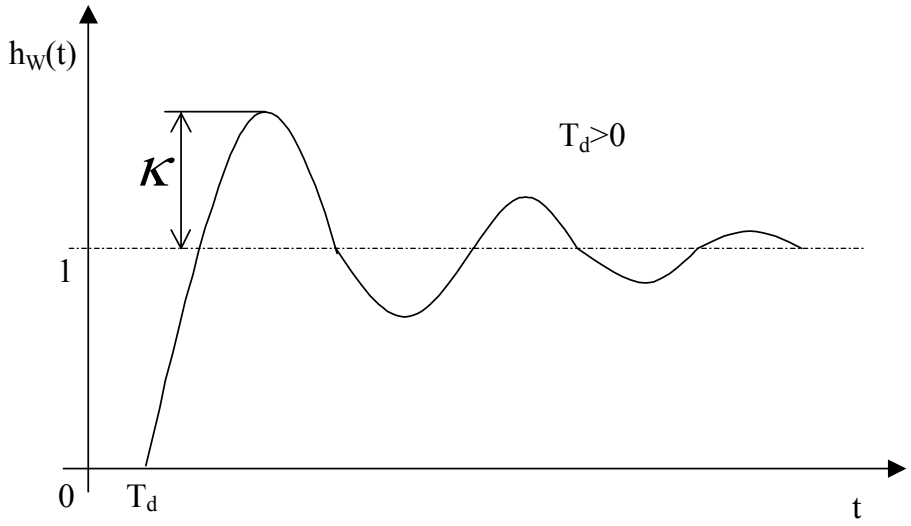
Metoda požadovaného modelu

Tato metoda je použitelná pro lineární spojité i diskrétní regulační obvody, umožňuje snadné a rychlé seřízení standardních typů analogových i číslových regulátorů pro základní typy regulovaných soustav i s dopravním zpožděním. Typ regulátoru je doporučen z hlediska vlastností regulované soustavy a požadavku na nulovou trvalou regulační odchylku

způsobenou skokovou změnou polohy žádané veličiny, resp. poruchy působící na výstupu regulované soustavy. [ŠULC&VÍTEČKOVÁ 2004], [VÍTEČKOVÁ&VÍTEČEK 2006]



Obrázek 2.97 - Předpokládaný průběh přechodové charakteristiky RO pro regulované soustavy bez dopravního zpoždění



Obrázek 2.98 - Předpokládaný průběh přechodové charakteristiky RO pro regulované soustavy s dopravního zpoždění

Pro regulované soustavy bez dopravního zpoždění $(T_d = 0)$ se předpokládá požadovaný aperiodický průběh přechodové charakteristiky $h_W(t)$ uzavřeného regulačního obvodu, viz. obrázek 2.97. Časová konstanta T_W musí být zvolena s ohledem na omezení akční veličiny a maximální nastavitelnou hodnotou zesílení regulátoru $k_{p\max}$ a u regulačního obvodu s číslicovým regulátorem musí platit $T_W > (2 \div 3)T$.

Pro regulované soustavy s dopravním zpožděním ($T_d > 0$) zvolíme požadovaný překmit $\kappa (0 \le \kappa \le 0{,}5)$ přechodové charakteristiky $h_W(t)$ uzavřeného regulačního obvodu podle hodnoty překmitu, viz tabulka 2.9, a určíme parametr *a*.

Podle tvaru přenosu regulované soustavy se určí doporučený typ regulátoru a odpovídající hodnoty jeho stavitelných parametrů, viz tabulka 2.8.

Tabulka 2.8– Parametry pro seřízení regulátorů

	Regulovaná soustava	Typ	k_p^*		T_I^*	T_D^*
			$T_d = 0$	$T_d > 0$		
1	$\frac{k_1}{s} e^{-T_d s}$	P	$\frac{2}{k_1(2T_W + T)}$	$\frac{a}{k_1}$	-	-
2	$\frac{k_1}{(T_1 s + 1)} e^{-T_d s}$	PI	$\frac{2T_I^*}{k_1(2T_W + T)}$	$\frac{aT_I^*}{k_1}$	$T_1 - \frac{T}{2}$	-
3	$\frac{k_1}{s(T_1 s + 1)} e^{-T_d s}$	PD	$\frac{2}{k_1(2T_W + T)}$	$\frac{a}{k_1}$	-	$T_1 - \frac{T}{2}$
4	$\frac{k_1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-T_d s}$ $T_1 \ge T_2$	PID	$\frac{2T_I^*}{k_1(2T_W + T)}$	$\frac{aT_I^*}{k_1}$	$T_1 + T_2 - T$	$\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2} - \frac{T}{4}$
5	$\frac{k_1}{T_0^2 s^2 + 2\xi_0 s + 1} e^{-T_d s}$ $0 < \xi_0 \le 1$	PID	$\frac{2T_I^*}{k_1(2T_W + T)}$	$\frac{aT_I^*}{k_1}$	$2\xi_0 T_0 - T$	$\frac{T_0}{2\xi_0} - \frac{T}{4}$

Pozn. V případě analogových regulátorů T=0.

Tabulka 2.9 – Hodnoty koeficientů

κ	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
β	2,718	1,944	1,720	1,561	1,437	1,337	1,248	1,172	1,104	1,045	0,992
a	0,368	0,514	0,581	0,641	0,696	0,748	0,801	0,853	0,906	0,957	1,008

$$a = \frac{1}{\beta T_d + \alpha T}. \tag{2.63}$$

Pro ideální proporcionální soustavu s dopravním zpožděním, jejíž obrazový přenos má tvar $\frac{k_1}{s} e^{-T_d s}$, je doporučený P-regulátor, kde

$$\text{pro} \quad T_d = 0 \qquad \rightarrow k_p^* = \frac{2}{k_1(2T_W + T)}, \tag{2.64}$$

pro $T_d > 0$ $\rightarrow k_p^* = \frac{a}{k_1}$. (2.65)

❑ Jednoduché aproximační metody

Vzhledem k tomu, že pomocí metody požadovaného modelu lze seřídit regulátory pro regulované soustavy s obrazovým přenosem ve standardním tvaru, uvedeme si jednoduché metody pro aproximaci regulovaných soustav náhradními přenosy. Nejčastěji se používají dále uvedené postupy.

Způsob výpočtu

Z přechodové charakteristiky proporcionální regulované soustavy se určí poměrné hodnoty ustáleného stavu $y_{0,7} = 0,7y_\infty$, $y_{0,33} = 0,33y_\infty$ a odpovídající časy $t_{0,7}$ a $t_{0,33}$., viz obrázek 2.96. Dílčí náhradní zpoždění T_{d1}, T_{d2} a náhradní časová konstanta T_1 (popř. T_2) se vypočtou z některého z následujících vztahů.

1) Pro přenos $G(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)} e^{-T_{d1} s}$,

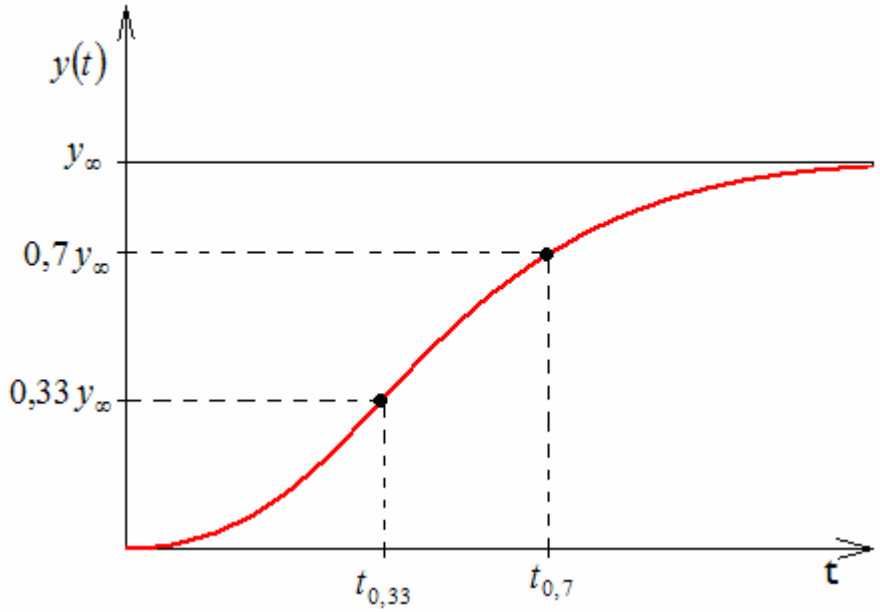
a) $T_{d1} = 1,498 t_{0,33} - 0,498 t_{0,73}$,

$T_1 = 1,245(t_{0,7} - t_{0,33})$,

2) Pro přenos $G(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1)^2} e^{-T_{d2} s}$,

a) $T_{d2} = 1,937 t_{0,33} - 0,937 t_{0,7}$,

$T_1 = 0,794(t_{0,7} - t_{0,33})$,



Obrázek 2.96 - Aproximace pomocí dvou bodů odezvy

Pro regulované soustavy s obrazovým přenosem ve tvaru $\frac{1}{(T_n s+1)^n} e^{-T_{dn} s}$ je možno vypočítat přímo základní tvary podle převodní tabulky 2.10.

Tabulka 2.10 – Převodní tabulka

$\frac{1}{(T_n s+1)} e^{-T_{dn} s}$	n	1	2	3	4	5	6
$\frac{1}{T_1 s+1} e^{-T_{d1} s}$	$\frac{T_1}{T_n}$	1	1,568	1,980	2,320	2,615	2,881
	$\frac{T_{d1}-T_{dn}}{T_n}$	0	0,552	1,232	1,969	2,741	3,537
$\frac{1}{T_2 s+1} e^{-T_{d2} s}$	$\frac{T_2}{T_n}$	0,638	1	1,263	1,480	1,668	1,838
	$\frac{T_{d2}-T_{dn}}{T_n}$	-0,352*	0	0,535	1,153	1,821	2,523

* - $T_{d1} \geq 0{,}352 T_1$

Další způsoby aproximace (např. náhrada malých časových konstant) jsou uvedeny v [VÍTEČKOVÁ&VÍTEČEK 2006.].

Shrnutí pojmů 2.10.

Kapitola je věnována syntéze regulačních obvodů a jsou zde popsány čtyři metody seřízení regulátorů a to tři modifikace Zieglerových-Nicholsových metod a metoda požadovaného modelu. Na závěr jsou popsány možnosti zjednodušení přenosů regulovaných soustav.

Otázky 2.10.

1. Jak se jmenuje metoda seřízení regulátoru, která byla odvozena na katedře ATŘ - 352?
2. Jaké označení má experimentální postup seřizování regulačních obvodů?
3. Co je to kritické zesílení?
4. Jak vypočteme vzorkovací periodu?

Úlohy k řešení 2.5.

1. Určete stavitelné parametry zadaného regulátoru.

$$G_S(s) = \frac{1}{(10s+1)(s+1)}$$ PID regulátor

2. Určete stavitelné parametry zadaného regulátoru.

$$G_S(s) = \frac{k_1}{s(T_0^2 s^2 + 2T_0\xi_0 s + 1)}$$ PID regulátor

3. Určete stavitelné parametry zadaného regulátoru.

$$G_S(s) = \frac{3}{(8s+1)^3}$$ PID regulátor

4. Určete stavitelné parametry zadaného regulátoru.

$$G_S(s) = \frac{1}{(10s+1)(s+1)(0{,}1s+1)}$$ PI regulátor

Další zdroje

[1] BALÁTĚ, J. 2003. *Automatické řízení*. Praha: Nakladatelství BEN, 2003, 654 s. ISBN 80-7300-020-2.

[2] BOLTON, W. 1992. *Control engineering*. New York: Longman scientific & Technical, 1992. 327s. ISBN 0-582-09729-0.

[3] DORF, R. C. & BISHOP, R. H. 1998: *Modern Control Systems*. Addison-Wesley : Harlow England 1998. ISNB 0-201-30864-9.

[4] FARANA, R. aj. 1996. *Programová podpora simulace dynamických systémů.*

Sbírka řešených příkladů. 1 vyd. Ostrava: KAKI 1996, 114 s. ISBN 80-02-01129-5.

[5] KATEDRA ATŘ. *Webový informační systém katedry*. Ostrava : Katedra ATŘ, VŠB-TU Ostrava. Dostupný z webu: <URL: http://www.352.vsb.cz>.

[6] KATEDRA MECHATRONIKY. *Webový informační systém katedry*. Liberec : Katedra MECHATRONIKY, TU Liberec. Dostupný z webu: <URL: http://www.fm.vslib.cz/>.

[7] ŠULC, B.&VÍTEČKOVÁ, M. 2004. *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. 1. vyd. Praha : Vydavatelství ČVUT, Praha, 2004. 333 s. ISBN 80-01-03007-5.

[8] ŠVARC, I. 1992. *Teorie automatického řízení I.* Brno: FS VUT, 1992. 210 s.

[9] ŠVARC, I. 2002. *Automatizace/Automatické řízení.* Brno: Nakladatelství CERM, 2002, ISBN 80-214-2087-1.

[10] VÍTEČKOVÁ, M. 2005. *Slovníky L- a Z- transformace s řešenými příklady*. Ostrava, KAKI 2005. 71 s. ISBN 80-248-0851-X.

[11] VÍTEČKOVÁ, M. 1989. POLOKOVÁ , J. *Logaritmické kmitočtové charakteristiky*. Ostrava: VŠB-TUO, 1989. 54s. Doplňkový učební text.

[12] VÍTEČKOVÁ, M.&VÍTEČEK, A. 2006. *Základy automatické regulace*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava 2006. 198 s. ISBN 80-248-1068-9.

3 TECHNICKÉ PROSTŘEDKY ŘÍZENÍ

3.1. Základní pojmy

Čas ke studiu: 0,5 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat přístrojovou skladbu regulačního obvodu – analogového, diskrétního.

Výklad

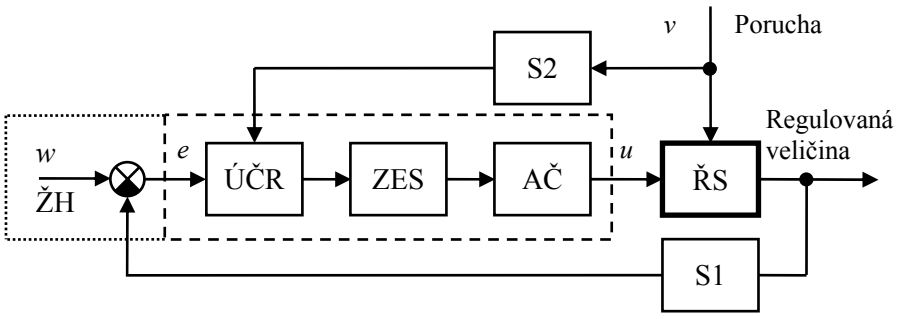
Tato kapitola se zabývá technickými prostředky pro logické, analogové a číslicové řízení. Doplňuje kapitoly pojednávající o teoretických základech vyjmenovaných způsobů řízení a regulaci.

Logické řízení a ovládání

Kapitola o logickém řízení obsahovala stručný popis základních elektronických prvků a složitých technických prostředků, jako jsou programové automaty. V této kapitole bude doplněna o prvky pneumatické a hydraulické, které lze také použit k logickému řízení. Jsou to například systémy elektropneumatického řízení pro různé výrobní a montážní linky.

Regulační obvod

Abstraktní rozdělení regulačního obvodu do dvou bloků představujících regulátor R a řízenou soustavu S lze z hlediska technického řešení dále podrobněji specifikovat. Podrobnější členění obvodu než je zmíněný matematický model, je znázorněno na obrázku 3.1. Toto schéma obsahuje prvky používané v analogovém regulačním obvodu. Na rozdíl od modelu jsou rovněž vyznačeny snímače regulované veličiny a poruchy.



Obrázek 3.1 – Regulační obvod se zpětnou vazbou

Analogový regulační obvod obsahuje mimo řízenou (regulovanou) soustavu ŘS tyto komponenty

- Regulátor
- S1 - snímač regulované veličiny y, který mění tuto veličinu na obvykle elektrický signál
- S2 - snímač poruchy v, který má stejnou funkci jako snímač S1

- Rozdílový člen pro výpočet regulační odchylky $e = w - y$
- ŽH – nastavení žádané hodnoty

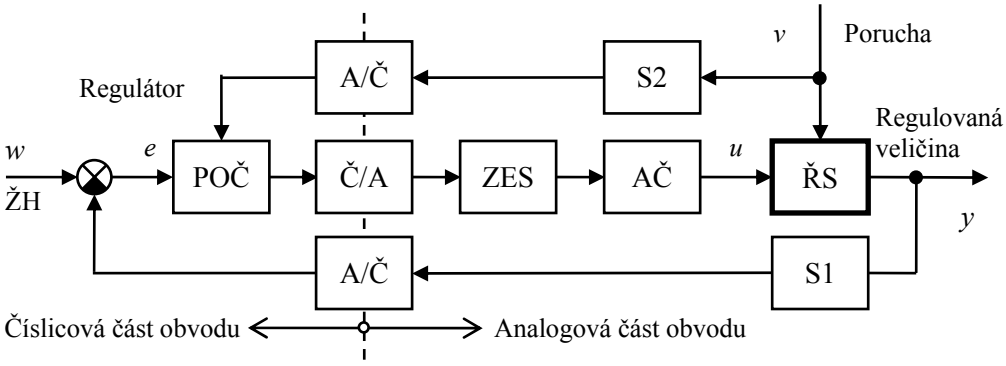
  Analogový regulátor se skládá z dílčích komponent
- ÚČR – ústřední člen regulátoru, který obsahuje obvody dynamických korekcí regulační odchylky
- ZES – zesilovač upravující výkonově výstup ÚČR tak, aby mohl ovládat akční člen
- AČ – akční člen určující akční veličinu u, která ovlivňuje řízenou soustavu.

Je třeba poznamenat, že rozdílový člen a zadání žádané hodnoty jsou součástí analogového regulátoru, na kterém jsou svorky pro signál regulované veličiny a poruchy a na jeho čelním panelu je nastavovací prvek (např. potenciometr, atd.). Obecně nemusí akční člen náležet k regulátoru, ale může být považován jako součást řízené soustavy. Pro některou variantu technického vybavení může splývat také zesilovač buď s akčním členem nebo ústředním členem regulátoru. Varianty tedy jsou

ÚČR + ZES = **R** a AČ + ŘS = **S** nebo ÚČR + ZES + AČ = **R** a ŘS = **S**.

Na příkladu analogového regulačního obvodu průtoku vzduchu bez měření poruchy si lze význam jednotlivých bloků vysvětlit. Průtok je snímán například diferenčním tlakem na cloně v potrubí s korekcemi na teplotu, tlak. Signál průtoku pro regulátor, který je výstupem snímače S1, je připojen k regulátoru. Jak již bylo řečeno, regulátor obsahuje rozdílový člen a zadávací prvek pro průtok. Odchylka je vstupem do dynamického korekčního členu, který tvoří nízkovýkonové elektronické prvky. Výstup tohoto členu je třeba zesílit tak, aby tento signál mohl ovládat servomotor pro natáčení clony v potrubí. Komplet servomotoru, převodu na páku spojenou se clonou lze považovat za akční člen.

Diskrétní regulační obvody obsahují navíc oproti analogovému obvodu převodníky, které zajišťují převody analogových veličin na číslicové a zpět číslicové veličiny na analogové.



Obrázek 3.2 – Diskrétní regulační obvod se zpětnou vazbou

Blokové schéma diskrétního regulačního obvodu je znázorněno na obrázku 3.2. Funkci ústředního členu regulátoru plní číslicový počítač POČ. Tento prvek může být rozdílných vlastností nebo výpočetního výkonu a kapacity paměti. Řešením pro nejjednodušší úlohy je mikropočítač třídy PIC. Složitější úlohy jsou řešitelné pomocí PLC, které obvykle podporují také zpětnovazební řízení pro malý počet regulačních obvodů. Nejsložitější úlohy lze řešit pomocí PC v průmyslovém provedení.

Funkce převodníků A/Č a Č/A byla popsána v části skript popisujících programové logické automaty (PLC). Převodník Č/A plní současně funkci tvarovače nultého řádu, tj. paměti analogové veličiny mezi okamžiky výpočtu velikosti akční veličiny.

Ostatní prvky číslicového regulačního obvodu plní stejné funkce jako u analogového obvodu.

Obecné rozdělení technických prostředků zpětnovazebního řízení

Technické prostředky budou proto rozděleny na

- snímače získávající z vnějšího prostředí řídicího systému informace o velikosti různých veličin
- regulátory transformující získané informace na akční zásahy podle určité strategie
- akční členy vykonávající akční zásahy vně řídicího systému.

Regulační technika, zvláště snímače a akční členy, se vyvíjela podle aplikačních oborů. Hrubé dělení lze provést na tyto obory

- Tepelná technika – regulace teploty, dodávky tepla, průtoků, atd.
- Chemie – stejné regulační obvody jako u tepelné techniky, navíc regulace složení
- Regulace toku materiálu – kontinuální výrobní procesy v hutích a ve výrobě stavebních hmot
- Polohová regulace a regulace otáček – regulace pro obráběcí stroje, válcovací tratě.

Nově se vyvíjí aplikace v dopravních prostředcích (automobily, lodě, letadla).

Otázky 3.1.

1. Z čeho se skládá analogový regulační obvod?
2. Čím se liší analogový regulační obvod od diskrétního?

3.2. Pneumatické a hydraulické systémy pro řízení a ovládání

Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

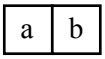
- popsat rozvaděč a jeho části.
- popsat funkci rozvaděče.
- popsat způsoby ovládání pneumatický a hydraulických prvků.

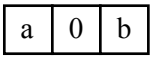
Výklad

V této kapitole budou popsány pneumatické systémy řízení umožňující změnit polohu ovládaného zařízení nebo zařízení spustit a zastavit. V těchto systémech nejde o zpětnovazební řízení, ale o logické řízení. Například je přestavován hydraulický válec do dvou krajních poloh. Popis pneumatických a hydraulických regulátorů pro zpětnovazební řízení je zařazen do kapitoly o analogových regulátorech. Tato kapitola je považována za úvod k problematice pneumatických a hydraulických systémů.

Hydraulické a pneumatické obvody

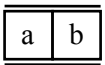
Prvky, které ovládají proudění a přívod stlačeného vzduchu nebo kapaliny k pracovním strojům, se nazývají ventily. Ventily umožňující jednoduché řízení směru pohybu hydromotoru nebo obecně řízení směru průtoku, případně jeho přehrazení, se nazývají rozváděče. Rozváděče mohou mít více poloh (vícepolohové ventily) nebo jinak řečeno stavů, například klidový stav (polohu) nebo aktivovaný stav (polohu). Jednotlivé polohy (stavy) jsou znázorněny symbolem okénka (políčka) a jsou uspořádány vedle. Platí, že počet poloh je shodný s počtem políček.

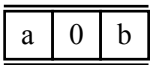




Výchozí poloha rozvaděče je stav po zapnutí systému, tj. po přivedení tlaku. Klidová poloha je u rozváděčů s vratnou pružinou taková poloha, která není aktivována. Ve schématech jsou přívody tlakového media kresleny k okénku, které odpovídá nulové nebo výchozí poloze. Aktivovaná poloha je opakem ke klidové poloze. Další hledisko k označování poloh rozvaděče je podle jeho průchodnosti. Průchozí poloha odpovídá stavu, kdy ventilem protéká pracovní medium k místu využití. Naproti tomu uzavřená poloha je neprůchozí pro médium k místu jeho pracovního využití. Stavy mohou být značeny písmeny uvnitř okénka. Přívody jsou kresleny k okénku odpovídajícímu výchozímu (klidovému) stavu. Aktivování rozváděče pomyslně přesouvá okénka z výchozí polohy tak, aby přívody mířily k příslušnému okénku, který je funkční v aktivovaném stavu.

Pro úplnost je označení rozvaděče nebo ventilu bez stabilní polohy, tj. se spojitým přesunem bloků doplněno následujícím způsobem

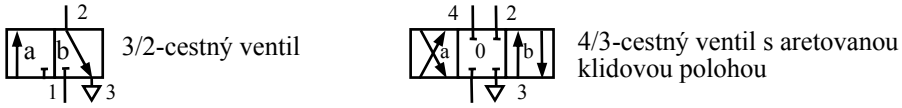




Tyto prvky jsou označovány jako proporcionální ventily a budou popsány později.

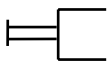
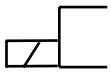
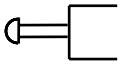
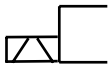
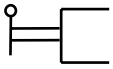
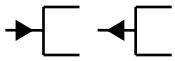
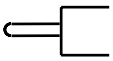
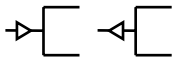
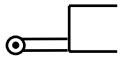
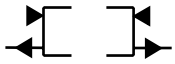
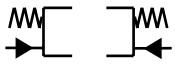
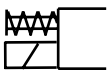
Označení druhu pracovního média a kreslení výstupů je znázorněno na následujících obrázcích.

Ve zkráceném označování rozváděčů je uveden počet řízených propojovaných přívodů (cest z okolí) a počet jeho poloh (stavů). Například označení 3/2-cestný ventil znamená, že jde o ventil třícestný a dvoupolohový. Na následujícím obrázku je příklad 3/2-cestného a 4/3-cestného ventilu (rozváděče) s očíslovanými přívody a vývody. Vývody jsou také nakresleny u bloku, který odpovídá klidovému stavu.



Polohy (stavy) ventilů (rozváděčů) se ovládají různými způsoby. Přehled schématického značení některých způsobů ovládání polohy ventilu je v tabulce 3.1. Popis k jednotlivým značkám dává stručnou představu, jak ke změně polohy ventilu dochází.

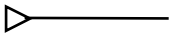
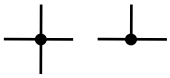
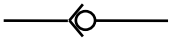
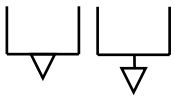
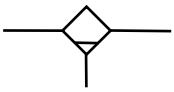
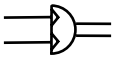
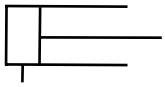
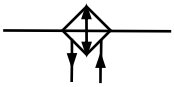
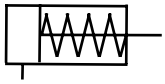
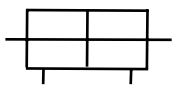
Tabulka 3.1 – Některé značky pro způsoby ovládání pneumatických a hydraulických prvků

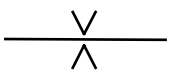
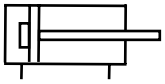
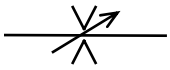
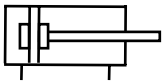
Značka	Popis způsobu ovládání	Značka	Popis způsobu ovládání
	obecné manuální ovládání		elektrické ovládání elektromagnetem s jedním vinutím
	manuální ovládání tlačítkem		elektrické ovládání elektromagnetem se 2 vinutími
	manuální ovládání pákou		přímé ovládání hydraulické přivedením a uvolněním tlaku
	mechanické ovládání páčkou nebo tlačítkem		přímé ovládání pneumatické přivedením a uvolněním tlaku
	mechanické ovládání kladkou		tlakové centrování
	mechanické ovládání pružinou		pružinové centrování
	elektromagnetem nebo manuálně se zpětnou pružinou		západka aretuje ventil v určitých polohách

K nakreslení pneumatického nebo hydraulického obvodu je třeba znát pravidla a značky základních prvků těchto obvodů. Přehledově jsou některé vybrané značky uvedeny v tabulce 3.2. Výběr byl proveden tak, aby bylo možné rozumět aspoň základním obvodům.

Jak je zřejmé, značky jsou společné pro hydraulické a pneumatické prvky. Odlišení obvodu se vzduchem a kapalinou je ve značce na vedení nebo uvnitř kompresoru nebo motoru. Plná šipka (hrot tvaru trojúhelníku) označuje kapalinu a šipka s prázdným vnitřkem vzduch. I když jsou značky kresleny pro vzduch, záměnou zmíněného označení platí také pro kapalinu.

Tabulka 3.2 – Některé značky používané ve schématech pneumatických a hydraulických systémů

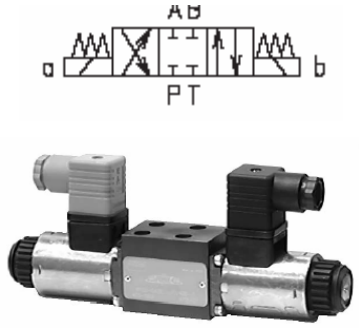
Značka	Funkce		
	proudění kapaliny		proudění vzduchu
	provozní, zpětné a napájecí vedení, přívod energie		řídicí vedení k přenosu tlakových řídicích signálů
	odvedení přebytečného nebo unikajícího media		zdroj tlaku, přípojka tlakového vzduchu
	spoje		zpětný ventil
	tlakoměr		zpětný ventil s pružinou
	výstup média (odlehčovací kanál, odfuk)		elektromotor
	zásobník stlačeného vzduchu		kompresor
	odlučovač kondenzátu		pneumatický motor pro jeden směr pohybu
	filtr k oddělení pevných nečistot		pneumatický motor pro oba směry pohybu
	zvlhčovač (olejovač), rozprašovač maziva		kyvný motor s omezeným úhlem otočení
	chladič plynu nebo kapaliny bez označení přívodů		jednočinný pneumatický válec - zpětný pohyb vnější silou
	chladič s přívody		jednočinný pneumatický válec - zpětný pohyb vratnou pružinou
	škrtící prvek, clona, dýza		dvojčinný pneumatický válec s jednostrannou pístní tyčí (pístnicí)
	Stavitelný škrticí ventil		dvojčinný pneumatický válec s oboustrannou pístní tyčí (pístnicí)

Značka	Funkce		
	clona		válec s vnitřním tlumením na dně (podrobná značka)
	stavitelná clona		válec s oboustranným vnitřním tlumením (podrobná značka)

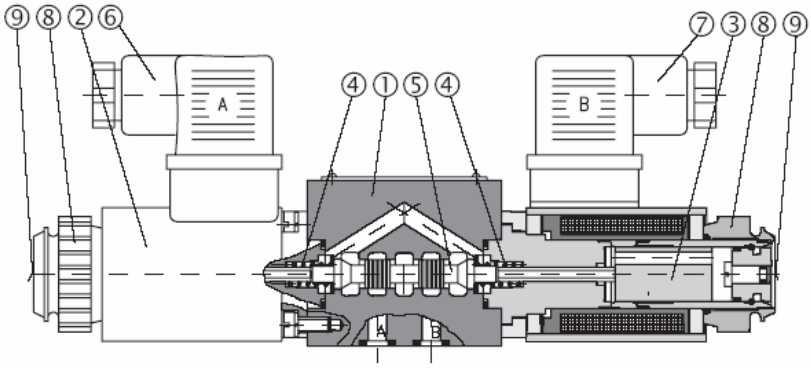
Příklad provedení rozvaděče

Podle konstrukce se rozváděče dělí na sedlové nebo šoupátkové. U sedlového ventilu je uzavíracím tělesem kulička, kužel, kotouč nebo talíř. U šoupátkových ventilů jsou vývody ovládány pomocí pístového šoupátka. Ventily s plochým šoupátkem mají uzavírací plochy rovinné.

Příkladem elektromagneticky ovládaného rozváděče je řada výrobků firmy ARGO-HYTOS a.s. s označením RPE2-04. Jsou to šoupátkové rozváděče 4/3, 4/2 a 3/2 pro tlak 32 MPa a průtok 20 dm^3/min. Rozváděč je znázorněn na obrázku 3.3 a jeho řez na obrázku 3.4.



Obrázek 3.3 – Rozváděč HYTOS RPE2-04



Obrázek 3.4 – Řez rozváděčem HYTOS RPE2-04

Rozváděče se skládají z litinového tělesa (1), válcového šoupátka (5), vratných pružin (4) a ovládacích elektromagnetů (2, 3). Třípolohové rozváděče mají vždy dva ovládací elektromagnety a dvě vratné pružiny. Jestliže některou cívkou protéká proud, přesune se rozváděč z nulové do jedné z krajních poloh. Dvoupolohové rozváděče mají jednu vratnou pružinu a jeden ovládací elektromagnet, nebo dva ovládací elektromagnety a aretaci polohy válcového šoupátka. Ovládací elektromagnety jsou napájeny stejnosměrným proudem přes konektorové nástrčky A, B (6, 7) bez usměrňovače, nebo střídavým proudem přes konektorové nástrčky A, B (6, 7) s usměrňovačem. Po povolení upevňovací matice (8) lze elektromagnety (2, 3) natáčet kolem osy v rozsahu 360°. Do výše tlaku 2,5 MPa v kanálu „T“ lze rozváděče ovládat nouzovým ručním ovládáním (9)..

Otázky 3.2.

1. K čemu se používají rozvaděče?
2. Jaká je značka pro zásobník stlačeného vzduchu?

3. Jaká je značka pro jednočinný pneumatický válec?

3.3. Analogové regulátory pro zpětnovazební řízení

Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat analogové regulátory a jejich realizaci.
- popsat příklady jednoduchých mechanických regulátorů - Wattův rozněžním, splachovadlo, tlaková nádoba.

Výklad

Analogové regulátory lze rozdělit také podle druhu měronosné veličiny, která předává informaci do regulátoru, a způsobu zacházení s touto informací uvnitř regulátoru. Typickou měronosnou veličinou je elektrické napětí, které se přenáší párem vodičů. Jinou měronosnou veličinou je poloha například páky. Další měronosnou veličinou je tlak vzduchu nebo oleje. Tlakový signál se přenáší tzv. impulsním potrubím (pro vzduch typicky průměr 6 mm). Typy regulátorů jsou

- elektrické (zpracovávají elektrické napětí, výstup rovněž elektrický)
- mechanické (přenášejí pohyb na jiný pohyb)
- pneumatické (vstup je tlak vzduchu nebo mechanický pohyb a nebo elektrický signál, výstup tlak vzduchu)
- hydraulické (vstup je tlak kapaliny nebo mechanický pohyb a nebo elektrický signál, výstup tlak kapaliny)

Regulátory lze dělit také podle zdroje energie, kterou ke své činnosti potřebují. Jsou to

- direktní regulátory, které nepotřebují vnější přívod energie (např. splachovadlo)
- indirektní regulátory s vnějším přívodem energie (všechna elektrická zařízení)

Posledním hlediskem bude matematický popis chování regulátoru. Regulátory jsou rozděleny na

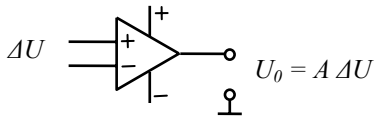
- lineární – matematický popis představuje lineární algebraická nebo diferenciální a nebo diferenční rovnice, většinou to jsou regulátory typu PID
- nelineární – modelem je nelineární rovnice, často s nespojitostí závislosti výstupu na vstupu, tj. regulační odchylce.

❑ Elektronické regulátory

Nejrozšířenějším typem elektronického regulátoru je regulátor PID. Jedná se o lineární regulátor, jehož výstup obsahuje součet složek proporcionální, derivační, a složku integrační

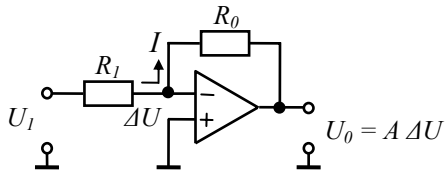
reagující na rychlost změny regulační odchylky úměrnou časovému integrálu regulační odchylky. Výstup tohoto regulátoru působí v čase spojitě.

Základním stavebním prvkem elektronického regulátoru je operační zesilovač. Obvodová značka a označení napětí je na obrázku 3.5. Vstup tohoto zesilovače je symetrický - diferenciální, tj. reaguje na rozdíl dvou napěťových signálů ΔU přivedených na dvě vstupní svorky. Výstup tohoto zesilovače U_0 je nesymetrický, tj. napěťový proti společné zemi (s nulovým elektrickým potenciálem).



Obrázek 3.5 – Operační zesilovač

Napájecí napětí operačních zesilovačů je ±12 V ss nebo ±15 V ss pro rozsah pracovních napětí ±10V. Operační zesilovač zesiluje i stejnosměrná napětí narozdíl od zesilovačů známých z audiotechniky. Tyto zesilovače jsou charakteristické vysokou vstupní impedancí a vysokým zesílením A, řádově například 10^5. Toto zesílení není časově stálé a proto se tento zesilovač doplňuje zpětnou vazbou tak, aby se zesílení omezilo na hodnoty o mnoho řádů méně, například 100.



Obrázek 3.6 – Invertující zesilovač

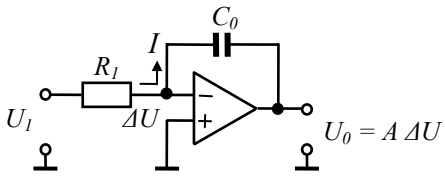
K tomuto účelu jsou využity elektrické odpory R_1 a R_0 v zapojení podle obrázku 3.6. První odpor je připojen na invertující vstup zesilovače a druhý odpor spojuje tento vstup s výstupem a tvoří zpětnou vazbu. Neinvertující vstup zesilovače je uzemněn. Ve skutečném zapojení je do tohoto spojení vložen odpor shodný s odporem R_1. Napěťový rozsah výstupního napětí tohoto obvodu je ±10 V.

Vzhledem k obrovskému zesílení odpovídá na vstupu zesilovače diferenční napětí maximálně desetiny milivoltu a lze jej zanedbat. Invertující vstup zesilovače je tedy na virtuální nule. Podle předpokladu má zesilovač vysokou vstupní impedanci, proto proud ze vstupu je shodný s proudem I zpětnovazebním odporem. Platí

$$I = \frac{U_1}{R_1} = -\frac{U_0}{R_0} \quad \Rightarrow \quad \frac{U_0}{U_1} = -\frac{R_0}{R_1} \tag{3.1}$$

Zesílení zesilovače je dáno pouze poměrem odporů. Znaménko minus znamená, že zesilovač invertuje, tj. obrací fázi střídavého signálu. Zesilovač se používá k proporcionální složce regulátoru PID. Poměr odporů se volí rak, aby nepřesáhl 100.

Integrátor je další variantou zapojení zpětnovazebního obvodu, viz obrázek 3.7. Místo odporu ve zpětné vazbě je použit elektrický kondenzátor s kapacitou C_0 . Jestliže za impedanci kondenzátoru se dosadí operátorový tvar $1/C_0 s$, pak se rovnice (3.1) změní na Laplaceův přenos

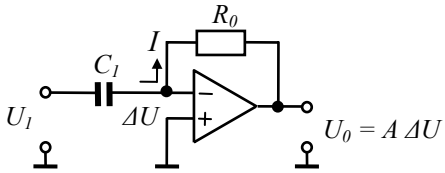


Obrázek 3.7 – Integrátor

$$I = \frac{U_1}{R_1} = -\frac{U_0}{1/C_0 s} \quad \Rightarrow \quad \frac{U_0}{U_1} = -\frac{1}{R_1 C_0 s} \tag{3.2}$$

Přenos vstupního napětí na výstup má tvar integračního článku s časovou konstantou $T_I = R_1 C_0$. Vysvětlit chování tohoto obvodu lze na příkladu jednotkového skoku vstupního napětí. Konstantní proud odporem R_1 nabíjí lineárně v čase kondenzátor, což se projeví vzrůstem výstupního napětí, viz obrázek 3.9 A. Kladný pól kondenzátoru je připojen ke vstupu operačního zesilovače, který má téměř nulový potenciál, proto napětí na výstupu roste do záporných hodnot.

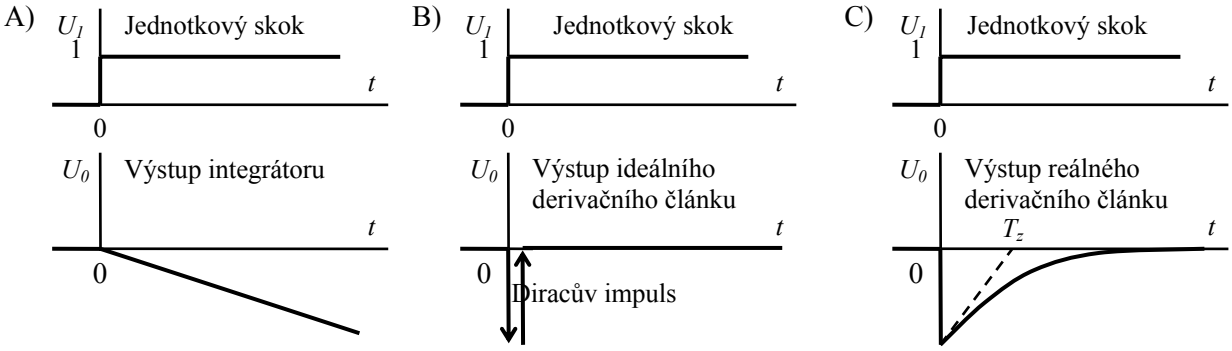
Derivační článek má na rozdíl od integrátoru je elektrický kondenzátor připojen mezi vstup obvodu a invertující vstup operačního zesilovače, viz obrázek 3.8. Kapacita tohoto kondenzátoru je označena C_1. Vzhledem k operátorovému tvaru impedance kondenzátoru se rovnice (3.1) se změní na tvar, který odpovídá Laplaceovu přenosu ideálního derivačního článku.



Obrázek 3.8 – Derivační článek

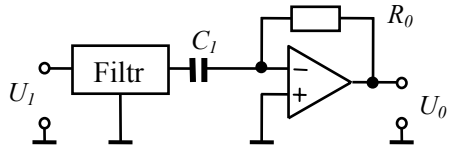
$$I = \frac{U_1}{1/C_0 s} = -\frac{U_0}{R_0} \quad \Rightarrow \quad \frac{U_0}{U_1} = -R_0 C_1 s\,, \tag{3.3}$$

Teoretický průběh výstupního napětí ve tvaru Diracova impulsu na obrázku 3.9 B, jako odezva na skokovou změnu vstupního napětí, není pro omezené napájecí napětí možný. Ideální derivační článek není proto fyzikálně realizovatelný. Nelze připustit skokové změny vstupního napětí, proto je tomuto ideálnímu článku sériově předřazen setrvačný článek (proporcionální soustava prvního řádu), viz obrázek 3.10. Odezva obvodu na skok vstupního napětí se změní na omezený prodloužený impuls, jak je zřejmé z obrázku 3.9 C.



Obrázek 3.9 – Přechodové charakteristiky kanálů I a D elektronického regulátoru

Časová konstanta exponenciálního doznívání odezvy reálného integračního článku T_z je shodná s časovou konstantou zmíněné proporcionální soustavy prvního řádu ve funkci dolnopropustného filtru. Pro přenos napětí platí



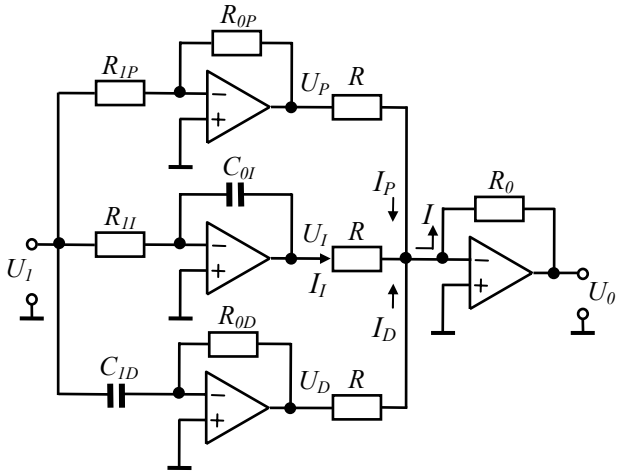
Obrázek 3.10 – Reálný derivační článek

$$\frac{U_0}{U_1} = -\frac{R_0 C_1 s}{1 + T_z s} \tag{3.4}$$

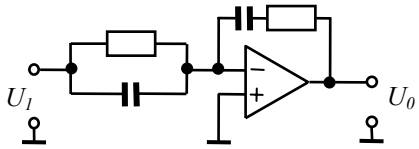
V textu této podkapitoly byly podrobně analyzovány všechny tři typy větví regulátoru typu PID. Zbývá pouze sčítací obvod. Schéma sčítacího obvodu jako součást úplného

regulátoru PID je znázorněno na obrázku 3.11. Do vstupu operačního zesilovače sumačního obvodu se sčítají tři proudy, které se musí rovnat proudu zpětnovazebním odporem. Platí

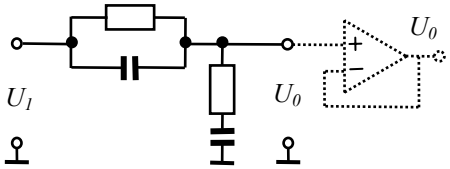
$$I = I_P + I_I + I_D = \frac{U_P}{R} + \frac{U_I}{R} + \frac{U_D}{R} = -\frac{U_0}{R_0} \quad \Rightarrow \quad U_0 = -\left(U_P + U_I + U_D\right) \qquad (3.5)$$



Obrázek 3.11 – Regulátor PID bez interakce nastavení parametrů



Obrázek 3.12 – Regulátor PID s interakcí nastavení parametrů



Obrázek 3.13 – Pasivní zapojení regulátoru PID

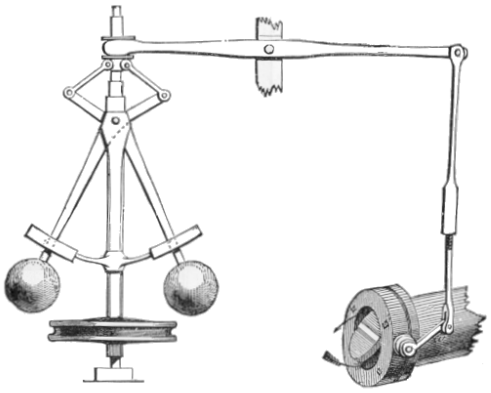
Sériové spojení jednotlivých větví zvlášť a sčítacího obvodu ruší dvojité minus v přenosech napětí. Výsledný obvod má přenos odpovídající regulátoru PID. Velikost kapacity a odporu ovlivňují vždy jeden parametr regulátoru, tj. některou z časových konstant nebo zesílení regulátoru. Tomuto zapojení se říká bez interakce. Naproti tomu zapojení na obrázku 3.12 je sice zdánlivě zjednodušeno na jeden operační zesilovač (druhý invertující je třeba ke správné polaritě výstupního napětí), ale nastavení velikosti kapacity a odporu ovlivňuje všechny parametry přenosu, proto toto zapojení má označení s interakcí.

Zapojení regulátorů na obrázcích 3.11 a 3.12 vyžaduje operační zesilovače, proto je označováno jako zapojení s aktivními prvky. Pasivní zapojení představuje filtr (čtyřpól) na obrázku 3.13. Vlastnosti jednotlivých prvků rovněž ovlivňují všechny parametry tohoto regulátoru. Zatímco výstup všech obvodů s operačními zesilovači bylo možné zatížit odběrem proudu dalšími obvody, pasivní zapojení vyžaduje impedanční oddělovač, tj. zesilovač s velmi vysokým vstupním odporem a zesílením 1. Zapojení tohoto obvodu je naznačeno také v obrázku 3.13.

❑ Mechanické regulátory

Nejstarší regulátory byly sestaveny na principu mechanickém. Od nejstarších dob dávali lidé umělým systémům schopnost regulovat samy sebe (autoregulace). Co jiného je přepad u nádržky s vodou než dvoustavový regulátor? V oblasti mechaniky byl zájem regulovat rychlost otáčení různých strojů nebo chod hodin a hracích strojků, které byly poháněny závažím nebo pružinou. První zmínka o krokovém mechanismu s kyvadlem pro hodiny je z roku 1250. Krokový

mechanismus kompenzoval ztrátu energie třením u hodinového kyvadla nebo později setrvačníku (nepokoje) v hodinkách a zároveň tyto jednohmotové mechanické systémy svou schopností kmitat pevnou frekvencí omezovaly jejich rychlost otáčení.

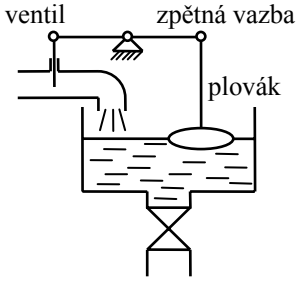


Obrázek 3.14 – Wattův roztěžník

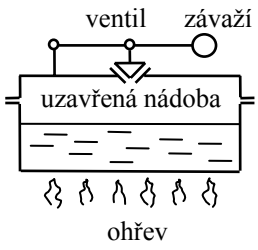
Nejpozoruhodnější inovaci konstrukce mechanického stroje, která spočívala v zavedení zpětnovazebního řízení, vytvořil skotský mechanik James Watt (1736 – 1819). Tento zdatný technik doplnil parní stroj nejen o setrvačník a dvoucestný ventil k rozvodu páry, ale z našeho hlediska hlavně také o odstředivý regulátor (jinak Wattův roztěžník), který zprostředkovává automatickou zpětnou vazbu, která reguluje otáčky parního stroje. Tento proporcionální regulátor navrhl Watt v roce 1788. Jeho kresba, která byla převzata z encyklopedie Wikipedia, je na obrázku 3.14. Roztěžník je poháněn regulovaným strojem. Dvě závaží se vychylují odstředivou silou a posouvají objímkou, která vychyluje pákový převod ovládající natočení klapky v přívodním potrubí vodní páry pro stroj.

Princip silového působení dvou rotujících hmot zůstal uplatněn až dodnes v mechanickém vstřikovacím čerpadle pro dieselový motor s funkcí omezovat dodávku paliva a tím i otáčky po překročení zadané meze, při které překoná odstředivá síla, působící na rotující hmoty, přítlak pružin a pohyb se přenese na posun regulační tyče. Tento posun způsobí pootočení ventilů ve vstřikovacím čerpadlu tak, že pohybem vačky se nasaje a pak vstřikne do válců menší množství paliva.

Jinou zajímavou aplikací je omezovač rychlosti pohybu výtahu, který zájemce může vidět v muzeu u krajského úřadu ve Zlíně. Tento stroj měl kontrolovat pohyb kanceláře ve výtahu Baťova mrakodrapu a při překročení určité rychlosti měla být uvedena do činnosti brzda.



Obrázek 3.15 – Splachovadlo



Obrázek 3.16 – Tlaková nádoba

Oblíbeným příkladem mechanického regulátoru je splachovadlo (obrázek 3.15). Pohyb plováku ovládá prostřednictvím páky ventil přítoku paliva. Změny polohy a plováku jsou lineární. Skutečné soudobé splachovadlo připomíná spíše klopný obvod. Průtok je po celou dobu udržován na maximální velikosti.

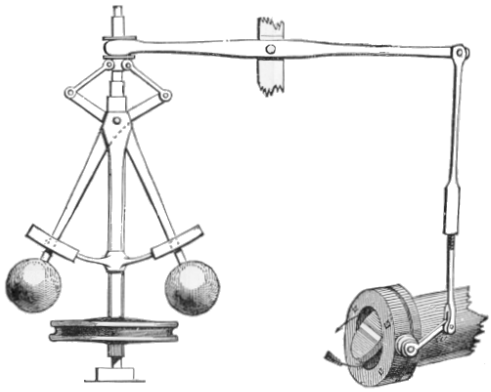
Po dosažení určité hladiny se pákový převod rychle překlopí a přívod vody uzavře (často nespolehlivě, což je důvodem napětí v mnohých domácnostech).

Posledním příkladem je regulace maximálního tlaku v nádobě s odpařující se tekutinou (obrázek 3.16). Tlak par v nádobě překoná přítlak ventilu a přebytečné páry odpustí.

Mechanické doplňky dávají v uvedených příkladech systému samoregulační (autoregulační) schopnosti, čímž nedovolí, aby se dostaly za vymezené hranice. Samoregulace je běžná i v jiných systémech a není umělého původu jako v příkladu mechanických systémů.

Otázky 3.3.

1. Jaké zesílení má operační zesilovač? Velké, střední, malé.
2. Kde se používá operační zesilovač?
3. Jak se jmenuje regulátor na obrázku?



3.4. Pneumatické regulátory

Čas ke studiu: 0,5 hodiny

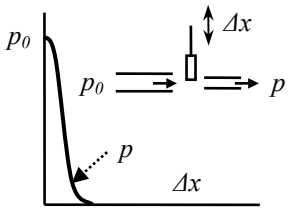
Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat výhody pneumatických regulátorů.
- popsat způsoby řízení proudu vzduchu.

Výklad

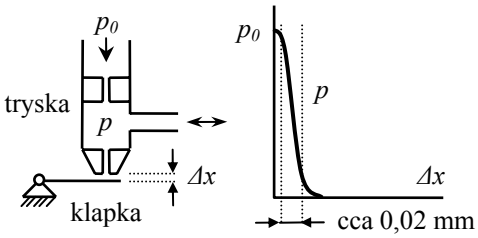
Důvodem vzniku pneumatických regulátorů je jejich jiskrová bezpečnost pro provozy s nebezpečím výbuchu v některých odvětvích chemického průmyslu. Tento konstrukční systém zahrnuje nejen regulátory, ale i snímače s tlakovým výstupem (měronosnou veličinou je tlak vzduchu) a akční členy ovládané tlakovým vzduchem. Také pneumatické regulátory využívají operační zesilovače, ovšem na principu přeměny malého mechanického pohybu na tlakový signál. Je to soustava tryska klapka, dvoukuličkový rozvod, šoupátko (šoupátkový rozvod) a proudová záchytná tryska.

Proudová záchytná tryska je znázorněna na obrázku 3.17. Změnou polohy clonky se dosáhne změna tlaku p na výstupu. Zajímavé je, že největší účinek se dosáhne při menším průměru záchytné trysky než je průměr proudové trysky.



Obrázek 3.17 Proudová záchytná tryska

Vzhledem k praktické realizaci budou popsány pouze dva systémy a to systém s klapkou-tryskou a šoupátky. Pokroky v elektronice však i první zmíněný systém postupně vytlačují. V již zmíněné první skupině regulátorů existují všechny varianty regulátorů odvozených od typu PID včetně zesilovačů výkonu. Jejich funkce je založena na ekvivalentu operačního zesilovače, kterým je soustava tryska klapka, viz obrázek 3.18. Tryska se napájí konstantním tlakem p_0 (obvykle 140 kPa).

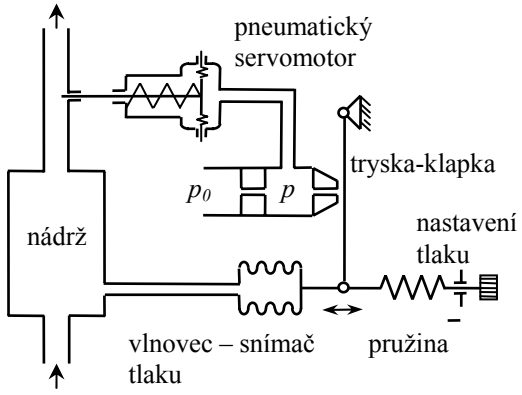


Obrázek 3.18 – Tryska-klapka

Průměr napájecího otvoru je 0,25 mm a průměr trysky 0,55 mm, takže jsou to kapiláry. Odběr tlaku je značen p. Vzduch prochází dvěma kapilárami, přičemž výstup je škrcen klapkou. Závislost tlaku na poloze klapky je znázorněna na grafu v tomto obrázku. Jak je zřejmé, velmi malé pohyby trysky v rozsahu 0,02 mm, způsobí velkou změnu tlaku p na výstupu z 20 na 100 kPa. Tento operační zesilovač má také slušnou linearitu.

Pneumatický operační zesilovač je schopen změnou tlaku vyvolat silovou rovnováhu pákové soustavy a udržet ji v rovnováze v potřebném pracovním bodě.

Funkci proporcionálního pneumatického regulátoru (D a I složka chybí) lze demonstrovat na příkladu na obrázku 3.19. Úkolem regulace je udržet v nádobě stálý tlak regulovaným odpouštěním náplně. Snímač tlaku představuje vlnovec. Proti vychýlení vlnovce působí silou pružina, jejímž předpětím se zadává žádaná hodnota tlaku.



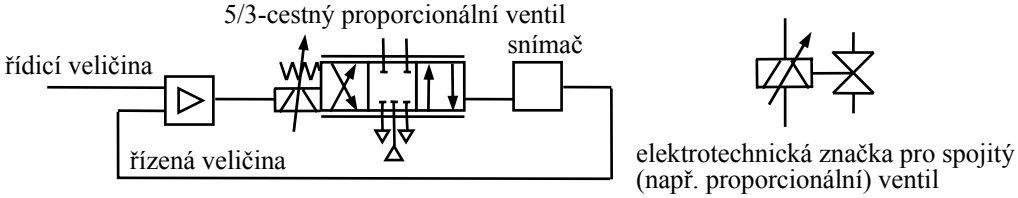
Obrázek 3.19 – Regulace tlaku proporcionální pneumatickým regulátorem

Pohyblivý konec vlnovce je spojen s klapkou systému tryska-klapka. Tryska je napájená konstantním tlakem p_0. Výstupní tlak p je přiveden do pneumatického servomotoru s vratnou pružinou. Jestliže se tlak p před pohyblivou membránou servomotoru zvětšuje, pak se zmenšuje průtočný průřez a odpouštění tlaku v nádobě se zmenšuje.

Nechť se zvětší tlak v nádobě nad stanovenou hodnotu. Důsledkem tohoto jevu je vychýlení rovnovážného stavu vlnovce takovým způsobem, že se zvětší mezera mezi tryskou a klapkou a v trysce poklesne tlak. V servomotoru vratná pružina zatáhne šoupátko dovnitř a

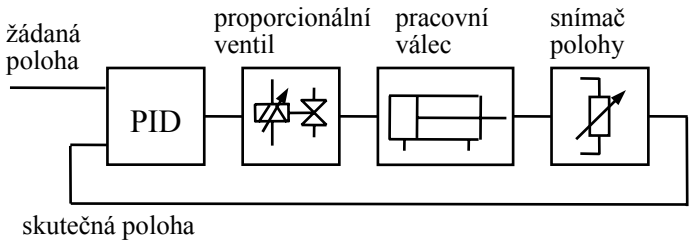
průtočný průřez ventilu se zvětší, což povede k poklesu tlaku. Při poklesu tlaku v nádobě je účinek opačný, průtočný průřez ventilu se zmenší.

Třetí způsob řízení proudu vzduchu relativně malým pohybem ovládacího prvku je založen na principu šoupátkového rozvodu. Podrobně bude uspořádání šoupátkového rozvodu popsáno u hydraulických regulátorů. Protože šoupátko nemá uvnitř ventilu jako běžný rozváděč dvě nebo tři stabilní polohy, ale posouvá se spojitě, je tento typ ventilu blíže pojmenován jako proporcionální. Pohyb šoupátka ventilu je často ovládán elektromagnetem, jehož silové působení na šoupátko je úměrné velikosti proudu elektromagnetickou cívkou. Tento ventil může být součástí uzavřené smyčky podle obrázku 3.20.



Obrázek 3.20 – 5/3-cestný regulovaný ventil – schématické značky

Polohový regulátor pracovního válce s proporcionálním ventilem (rozváděčem) je znázorněn na obrázku 3.21. V regulační smyčce je zařazen elektronický regulátor PID. Výstupní proud ovládá proporcionální ventil, který přivádí tlak do dvojčinného pracovního válce. Poloha pístní tyče (pístnice) je snímána snímačem s elektrickým výstupem. Signál polohy je zápornou zpětnou vazbou regulačního obvodu.



Obrázek 3.21 – Polohový regulátor s proporcionálním ventilem

Hraniční hodnota přesnosti pneumatického regulačního obvodu polohy je ±0,1 mm při rychlostech do 3 m/s. Lineární pohony mají délku do 2 m. Limitujícím faktorem je tření pístu pohyblivých prvků. Přesto z pneumatických prvků lze sestavit přesné a rychlé systémy řízení polohy.

Otázky 3.4.

1. Základní princip pneumatických regulátorů? Tryska + ?
2. Používají se operační zesilovače u pneumatických regulátorů?

3.5. Hydraulické zesilovací prvky

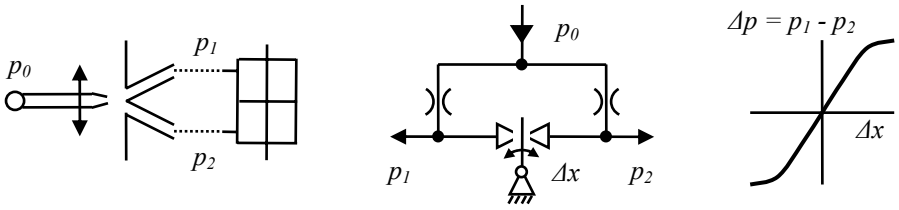
Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat princip hydraulických zesilovacích prvků.
- popsat funkci šoupátkového rozvodu.
- popsat provedení proporcionálního ventilu.

Výklad

Princip funkce těchto prvků je založen také na hydraulické verzi operačního zesilovače, tj. prvku, u kterého malá změna vstupu vyvolá velkou změnu odezvy na výstupu. Lze uvést tři principy řešení: tryskový rozvod (Askania), dvoutryskový rozvod, který se nazývá také systém klapka-tryska, a šoupátkový rozvod. První dvě řešení jsou znázorněny na obrázku 3.22. Šoupátkový rozvod bude popsán podrobněji. V úplném uspořádání působí na otočnou trysku a klapku pružný člen, který oba tyto pohyblivé prvky vrací do výchozí polohy.



A) Tryskový rozvod (Askania) B) Dvoutryskový rozvod

Obrázek 3.22 – Principy hydraulických operačních zesilovačů

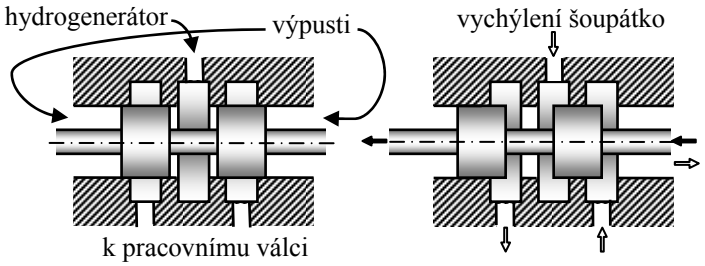
Vlastností operačních zesilovačů je způsobit malou změnou polohy velkou změnu tlaku na jejich výstupu. Princip tryskového regulátoru s názvem podle prvního výrobce (Askania) je uveden na obrázku 3.22 A. Jedná se o trysku, která je úměrně regulační odchylce vychylována směrem ke dvěma otvorům a tím je dosaženo tlakové diference mezi připojenými potrubími. Principem funkce je transformace průtoku na tlak podle Bernouliho zákona. Dvoutryskový obvod na obrázku 3.22 B je podobný systému tryska-klapka. Tlak v obou větvích určuje poloha otočné klapky (flapper).

Funkci šoupátkového rozvodu lze popsat podle obrázku 3.23. Protože se šoupátko přestavuje spojitě, je tento typ ventilů také označen proporcionální. Nákres vlevo znázorňuje šoupátko v centrované (základní) poloze. Na obrázku vpravo je šoupátko vychýleno a umožňuje průtok hydraulické kapaliny vnitřními kanálky k jednomu přívodu směrem k pracovnímu válci, zatímco druhý přívod je otevřen k výpusti.

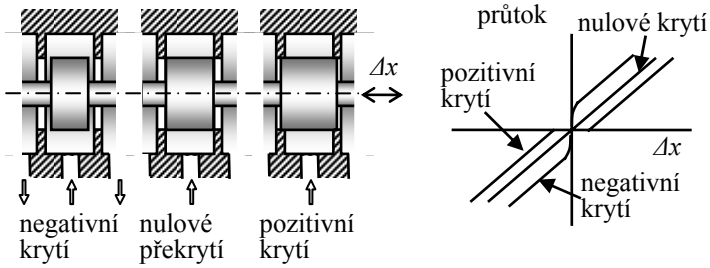
Charakteristiku šoupátkového rozvodu, tj. závislost průtoku na poloze šoupátka, ovlivňuje krytí šoupátka a kvalita pracovních hran uvnitř rozvodu. Tři různé druhy krytí (negativní, nulové a pozitivní) jsou znázorněny na obrázku 3.24. Tvar povrchu ventilu, například zápichy (prstencové drážky) nebo zploštění, může také podstatně změnit průtokovou charakteristiku ventilu. Vyrábějí se tak ventily s lomenou nebo parabolickou charakteristikou. Snížení opotřebení hran proporcionálního ventilu přispívá výřez v povrchu

válcového šoupátka, který se otvírá pro průchod kapaliny dříve něž hrany válcové části šoupátka.

Efektem negativního krytí (není přesah hran) na obrázku vlevo je stále otevřený průchod hydraulické kapaliny. Při pozitivním krytí je průchod přesahem hran uzavřen. V charakteristice šoupátkového rozvodu se objeví pásmo necitlivosti, zatímco charakteristika rozvodu s negativním krytím je v okolí střední polohy lineární. Linearita bezpochyby přispívá k lepší funkci regulačního obvodu. Napájecí tlak tohoto obvodu je řádově desítky MPa.



Obrázek 3.23 – Princip šoupátkového rozvodu



Obrázek 3.24 – Pozitivní a negativní krytí šoupátka

Obvodové značky pro proporcionální ventily jsou na obrázku 3.25. Jedná se o přímo a nepřímo řízený proporcionální ventil. Oba ventily mají čtyři vývody. K pracovnímu válci se připojují vývody A a B.

Napájecí tlaková kapalina je připojena k vývodu P a vývod T je výpusť. Šoupátko obou ventilů je centrováno dvěma pružinami. Poloha šoupátka je řízena proudem elektromagnetu. Ke zvýšení přesnosti nastavení je ventil vybaven indukčním snímačem polohy šoupátka. Regulační obvod pak může polohu šoupátka nastavovat velmi přesně. Dalším zpřesněním funkce ventilu je modulace ovládacího proudu slabým střídavým signálem (Dithersignal), který vyvolá jemné vibrace, zabraňující nedokončení přestavení polohy z důvodu tření.

Přímo řízený proporcionální ventil Nepřímo řízený proporcionální ventil

Obrázek 3.25 – Značky pro proporcionální ventily

Nepřímo řízený proporcionální ventil má předřazeny dva tlakové omezovací ventily, které jsou ovládány elektromagnetem. Přivření nebo rozevření mezery změní odtok do výpusti a tím i tlak kapaliny, který působí na šoupátko hlavního ventilu. Toto šoupátko hlavního ventilu je drženo v centrální poloze také pružinami jako u přímo řízeného ventilu. Porucha rovnováhy sil od pružin a tlaku od předřazených omezovacích ventilů způsobí vychýlení šoupátka hlavního ventilu do nového rovnovážného stavu. Poloha tohoto šoupátka je rovněž snímána indukčním snímačem.

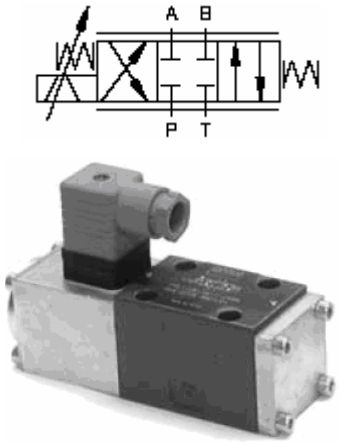
Proud k ovládání ventilů je v rozmezí ±20 mA. Ventil je ovládán dvěma cívkami elektromagnetu. Jejich zapojení je paralelní nebo sériové a nebo proti sobě (push-pull), což znamená, že zvýšení proudu v jedné cívce doprovází snížení proudu v cívce druhé.

❑ Příklad provedení proporcionálního ventilu (rozváděče)

Příklad rychlého proporcionálního ventilu také od firmy ARGO-HYTOS a.s. představuje ventil typu PRL1-06 pro tlak 25 MPa a průtok 32 dm^3/min, který obsahuje lineární motor. Rozváděč je znázorněn na obrázku 3.26 a jeho řez na obrázku 3.27.

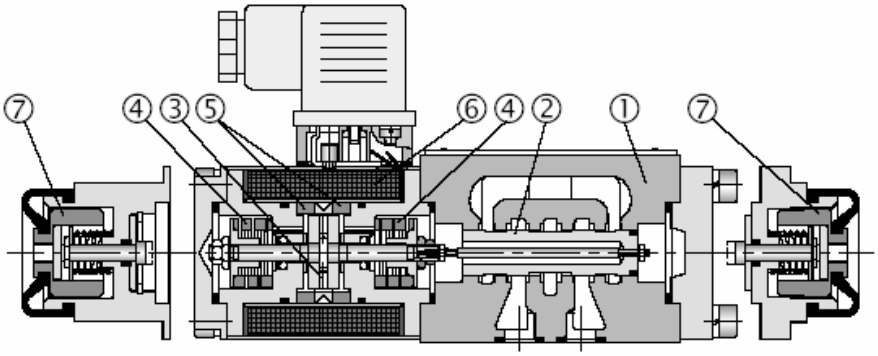
Proporcionální rozváděč PRL1 je určen ke spojitému dálkovému řízení hydromotorů a válců, převážně v mobilních aplikacích. Rozváděč sestává ze dvou částí. Hydraulickou část tvoří litinové těleso (1),do něhož je nalícováno šoupátko (2) uspořádané pro zajištění požadované funkce. Ovládací část tvoří lineární motor. Kotva (3) lineárního motoru je středěna pružinami (4) a pracovní mezery jsou protisměrně předmagnetizovány trvalými magnety (5) ze vzácných zemin.

Při vybuzení cívky (6) elektrickým proudem se posouvají kotva a s ní spojené šoupátko ze střední polohy. Výchylka kotvy je přitom úměrná řídicímu proudu a smysl výchylky závisí na směru průtoku proudu. Předností lineárního motoru je, že při výpadku napájení nebo přerušení kabelu se přesouvá kotva motoru a šoupátko do střední polohy. Provedení s nouzovým ovládáním umožňuje plynulé přestavení šoupátka do určité polohy, které se provádí zašroubováním šroubu (7).



Obrázek 3.26 – Proporcionální rozváděč HYTOS PRL1-06

Pro řízení lineárního motoru jsou k dispozici elektronické řídicí jednotky. Přestože jsou proporcionální rozváděče PRL1 určeny především k řízení velikosti a směru průtoku,mohou být použity jako řídicí stupně proporcionálních rozváděčů větších světlostí (v tomto případě jako prvky řídící tlak). Dynamické vlastnosti proporcionálních rozváděčů PRL1 umožňují jejich použití v uzavřených regulačních obvodech.



Obrázek 3.27 – Řez proporcionálním rozváděčem HYTOS PRL1-06

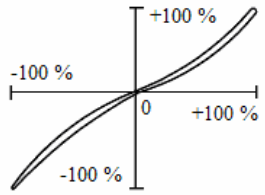
Statické charakteristiky ventilu jsou znázorněny na obrázku 3.28 a 3.29. V levé části obrázku jsou průtokové charakteristiky a v pravé části obrázku jsou tlakové charakteristiky.

Vodorovná osa všech grafů představuje relativní velikost řídicího proudu. Průtoková charakteristika odpovídá konstantnímu vstupnímu tlaku. Charakteristiky závisí na směru budícího proudu, tvoří hysterézní smyčku. Je to způsobeno ztrátami při magnetizaci a mechanickým třením. Obrázek 3.28 přísluší tzv. krytí 0 a obrázek 3.29 přísluší krytí 1. Obě průtokové charakteristiky se liší v ve svém průběhu pro malé řídicí proudy, tj. blízko nulovému proudu. Provedení s krytím 1 má výraznější pásmo necitlivosti oproti provedení s krytím 0.

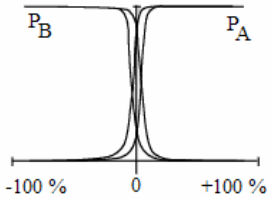
Na obrázku 3.30 je znázorněna frekvenční charakteristika proporcionálního rozvaděče. Jedná se o závislost poměru výstupního harmonického signálu (sinusovky) k amplitudě vstupního signálu. Frekvenční charakteristika je pro linearizovaný model, což znamená, že vstupní a výstupní signál má stejnou frekvenci. Druhá křivka znázorňuje velikost fázového posunu v úhlových stupních mezi vstupním a výstupním signálem. Amplitudová frekvenční charakteristika je v decibelech, tj. zmíněný poměr amplitud signálu na výstupu a vstupu je logaritmován a vynásoben 20.

Frekvenční charakteristika vykazuje mezi 150 a 200 Hz slabou rezonanci.

Průtoková charakteristika

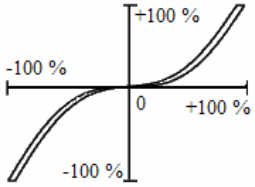


Tlaková charakteristika

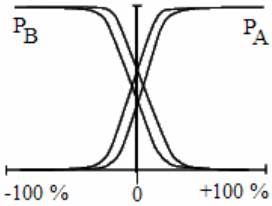


Obrázek 3.28 – Statické charakteristiky proporcionálního rozvaděče HYTOS PRL1-06 s krytím 0

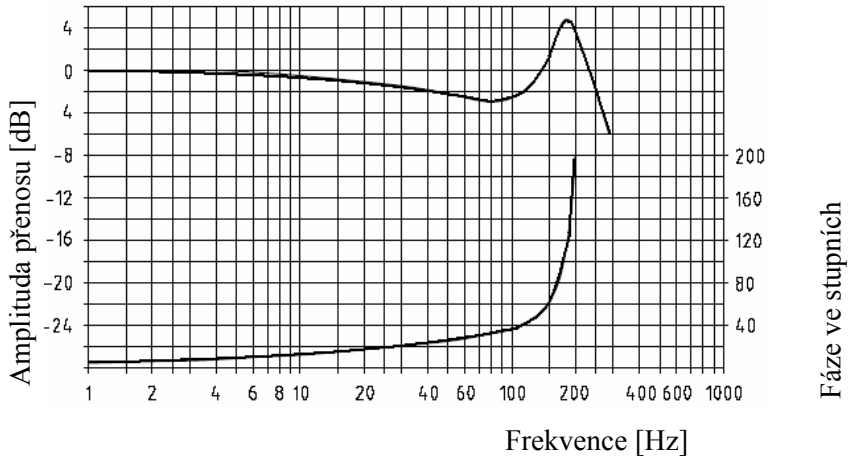
Průtoková charakteristika



Tlaková charakteristika



Obrázek 3.29 – Statické charakteristiky proporcionálního rozvaděče HYTOS PRL1-06 s krytím 1

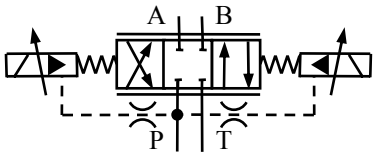


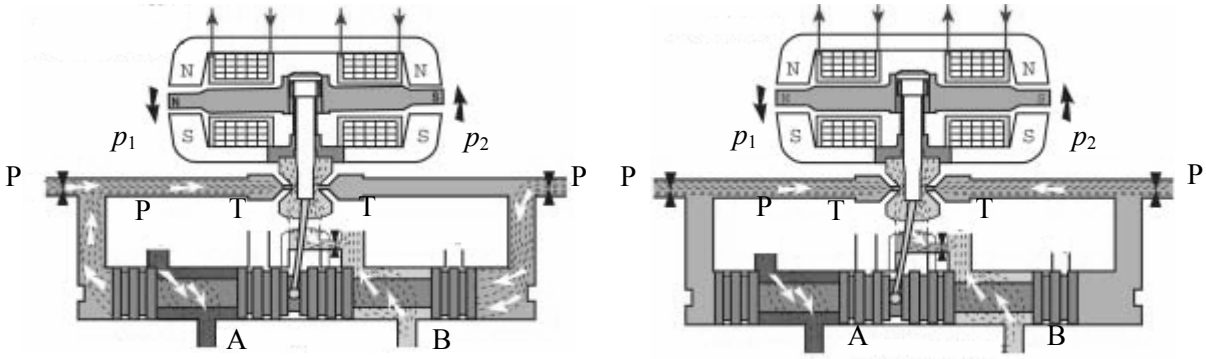
Obrázek 3.30 –Frekvenční charakteristika proporcionálního rozváděče HYTOS PRL1-06

❑ Servoventily

K hydraulických zesilovacím prvkům patří také servoventily, viz obrázek 3.31. Tyto ventily reagují rychleji než proporcionální ventily, avšak jsou mnohem citlivější na čistotu

oleje a jsou dražší. První stupeň odpovídá řešení podle obrázku 3.22B. Nulová poloha klapky je centrována pružinami. Na klapku působí také krouticí moment otočně uložené kotvy elektromagnetu s nastavitelným proudem. Výstupní tlaky p_1 a p_2 dvoutryskového rozvodu určují polohu šoupátka druhého stupně ventilu. Mezi polohou šoupátka a klapky působí mechanická zpětná vazba, která je zprostředkována pérem.





Ventil v okamžiku změny proudu cívkami

Ventil v ustáleném stavu po změně proudu

Obrázek 3.31 – Dvojstupňový servoventil

Chování ventilu lze rozfázovat. V okamžiku změny proudu cívkami dojde k vychýleni klapky a ovlivnění rozdílu tlaků v obou tryskách. Šoupátko druhého stupně ventilu se uvede do pohybu a začne unášet konec péra tak, že se snaží obnovit neutrální polohu klapky mezi tryskami. To vede k vyrovnání tlaků v tryskách a zastavení pohybu šoupátka druhého stupně.

Pro svoje vynikající dynamické vlastnosti mají servoventily použití v polohových a rychlostních regulačních obvodech.

3.6. Snímače

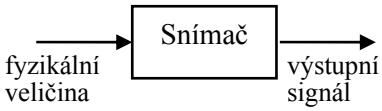
Čas ke studiu: 3 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat funkci snímače v regulačním obvodu, principy měření elektrických a neelektrických veličin.
- popsat snímače pro měření základních veličin – teploty, průtoků plynů a kapalin, síly a kroutícího momentu, tlaku, hladiny, polohyprůtoků sypkých hmot.

Výklad

V regulačním obvodu plní snímače funkci členů pro získávání informace o velikosti regulovaných a poruchových veličin. Obecně jsou snímače systémy, na jejichž vstupu je fyzikální veličina a na výstupu měronosný signál, nejčastěji elektrický, ale také tlakový nebo poloha.



Obrázek 3.32 – Snímač jako dynamický systém

V případě elektrických signálů lze provést další dělení výstupních signálů a to na signály dvouhodnotové (logická nula nebo jednička, kontakt sepnut nebo rozepnut, atd.)

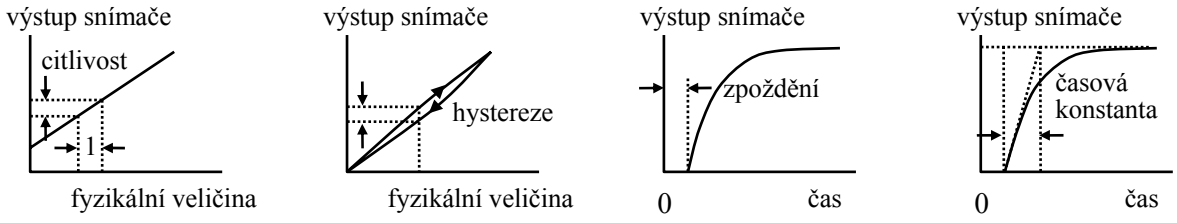
- vícehodnotové
- spojité (analogové) v unipolárním rozsahu, např. 0 až +5V, 0 až+ 10V, nebo v bipolárním rozsahu, např. . ±5V, ±10V, a nebo 4 až 20 mA
- číslicové (binárně dekadický kód, sběrnice)

Snímač jako dynamický systém mají následující vlastnosti, viz obrázek 3.32

- statickou charakteristiku
- citlivost v případě lineární statické charakteristiky
- hysterezi v případě nelineární statické charakteristiky
- přechodovou charakteristiku
- zpoždění
- časová konstanta

Další skupina parametrů snímačů obsahuje

- přesnost měření v procentech, reprodukovatelnost měření
- vstupní rozsah (měřené fyzikální veličiny), rozsah výstupního signálu (elektrické napětí nebo proud)
- přetížitelnost na vstupu, zátěž výstupu (pro elektrický signál zatěžovací proud)
- klimatické podmínky pro správnou funkci (teplota, vlhkost, a jiné), odolnost proti vibracím nebo záření
- rozměry, přípojné místo, napojení (konektory), napájecí napětí
- atd.



Obrázek 3.33 – Statické a dynamické charakteristiky snímačů

❑ Některé obecné principy měření fyzikálních veličin

Souhrnně lze operaci měření s analogovým výstupem znázornit schématem

Fyzikální veličina → elektrický signál (napětí nebo proud)

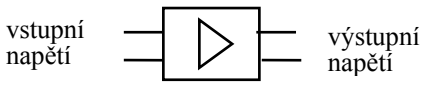
Elektrické napětí o standardizovaném rozsahu je nejběžnější výstup snímačů. Některé snímače mají jako výstupní signál proud. V tomto případě je omezen odpor proudové smyčky. Nula rozsahu odpovídá často nenulovému proudu (např. 4 mA) pro možnost indikace přerušení proudové smyčky.

Variantou prvního schématu je mezistupeň s malým napětím

Fyzikální veličina → malé napětí → elektrický signál (napětí nebo proud)

Malé napětí v řádu milivoltů je třeba zesílit stejnosměrným elektronickým zesilovačem. V minulosti se pro napětí kolem jednoho mV používal magnetický zesilovač. Aby se konstruktéři vyhnuli problémům se stejnosměrným driftem (pomalá nahodilá změna výstupního napětí) zesilovačů, vstupní stejnosměrné napětí zesilovače bylo změněno na střídavé a výstupní napětí bylo pak synchronně usměrněno. Praktická realizace je například u citlivých inframetrů pro měření složení plynů použitím rotující clonky, přes kterou se střídavě ohřívají detekční komory, mezi kterými se měří rozdíl teplot.

Univerzální značka pro elektronický zesilovač je znázorněna na obrázku 3.33.



Obrázek 3.34 – Značka pro zesilovač

U snímačů, u kterých je vztah mezi nimi dán integrací nebo derivací (například dráha, rychlost a zrychlení), je třeba si uvědomit, která z těchto veličin je primární a která je elektronicky odvozena derivací nebo integrací.

Konstrukce snímačů využívá různých fyzikálních zákonů. Jejich stručný přehled je následující

- Termoelektrický jev na kontaktu dvou různých vodivých materiálů – termočlánky
- Vztah mezi rychlosti pohybu vodiče (v) o délce (l), magnetickou indukcí (B) a generovaným napětím u – snímače proudění vody, tachodynama

$$u = B\,v\,l \tag{3.6}$$

- Vztah mezi proudem vodičem (J) o délce (l), magnetickou indukcí (B) a vznikající silou F – proudové váhy založené na kompenzací síly elektromagnetem

$$F = B\,J\,l \tag{3.7}$$

- Závislosti elektrického odporu na teplotě – odporové teploměry, měření tepla, měření rychlosti proudění (proud vzduchu ochlazuje procházejícím proudem ohřátý vodič)
- Závislosti změny elektrického odporu ΔR na protažení Δl vodiče – tenzometry, měření mechanického napětí, sily a krouticího momentu

$$\varepsilon = \Delta l / l, \quad \Delta R / R = k\,\varepsilon \tag{3.8}$$

- Dopplerův jev o změně frekvence (zvuku, ultrazvuku nebo světla) f při odrazu od předmětu, který se přibližuje rychlostí v při rychlostí šíření vlnění c – měření rychlosti pohybu

$$\Delta f = \frac{c}{c - v} f \tag{3.9}$$

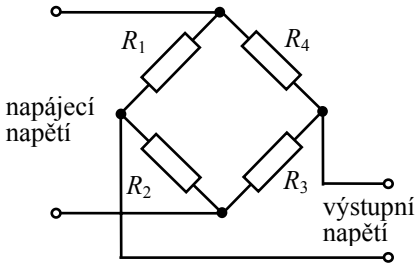
- Fotoelektrický jev – indikace přerušení světelného paprsku (lineární a rotační encodéry)
- Piezoelektrický jev – závislost generovaného náboje na působící síle na piezoelektrický materiál

Přehled fyzikálních zákonů není vyčerpávající, ale stačí k vysvětlení funkce mnoha čidel, které se používají v regulačních a řídicích obvodech.

Výše uvedené schéma snímačů lze v řadě případů popsat podrobněji. Mnohé principy měření jsou založeny na schématu

Fyzikální veličina $\rightarrow$ *elektrický odpor* $\rightarrow$ *elektrický signál*

Toto řešení má uplatnění například při měření teploty a mechanického napětí. Základní způsob přeměny změny odporu na elektrické napětí je odporový můstek na obrázku 3.34. Větve mezi napájecím napětím tvoří odporový dělič. Je zřejmé, že když obě větve budou mít stejný dělící poměr, tj.

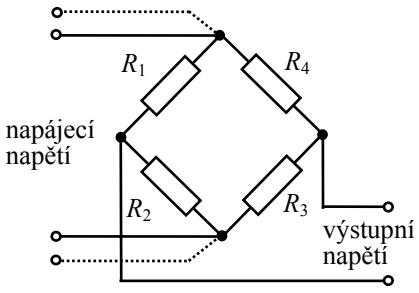


Obrázek 3.35 – Odporový můstek

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \tag{3.10}$$

pak bude můstek vyrovnán a na jeho výstupu bude nulové napětí. Změna odporů v můstku může způsobit jeho rozvážení, jen pokud nebude platit rovnice (3.10).Napájecí napětí můstku je stejnosměrné nebo také střídavé. Můstek může detekovat velmi malé změny odporů, výstupní napětí ve však velmi malé a je třeba zesilovače. Největší citlivosti měření se dosáhne, jestliže v protilehlých větvích můstku nastává změna odporu stejného znaménka a u sousedních odporů je změna znaménka opačná.

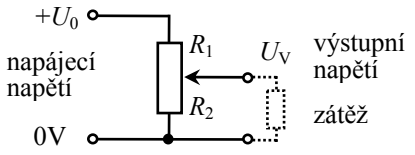
Vedení k můstku potřebuje 4 vodiče. Napájecí proud můstku způsobí nekontrolovatelný úbytek napětí a tím i změnu napětí na výstupu můstku. Aby bylo možné kontrolovat přesnou velikost napájecího napětí, přidávají se ke zmíněným 4 vodičům ještě dva další vodiče, které se zapojí do napájecích uzlů můstku, viz obrázek 3.35. Toto opatření je třeba při tenzometrických měřeních s vysokou přesností.



Obrázek 3.36 – Odporový můstek

Čtvrtinové můstkové zapojení znamená, že se vyhodnocují můstkovým zapojením změny jen jednoho odporu. V řadě případů se pracuje s polovičním můstkovým, tj. jen dvojící odporů, přičemž ve vyhodnocovací aparatuře je druhá polovina můstku.

Zvláštní řešení vyhodnocení změny odporů je v situaci, kdy zvětšení jednoho odporu je provázeno zmenšením druhého odporu o přesně stejnou velikost. Tento jev nastává u potenciometrů, viz obrázek 3.36. Poloha jeho jezdce je spřažena s posunem nebo otočením, což jsou hlavní měřené veličiny. Změny odporů se nevyhodnocují můstkovým zapojením, ale přímým vyhodnocením napětí mezi jezdcem a jedním uzlem, který je napájen napětím.



Obrázek 3.37 – Potenciometr

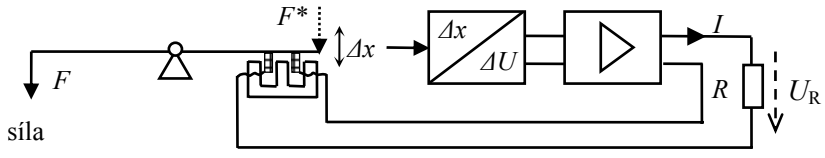
Jak již bylo zmíněno, vyhodnocuje se dráha. Jestliže je odporová dráha homogenní, pak je na výstupu odporového děliče lineárně závislé napětí na poloze jezdce. Při vyhodnocení výstupního napětí nesmí snímač napětí (voltmetr) zatěžovat potenciometr odběrem proudu. V elektrickém schématu zapojení potenciometru je tato zátěž vyznačena tečkovaně.

Další schéma převodu fyzikální veličiny na elektrický signál je následující

Tímto postupem se měří například tlak plynů a kapalin, tlaková diference, atd.. Tzv. proudové kompenzační váhy jsou založeny na principu

Fyzikální veličina → síla → elektrický proud v kompenzačním elektromagnetu → elektrický signál

Uspořádání proudových vah je znázorněno na obrázku 3.37. Měřená síly se vyvažuje sílou elektromagnetu F^*, která je přímo úměrná proudu, proto úbytek napětí U_R na odporu R je přímo úměrný měřené síle F. Velikost proudu ve smyčce je úměrná poloze ramene páky Δx. Obvod je zapojen tak (záporná zpětná vazba), že elektromagnet vrací páku do neutrální polohy. Toto zapojení má uplatnění například při měření malých tlaků a tlakových diferencí.



Obrázek 3.38 – Proudová váha

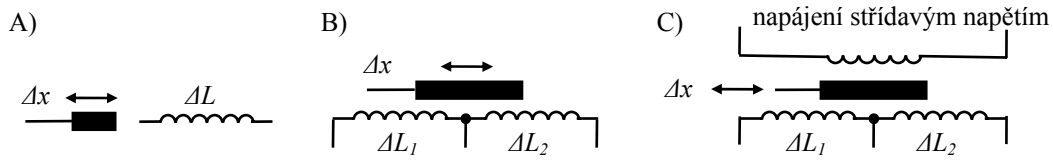
Velmi rozšířená jsou indukční snímače, které využívají tento postup měření

Fyzikální veličina → posun → indukčnost → elektrický signál

Vyhodnocování změn indukčnosti je podobné jako vyhodnocování změn odporu. Úbytek napětí U na cívce o indukčnosti L při průchodu proudu o úhlové frekvenci $\omega = 2\pi f$ je dán vzorcem

$$U = \omega L \qquad (3.11)$$

Změna indukčnosti indukuje změnu magnetické vodivosti jádra cívky, což lze dosáhnout jeho posunem. Vstupem indukčního snímače je posun jádra cívky a mezivýstupem změna indukčnosti. Uspořádání cívek je znázorněno na obrázku 3.38. Vyhodnocování změn umožňuje v případech ad A) a ad B) na uvedeném obrázku můstek doplněný odpory. Napájení odporů musí být střídavým proudem o obecně jiné frekvenci než je frekvence rozvodné sítě (50 Hz). Na části ad C) obrázku je znázorněn diferenciální transformátor, u kterého se vyhodnocuje rozdíl usměrněných napětí.



Obrázek 3.39 – Indukční snímače

Měření rychlosti pohybu, například otáčení bylo v minulosti založeno na schématu

Rychlost → otáčky tachodynama → elektrický signál

Nové systémy měření rychlosti využívají postup

Rychlost → frekvence impulsů → elektrický signál

nebo tento postup podrobněji

Rychlost → frekvence impulsů → délka časového intervalu → elektrický signál

K měření rychlosti pohybu plynů nebo kapalin se využívá Dopplerova posunu frekvencí

Rychlost → rozdíl frekvencí → elektrický signál

Tento princip se používá v rychlostních dopplerovských laserech pro bezdotykové měření vibrací. Jinou aplikací Dopplerova jevu je měření objemového proudu plynu nebo kapalin v potrubí.

Snímače složení plynů (inframetry) s nesymetrickou molekulou (CO, CO_2) využívají rozdílné absorpce infračerveného záření

Obsah plynu s nesymetrickou molekulou → elektrický odpor → elektrický signál

Obsah kyslíku v plynu se měří s využitím vzniku jeho proudu v nehomogenním magnetickém poli

Obsah kyslíku v plynu → elektrický odpor → elektrický signál.

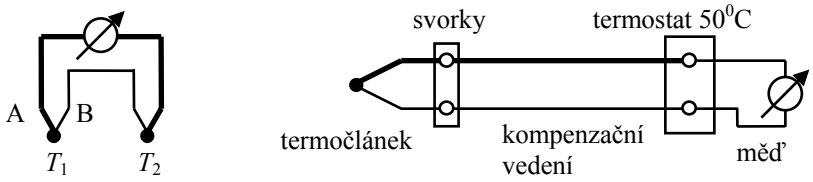
❑ Snímače teploty pro regulaci

Teplota se měří v průmyslových ohřívacích pecích, sušárnách, někdy také v topeništi, například v plynovém hořáku a v různých chemických reaktorech. Měření teploty představuje zvláštní specializaci a vědomosti. Snímače použité ke snímání teploty závisí na rozsahu měření.

Nejběžněji jsou pro měření do teploty asi 300 ^{0}C používány platinové odporové teploměry Pt 100. Tento odporový teploměr má odpor 100 Ω při 0^{0}C. Závislost odporu na teplotě je podrobně tabelována. Změny odporu jsou vyhodnocovány odporovým můstkem.

Do hodnoty kolem 1100 ^{0}C jsou běžné termočlánky, které využívají termoelektrický jev. Tento jev vzniká na spojích dvou různých kovů zapojených do série se dvěma spoji (kov A - spoj AB - kov B - spoj BA - kov A), viz obrázek 3.39. Mají-li spoje (teplý a studený) navzájem různou teplotu T_1 a T_2, vzniká na každém ze spojů odlišný elektrický potenciál, který je zdrojem proudu. Pro měření teploty je místo v obvodu s jedním spojem nahrazeno voltmetrem.

Napětí na termočlánku je dáno rozdílem teploty jeho teplého a studeného spoje. Aby naměřené napětí mohlo být spojeno s teplotou teplého konce, je třeba znát teplotu studeného konce termočlánku. Samozřejmě, že teplota studeného konce musí být stabilizována na zvolené hodnotě. Výhodná je volba teploty 50^{0}C, protože stačí pouze na této nevysoké teplotě studené konce ohřívat různě intenzivně v závislosti na teplotě okolí. K tomuto účelu se vodiče termočlánku přivádějí na svorky do termostatu, odkud pak pokračuje přenos signálu napětí k vyhodnocovacímu přístroji (ručkové měřidlo nebo A/Č převodník) měděnými vodiči. Protože je neúnosné vést dlouhá vedení z drahých kovů, ze kterých se mnohé termočlánky vyrábějí, je spojení mezi svorkami termostatu a termočlánkem z drahých kovů provedeno levnějším kompenzačním vedením. Mezi vodiči kompenzačního vedení a vodiči termočlánku při teplotě svorek je minimální termoelektrické napětí. Samotný termočlánek o délce kratší než jeden metr je umístěn v jímce a je kryt keramickými trubičkami (kapilárami). Na obrázku 3.39 je znázorněno napojení termočlánku na vyhodnocovací přístroj.

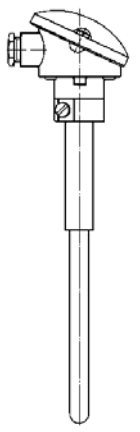


Obrázek 3.40 – Napojení termočlánku na ukazovací přístroj

Uvedený teplotní rozsah je pokryt termočlánky různých typů. V tabulce 3.3 jsou uvedeny typy termočlánků podle normy IEC 584 a rozsah maximálních teplot. V původním značení platinových termočlánků znamenají číslice procentní obsah druhého kovu ve slitině. U nás bylo hodně rozšířené používání norem DIN, avšak nyní se doporučují normy IEC.

Tabulka 3.3 – Označení podle IEC 584 a měřicí rozsah

IEC 584	Původní označení	Měřicí rozsah [° C]
T	Cu-CuNi, Cu-ko	- 200 až 350
J	Fe-CuNi	- 200 až 750
E	NiCr-CuNi, ch-ko	- 100 až 900
K	Ni-Cr-Ni, ch-a	- 200 až 1200
N	NiCrSi-NiSi	- 200 až 1200
S	PtRh10-Pt	0 až 1600
R	PtRh13-Pt	0 až 1600



Obrázek 3.41 – Provedení termočlánku

B	PtRh30-PtRh6	300 až 1700

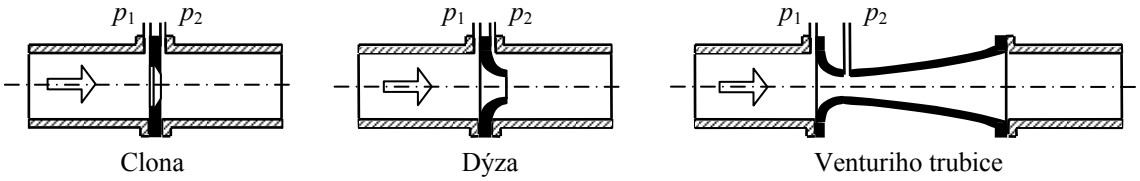
V normě nalezne zájemce tabulky termoelektrických napětí pro odstupňované teploty. Referenční hodnota je obvykle 0 ^{0}C, proto je třeba od napětí v mV odečíst napětí příslušné teplotě studeného konce termočlánku, kterou je teplota v termostatu. Nasazení termočlánku k měření znamená rovněž umění vybrat vhodnou jímku, aby byla odolná nejen teplotě, ale i korozi. Zvláštností jsou plášťové termočlánky,které jsou na rozdíl od drátových termočlánků sestaveny tak, že plášť, tepelná ochrana a samotný termočlánek tvoří integrovaný celek.

Kompenzační vedení má v ochranném obalu vpletenou niť. Například pro platinu je bílá a pro chrom-nikl je zelená

Nad teplotu 1200 ^{0}C lze použít prakticky jen bezkontaktní měření optickým pyrometrem. Tyto pyrometry jsou sestaveny z baterie termočlánků na jejichž teplý konec je optikou soustředěno tepelné záření. U zapalovacích hlav na aglomeračních spékacích pásech pro prachovou rudu je opticky pyrometr zaměřen na žáruvzdornou vyzdívku nebo do keramické jímky.

❑ Snímače průtoku plynů a kapalin pro regulaci

Pro kapaliny a plyn se používá nejčastěji k měření průtoku měřící clona nebo v případě větších průřezů Venturiho trubice. Jejich provedení je znázorněno na obrázku 3.41.



Obrázek 3.42 – Clona, dýza a Venturiho trubice

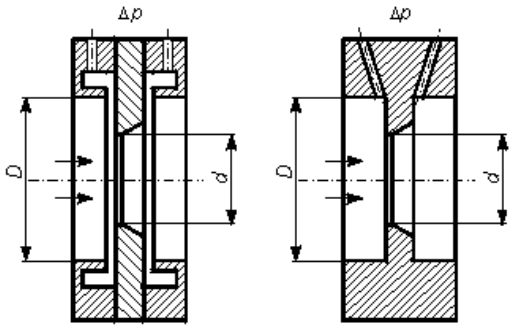
K měření průtoku se snímá tlakový spád (diference) na tomto umělém odporu proti proudění. Jestliže se v případě plynu mění značně vlivem teploty a tlaku měrná hmotnost plynu γ, pak se měří i obě tyto veličiny. Vzorce pro výpočet objemového průtoku jsou následující

$$Q = k_1\sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}}, \quad \left[m^3 s^{-1}; Pa, kgm^{-3}\right] \text{ nebo } \quad Q = k_2\sqrt{\frac{\Delta p}{p}T}, \quad \left[m^3 s^{-1}; Pa, Pa, {}^0K\right] \quad (3.12)$$

Tlak a teplota jsou samozřejmě absolutní. Podstatné je, že průtok je dán odmocninou tlakové diference, jejíž snímač je pro měření průtoku nejdůležitější. Měření clonou nebo dýzou není přesné, uvádí se, že relativní nejistota je v pásmu 3 až 5% změřené hodnoty.

Návrh rozměrů clony, dýzy nebo Venturiho trubice pro daný vnitřní průměr potrubí a měřící rozsah je dán normou (ISO 5167-1). Tlaková diference se na měřící cloně snímá bodovými nebo komorovými odběry, viz obrázek 3.42.

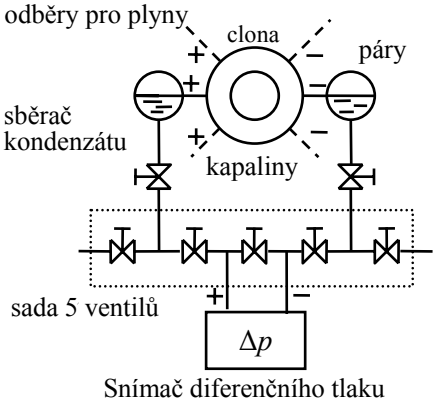
Bodový odběr u clon je vytvořen trubkami, které jsou přivařeny pod úhlem 45^0 na potrubí těsně před a za clonou mířící do osy potrubí a svírající úhel 90^0. Pro plyny je odběrné místo nahoře na osou potrubí a pro kapaliny dole. Páry se odebírají v rovině osy potrubí. Komorový odběr tlakové diference je tvořena komorou ve tvaru prstence o čtvercovém nebo obdélníkovém průřezu, která je spojena s prostředím uvnitř clony štěrbinou po celém obvodu potrubí. Obě varianty odběru diferenčního tlaku jsou znázorněny na obrázku 3.42. Clona a komorový odběr jsou vestavěny mezi příruby potrubí.



Obrázek 3.43 – Clony pro měření průtoku

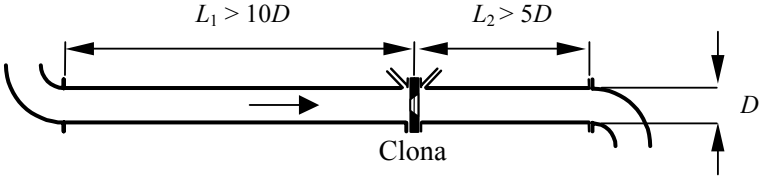
Kromě clony nebo dýzy a nebo Venturiho trubice patří k vybavení impulsní potrubí, kterým se tlakový signál přivádí ke snímači tlaku nebo tlakové diference, také další příslušenství, viz obrázek 3.43. Jsou to různé kohouty a ventily, které odpojí přenos tlaku z prostředí uvnitř potrubí od tlaku na vstupu snímače. Při měření průtoku páry nebo vlhkého plynu vzniká v impulsním potrubí kondenzát, který je třeba občas ze sběrné nádoby odpustit. Sběrná nádoba pro kondenzát se umísťuje tak, aby kondenzát do ní mohl bezpečně stéci.

Snímač diferenčního tlaku se připojuje prostřednictvím sady pětinásobných ventilů. Aby uzavření jednoho impulsního potrubí z páru pro snímání tlakové diference nezpůsobilo přetížení snímače, je také v systému propojka mezi oběma impulsními potrubími těsně před snímačem, která se při připojování přívodu tlaku ke snímači zavře jako poslední a nebo při odpojování snímače se tato propojka otevře jako první.



Obrázek 3.44 – Odběr diferenčního tlaku pro snímač

Při projektování zástavby měřící clony je třeba dbát, aby potrubí bylo přímé v délce aspoň 10násobku jeho průměru (jmenovitá světlost) před clonou a 5násobku jeho průměru za clonou, jak je znázorněno na obrázku 3.44. Přímý úsek potrubí umožňuje ustavit laminární proudění, což je podmínkou přesného měření.



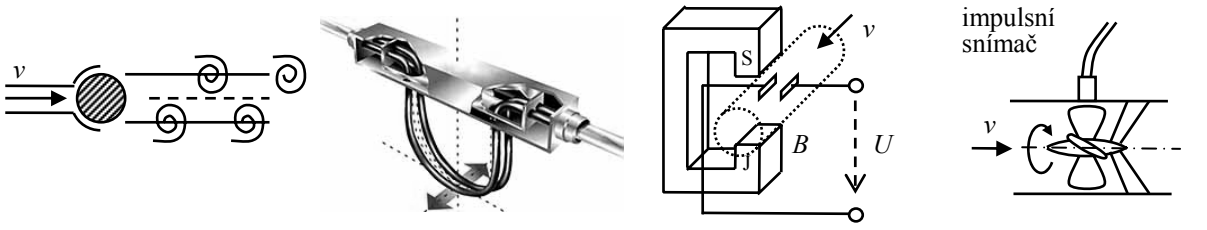
Obrázek 3.45 – Podmínky správné instalace clony do potrubí

Výjimečně lze měřit tlakovou diferenci na vnitřním a vnějším ohybu kolena.

Přehled použitelných snímačů průtoku lze nalézt na internetu [Orlíková, 2001]. Kromě snímačů se škrcením průtoku clonou, dýzou nebo Venturiho trubicí lze použít další principy, viz obrázek 3.45

- Vírové průtokoměry založené na principu von Karnamově efektu, kdy po stranách překážky neaerodynamického tvaru, která je obtékána tekutinou, se střídavě na obou stranách oddělují víry, které vytvářejí tzv. von Karmanovou stezku. Frekvence vzniku vírů je v určitém rozsahu hodnot Reynoldsova čísla nad 10^4 úměrná rychlosti proudění tekutiny, a proto i velikosti průtoku
- Průtokoměry založené na měření Coroliusovy síly, která vzniká ve vibrujících měřicích trubicích při průtoku hmotného média. Fázový posuv v rezonančním kmitání trubic, který vzniká jako důsledek působení Coriolisovy síly, je úměrný hmotnostnímu průtoku tekutiny trubicí a frekvence vlastních kmitů odpovídá hustotě tekutiny.
- Průtokoměry využívají principu již zmíněného Faradayova zákona elektromagnetické indukce. Pohybem vodiče (u měření průtoku pohybem tekutiny) v homogenním magnetickém poli se indukuje elektrické napětí.
- Turbínkové průtokoměry snímající objemový průtok. Jejich konstrukce je založena na volně otočném rotoru s lopatkami. Rotor se vlivem proudění tekutiny otáčí a jeho otáčky jsou úměrné rychlosti proudění tekutiny. Otáčky bývají snímány bezdotykovým indukčním snímačem, kdy výstupem jsou napěťové impulsy.

Vzájemné porovnání výše uvedených metod měření pro různé kapaliny a plyny je v tabulce 3.4.



Karmanův efekt | Coroliusovy síly | Faradayův zákon | Turbínkový snímač

Obrázek 3.46 – Principy dalších průtokoměrů

Tabulka 3.4 – Doporučení pro použití průtokoměrů

	Medium			
Průtokoměr	čisté plyny	pára	čisté kapaliny	kapaliny s pevnými částicemi
vírový	vhodný	vhodný	vhodný (pro kapaliny s malou viskozitou)	nevhodný
Coriolisův	vhodný	vhodný	vhodný (ne pro extrémně viskózní kapaliny)	vhodný (ne pro extrémně viskózní kapaliny)
magneticko-indukční	nepoužitelný	nepoužitelný	vhodný pro vodivé kapaliny	vhodný pro vodivé kapaliny
clona s měřením diferenčního tlaku	vhodný	vhodný	vhodný pro málo viskózní kapaliny	nevhodný
turbínový	vhodný za určitých podmínek	nevhodný	vhodný pro málo viskózní kapaliny	nevhodný

❑ Snímače síly a krouticího momentu pro regulaci

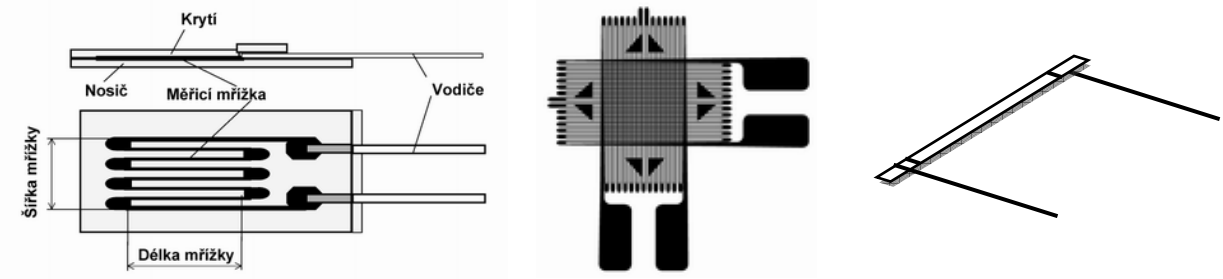
Nejběžněji se pro měření síly nebo krouticího momentu používají tenzometry. K dispozici jsou dva druhy a to kovové tenzometry a polovodičové tenzometry. Jejich princip funkce je odlišný. Kovové tenzometry využívají zúžení odporové dráhy při jejím protažení při neměnném měrném odporu materiálu, ze kterého se vyrábějí. Jedná se o slitinu konstantan (55% mědi a 45% cínu), jejíž měrný odpor téměř nezávisí na teplotě. Zatímco polovodičové tenzometry mění svůj měrný odpor v důsledku piezorezistentního jevu. Oba druhy tenzometrů mají rozdílné použití. Polovodičové tenzometry mají vysokou citlivost, naproti tomu kovové tenzometry jsou málo závislé na teplotě a mají vysokou stálost a také přesnost.

Kovové tenzometry se vyrábějí z jemného konstantanového drátku o průměru 0,01 až 0,02 mm nebo se leptají z tohoto materiálu, který je nanesen na fólii a jeho tloušťka je 0,001 mm. Elektrický odpor je 120 až 600 Ω. Součinitel deformační citlivosti, parametr k v rovnici (3.8), je roven 2. Přesnost měření pozitivně ovlivňuje nízký teplotní součinitel elektrického odporu konstantanu 5×10^{-6} °C 1/K. Polovodičové tenzometry mají součinitel deformační citlivosti roven 130.

Vedle tenzometrů pro měření povrchové deformace v tahu a tlaku v určeném směru jsou vyráběny tenzometry s mřížkami vzájemně pootočenými o 45°, které jsou určeny k

měření torzní povrchové deformace (např. hřídelů zatěžovaných krouticím momentem). Pro měření hlavního vektoru povrchové deformace v neznámé rovině napjatosti se používají tzv. rozety složené nejčastěji ze dvou tenzometrů vzájemně pootočených o 90°.

Aktivní délka tyčinek polovodičových tenzometrů mezi zlatými vývody je 2 až 10 mm, šířka 0,2 až 0,4 mm a tloušťka 0,01 až 0,03 mm. Ohmický odpor polovodičového tenzometru může být 60 až 1000 Ω. Polovodičové tenzometry jsou vyráběny pouze s přibližně stejnými metrologickými parametry a pro zapojení do měřicích obvodů jsou vybírány s těmito co nejpodobnějšími daty. Nároky na tmel spojující polovodičové tenzometry s měřeným objektem jsou vyšší, než tomu je u kovových tenzometrů.

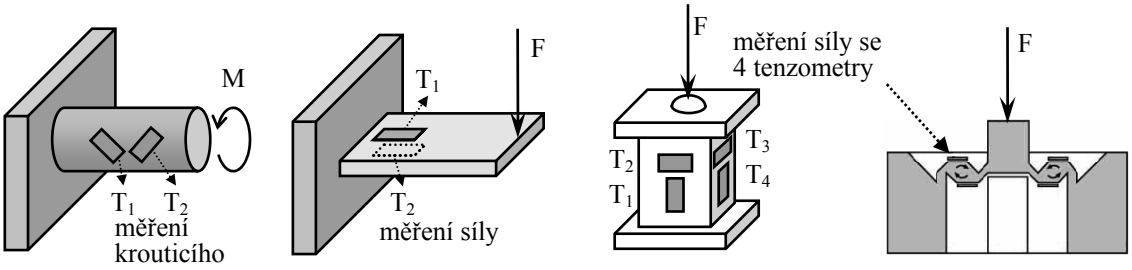


Drátový tenzometr | Fóliový tenzometr | Polovodičový tenzometr

Obrázek 3.47 – Provedení kovových a polovodičových tenzometrů

Statická charakteristika závislosti výstupního signálu na deformaci měřicího členu při konstantní teplotě může být zatížena chybou 0,1 až 1 %. Vliv teploty je podle dokonalosti výběru tenzometrů 0,05 až 0,5 % . 10 K^{-1}. Účinnou kompenzaci vlivu teploty lze zavést v intervalu 50 °C. Teoreticky lze polovodičové tenzometry využívat v intervalu teplot –70 °C až 300 °C.

Ukázka jejich provedení je na obrázku 3.46. Na obrázku 3.47 je znázorněno umístění tenzometrů pro měření síly a krouticího momentu. Pro měření síly na konci vetknutého nosníku a pro měření krouticího momentu jsou použity dva tenzometry. U vetknutého nosníku je tenzometr T_1 namáhán na tah a druhý na tlak. Při namáhání profilu prostým krutem je velikost hlavních napětí shodná s velikostí maxima smykových napětí v rovinách pootočených o 45^0, což určuje polohu tenzometrů T_1 a T_2, z nichž první je namáhán na tah a druhý na tlak. Oba tenzometry jsou shodně ovlivňovány teplotou, a proto se její účinek ruší, jestliže jsou ve větvi můstku, která je připojena na napájecí napětí. Při použití čtyř tenzometrů pro měření síly působící na deformační člen je jedna dvojice aktivní (největší citlivost na protažení) a druhá dvojice tenzometrů plní funkci pro kompenzaci teploty. Oba aktivní tenzometry jsou v můstku na jeho protějších stranách. Aktivní a kompenzační tenzometr jsou ve větvi můstku, která je připojena k napájecímu napětí. Vliv změn teplot na velikost odporu nemění dělicí poměr této větve. Tvar deformačního elementu může být volen tak, aby se dosáhlo co největší citlivosti měření. Zároveň je třeba jistit snímač proti přetížení, jak je ukázáno na nákresu deformačního členu v obrázku 3.47 vpravo.



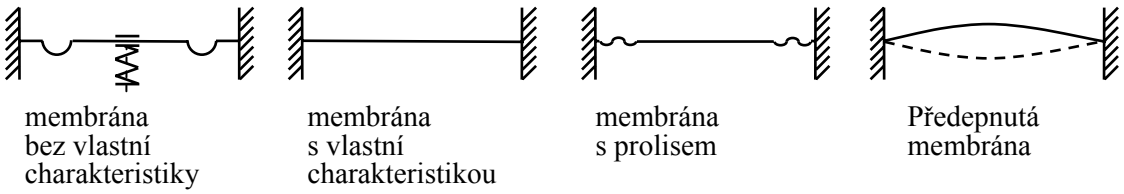
Obrázek 3.48 – Umístění tenzometrů

Snímače krouticího momentu jsou umísťovány na rotující hřídel, což způsobí problém přenosu na stacionární vyhodnocovací zařízení. Přenos se řeší rádiovým signálem nebo stěracími kroužky.

❑ Snímače tlaku a diferenčního tlaku pro regulaci

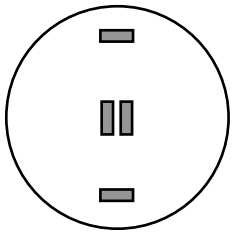
Tlakoměry lze rozdělit na kapalinové a deformační. Kapalinové tlakoměry vychylují kapalinu v U-trubici. V minulosti se pro diferenční tlak používala náplň se rtutí, která se působením tlaku vychýlila a natočila prstenec a s ním spojený ukazatel. Nyní se kapalinové tlakoměry používají jen pro samotné měření.

Deformační tlakoměry jsou membránové a nebo s Burdonovou pružinou, která je známá z mechanických tlakoměrů s ručičkou. Měřený tlak se převádí například některou variantou uspořádaní membrány na výchylku nebo sílu, která se měří dříve popsanými postupy. Varianty uspořádání membrány jsou znázorněny na obrázku 3.48. Charakteristika membrány je závislost prohnutí na tlaku. První uspořádání bez vlastní charakteristiky představuje spojení desky přes pružnou pryžovou manžetu ke stěně komory. Charakteristika membrány je dána pak připojenou pružinou. Ostatní způsoby řešení jsou zřejmé z popisu zmíněného obrázku.

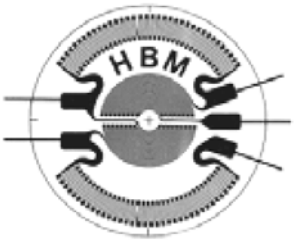


Obrázek 3.49 – Provedení membrán

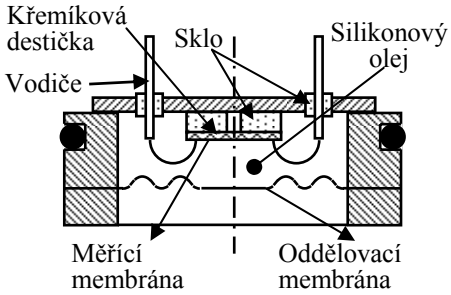
U membrány s vlastní charakteristikou lze snímat mechanické napětí tenzometrickou růžici nebo čtyřmi tenzometry, z nichž dva jsou aktivní (ve středu) a dva pasivní (u okraje) pro kompenzaci vlivu teploty. Zvláštní řešení je u membrán z polovodiče (monokrystalický křemík), které obsahují přímo vyleptané odpory ve funkci tenzometrů. V tomto případě je tlak převeden na sílu, která se měří tenzometry. Způsoby vyhodnocení mechanického napětí jsou zobrazeny na obrázku 3.49.



Umístění tenzometrů na membráně



Tenzometrická růžice firmy HBM



Polovodičový tlakoměr

Obrázek 3.50 – Umístění tenzometrů

Snímače tlakové diference jsou konstruovány pro malý rozdílový tlak. Nejlépe vyhoví membrána bez vlastní charakteristiky s převodem na sílu, kterou lze měřit například na kompenzačním principu podle obrázku 3.37.

❑ Snímače hladiny pro regulaci

Hladinoměry rozdělujeme na

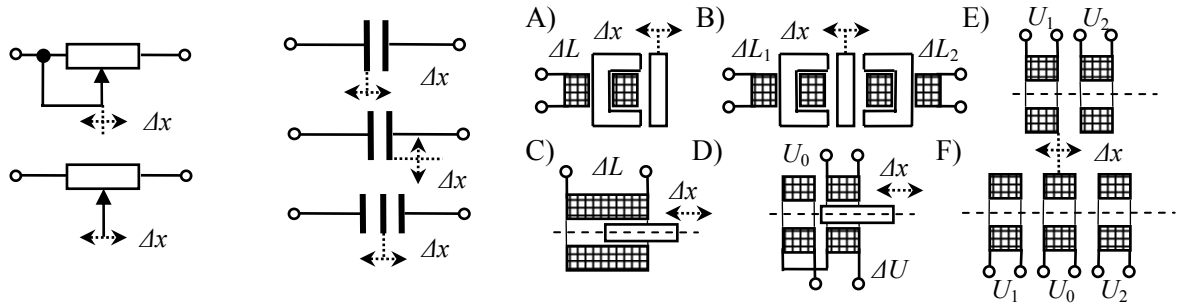
- Plovákové pro kapaliny s převodem na odměřování dráhy například potenciometrem.
- Kapacitní s převodem na změnu kapacity, která se vyhodnocuje elektronicky.
- Hydrostatické pro kapaliny s převodem na měření hydrostatického tlaku ($p = h\rho g$)
- Ultrazvukové, které jsou založeny na principu měření doby mezi vysláním a zpětným příjmem ultrazvukového signálu odraženého od hladiny materiálu.
- Radarové se stejným principem měření jako ultrazvukové, ale místo ultrazvuku jsou použity rádiové vlny.
- Ionizační se dvěma způsoby: první měří absorbované záření a druhý vyhodnocuje vzdálenost mezi zdrojem a detektorem záření.

❑ Snímače polohy pro regulaci s analogovým výstupem

Snímačů polohy je velké množství druhů. Snímače využívají změny elektrického odporu, indukčnosti nebo kapacity, jak je znázorněno na obrázku 3.49. Odporové snímače mohou měnit velikost odporu ve vztahu k poloze nebo posunutí nebo představují dvojici odporů v uspořádání, které tvoří potenciometr. Oba odpory odděluje jezdec potenciometru. Mechanický pohyb je v tomto případě spřažen s tímto jezdcem. Vyhodnocovací metody jsou již popsané můstkové metody a tzv. výchylkové metody, u kterých odpor určuje proud v obvodu a jeho stupnice je ocejchována v posunutí.

Uspořádání snímačů založených na změně kapacity je rovněž uvedeno v obrázku 3.50. Jsou zde znázorněny pohyby elektrod ve dvou směrech a pohyb vložené elektrody u diferenciálního elektrického kondenzátoru. Další varianty uspořádání lze odvodit z pohybu dielektriky mezi elektrodami. Vyhodnocovací elektronické obvody používají již popsaný můstek nebo vlivu proměnné kapacity kondenzátoru ve zpětné vazbě zesilovače, ve kterém

jsou odpory nahrazeny elektrickými kondenzátory, a nebo rezonanční metody využívající změny rezonanční frekvence rezonančního obvodu.



Odporový snímač | Kapacitní snímače | Indukční snímače

Obrázek 3.51 – Metody měření polohy převodem na změnu elektrického odporu, kapacity a indukčnosti

Indukční snímače na obrázku 3.50 lze rozdělit na snímače

- s uzavřeným magnetickým obvodem (ad A) a ad B))
- s otevřeným magnetickým obvodem (ad C) a ad D))
- snímače bez feromagnetika (ad E) a ad F))
- snímače s potlačeným magnetickým polem (aplikace vířivých proudů).

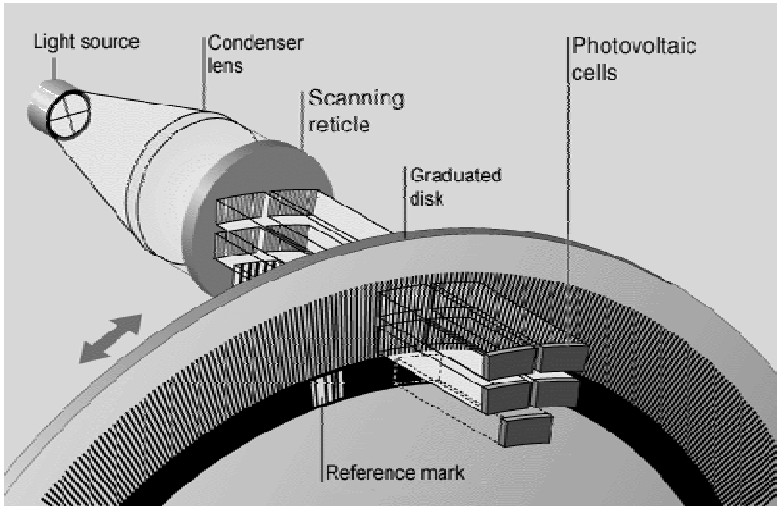
U indukčních snímačů s feromagnetikem v magnetickém obvodu je indikován posun části jádra cívka. Vzduchová mezera se může rozšiřovat nebo zužovat, ale také se může měnit překrytí průřezu jader. U snímačů bez feromagnetika se vzájemně posouvají samotné cívky, což ovlivňuje jejich indukční vazbu. Zapojení indukčních snímačů ad D) a ad F) představuje diferenciální transformátor (u zapojení ad F) je třeba spoje cívek s výstupem U_1 a U_2 doplnit.

Elektrické zapojení vyhodnocovacích obvodů se opírá principiálně o stejné zapojení jako v případě kondenzátorů. Podstatné je, že obvody pracují se střídavým proudem, zatímco odporový potenciometr dovoluje použít i stejnosměrné napájecí napětí.

❑ Snímače polohy pro regulaci s číslicovým výstupem

Analogové snímače nejsou vhodné pro velmi přesné měření jaké je požadováno například u obráběcích strojů. Základem pro velmi přesné odměřování polohy jsou optické snímače úhlového natočení a snímače lineárního pohybu, které využívají převod polohy přímo na číslicový údaj. Bez ohledu na konkrétní fyzikální princip lze tyto snímače rozdělit na snímače na

- inkrementální
- absolutní.

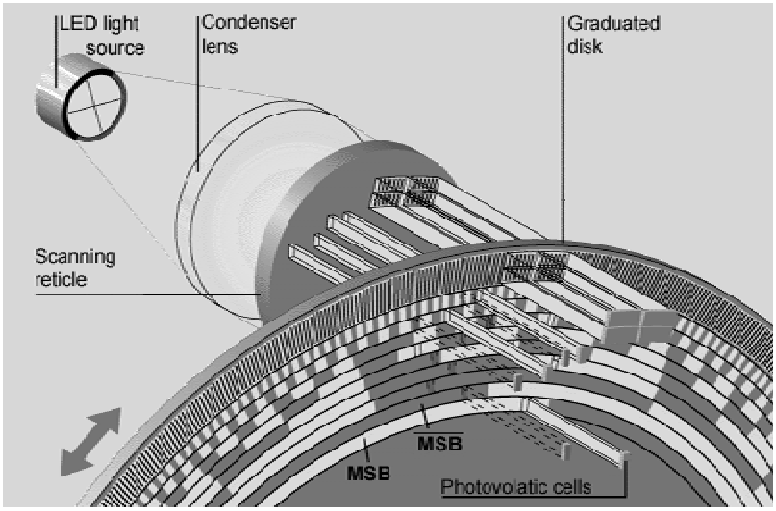


Obrázek 3.52 – Inkrementální optický snímač natočení

Inkrementální optické snímače například firmy Heidenhein obsahují zdroj světla (light source) jehož paprsky procházejí kondenzorovou (condenser lens) čočkou, přičemž vytvoří svazek rovnoběžných paprsků. Tyto paprsky procházejí optickou skenovací mřížkou (scanning reticle) a pak pohyblivým diskem opatřeným ryskami (graduated disk). Interferencí světla při otáčení disku vznikají stavy světla a tmy. Tyto změny osvětlení se vyhodnocují pomocí dvou párů fotobuněk (photovoltaic cells)) Optická skenovací mřížka je zhotovena tak, že vzniknou dva elektrické signály, které jsou fázově posunuty o čtvrť periody signálu. Vzájemný fázový posun určuje smysl otáčení kotouče. Elektronické zařízení dále dělí periodu signálu, takže rozlišení je od dva řády jemnější. Vzdálenost rysek na mřížce je řádově 10 až 20 mikronů, zatímco elektronickým dělením lze dosáhnout až 0,01 mikronu. K určení referenční polohy je na disku ještě zvláštní značka (reference mark). Funkční schéma úhlového inkrementálního snímače je na obrázku 3.51.

Úhlové snímače, které generují řadu impulsů, mohou být použity buď k měření uhlového natočení (počet přijatých impulsů je úměrný úhlu otočení) nebo jsou určeny k vyhodnocování otáček (frekvence impulsů je úměrná úhlové rychlosti). Snímače natočení se anglicky označují angle encoders, zatímco snímače otáček rotary encoders.

U inkrementálního snímače natočení je třeba po každém zapnutí stroje najet na referenční značku. Je také nebezpečí ztráty informace o poloze. Absolutní odměřování detekuje polohu takovou, jaká právě je, protože snímá informaci z velkého množství referenčních značek ve formě dalších stop na kódovacím kotouči. Princip funkce těchto snímačů je zřejmý z obrázku 3.52. Mezi těmito značkami je snímána poloha inkrementálně. Kódování polohy je pomocí Grayova kódu, jehož výhodou je to, že sousední kódové kombinace se liší v jednom bitu, což minimalizuje případnou chybu, která je nejvýše rovna otočení kódovacího kotouče o jednu rozeznatelnou polohu. Kdyby se při tomto otočení měnilo více bitů a změna by proběhla jen u některých bitů, pak by byla chyba mnohonásobkem základního rozlišení.



Obrázek 3.53 –Absolutní optický snímač natočení

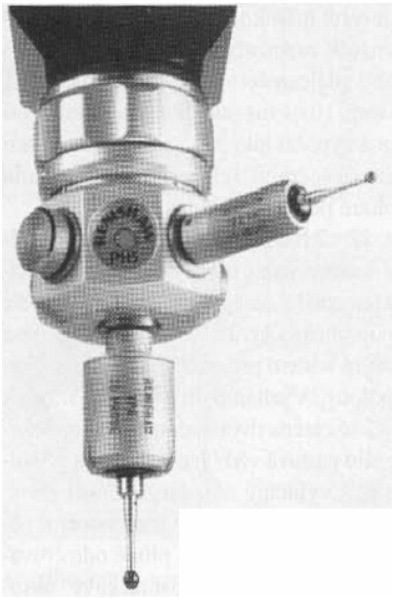
Odměřování polohy je rozdělováno na

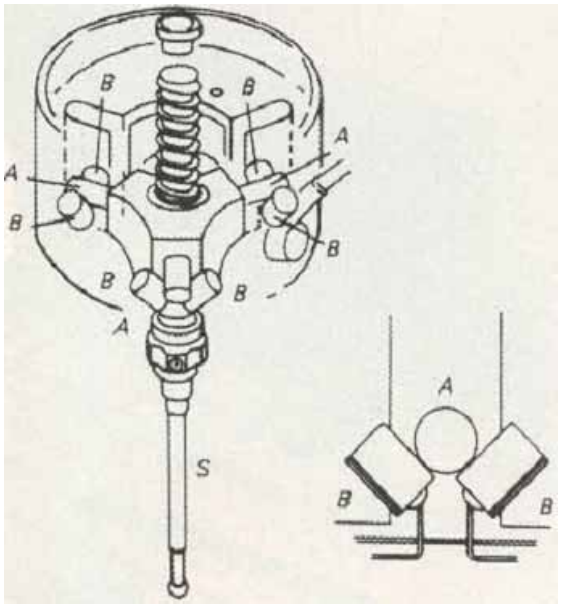
- přímé – snímač lineárního posunutí je nezávislý na pohonu, tj. je spojen s posunovanou součástí
- nepřímé – snímač úhlového natočení je na stejné ose jako servomotor pro přestavení polohy.

❑ Dotykové sondy

K přesnému odměřování polohy patří kontaktní sondy. Jsou to snímače s kontaktním výstupem. Příklad řešení takové sondy od firmy Reinishaw je na obrázku 3.53 vlevo a princip funkce je znázorněn vpravo. Kulový dotykový hrot je tvořen z otěruvzdorného materiálu. Dotykem s kontrolovaným obrobkem dojde k vychýlení hrotu a rozpojení elektrického obvodu. V tělese sondy jsou tři páry tangenciálně rozmístěných válečků B, mezi něž dosedají pod lehkým přítlakem centrální pružiny tři tangenciálně rozmístěné válečky A, které nesou vlastní dotyk S (Stylus). Všech šest válečků B je elektricky izolováno a elektricky propojeno po obvodu tak, že elektrické spojení je zprostředkováno válečky A. Obvodem prochází nepatrný proud. Po dotyku kulového konce se může sonda vychýlit o značný úhel, což zabrání jejímu mechanickému poškození, ovšem elektrický obvod se přeruší okamžitě po dotyku a nadzvednutí některého válečku A. K přerušení dojde i při axiálním dotyku sondy. Elektrické spojení se obnoví okamžitě po ztrátě dotyku s obrobkem. Sonda se tedy používá k indikaci dotyku kulového konce s povrchem obrobku při odměřování vzdáleností.

Dotykové sondy se používají v třísouřadnicových zařízení pro kontrolu rozměrů výrobků.





Provedení sondy fy Reinishaw Princip funkce kontaktní sondy

Obrázek 3.54 – Princip funkce kontaktní sondy

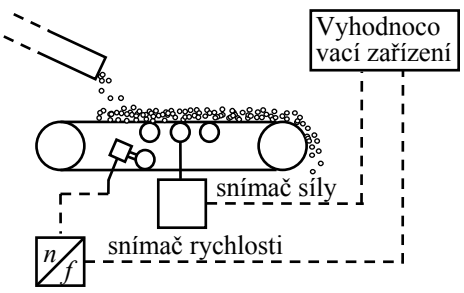
❑ Průtok sypkých hmot

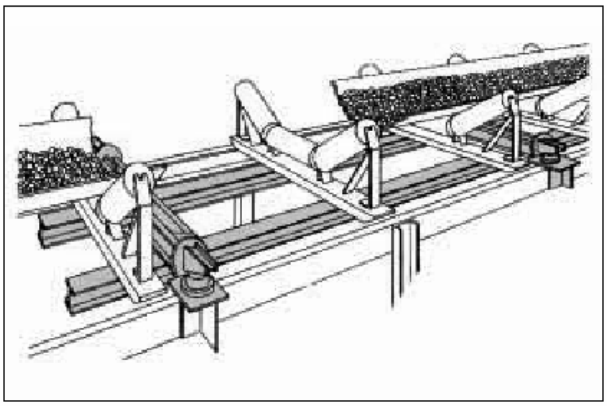
Regulace průtoku sypkých hmot a materiálů má široké uplatnění při vytváření směsí nebo dodávku materiálu do technologického zařízení. Příkladem může být zavážení paliva do kotle. Princip měření spočívá v umístění jednoho nebo skupiny více válečků dopravníku na snímače váhy. Součin této váhy a rychlosti pásu představuje průtočnou hmotu.

Pro zatížení, které je přepočteno pomocí gravitačního zrychlení g na hmotu o velikosti $q = F/g$ [kg] na úseku pásu délky l [m], který se pohybuje rychlostí v, je přepravované množství v [kg/s]

$$P = \frac{q\,v}{l} = \frac{q\,l}{l\,t} = \frac{q}{t}. \qquad (3.13)$$

Snímače síly jsou obvykle tenzometry uspořádané do tenzometrického můstku, který býval dříve napájen napětím z tachodynama. Nyní je toto zařízení řešeno číslicově, a proto se rychlost, která je stanovená impulsním tachodynamem, násobí se zatížením číslicově, protože zaručuje zvláště pro rychlost pohybu pásu přesnější měření. Příklad provedení jedno a víceválečkové pásové váhy je na obrázku 3.54.





Jednoválečková váha Víceválečková váha Schenk

Obrázek 3.55 – Princip pásové váhy

Minimální provozní chyba je v rozmezí 0,5 až 1%. Maximální přepravní výkon je až 15000 t/h.

Pro případ, kdy se materiál nedopravuje materiál po páse se používají skluzové nebo odrazové desky, viz obrázek 3.55. Principem měření je úměra síly vyvozená změnou směru toku materiálu.

Obrázek 3.56 – Princip měření množství sypkých hmot skluzovou a odrazovou deskou

Otázky 3.5.

1. Kde se umístí na potrubí clona pro měření průtoku?
2. Lze umístit na potrubí clona pro měření průtoku do kolena?
3. Co se používá nejčastěji pro měření do teploty do 300 0C?
4. Při regulaci sypkých hmot a materiálů se používá odrazové desky. Jaký je její princip?

3.7. Akční členy

Čas ke studiu: 2 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat akční členy, jejich rozdělení, převody pohybů, regulační orgány pro ovládání průtoku plynů, par a kapalin.
- popsat kontinuálního dávkování sypkých hmot.

Výklad

Akční členy jsou velmi závislé na aplikační oblasti řízení. Nejobecněji pojatou funkcí řízení a regulace je ovládání toku energie. Energie v podobě toku hmotných, plynných a

kapalných medií se ovládá mechanicky prostřednictvím škrticího orgánu, který mimochodem způsobuje ztráty, nebo řízením výkonu dávkovací váhy, čerpadla a nebo kompresoru. Jestliže tok energie nemá hmotnou podobu, jako je tomu například v případě elektrické energie, je ovládáno napětí nebo proud regulovaného zdroje. Také zde může být regulace toku ztrátová nebo bezeztrátová. Obecná charakteristika funkce řízení jako toku energie platí i v takovém případě, kdy jde o řízení polohy nebo síly, resp. tlaku. Systému je třeba dodat energii pro přestavení polohy nebo zvýšení (snížení) tlaku.

V učebním textu, který je určen studentům strojního inženýrství, je pozornost zaměřena na kinematiku (poloha) nebo dynamiku pohybu (síla). Může jít o pohyb akčních orgánů (ventily, klapky) nebo také regulované veličiny (poloha, rychlost, otáčky, síla, tlak). Do pohybu uvádějí různá mechanická zařízení pohony. Pohony lze rozdělit podle formy spotřebované energie takto

- elektrický
- hydraulický
- pneumatický
- piezoelektrický (místo pohon je používáno označení aktuátor).

Mechanické pohony mohou vykonávat dva druhy pohybu

- přímočarý
- otáčivý

Cílem řízení u otáčivého pohybu pohonů může být dosažení zadaných otáček nebo otočení. U přímočarých pohonů je cílem řízení dosažení žádoucího posunu nebo rychlosti pohybu. Někdy se také dělí řízení mechanických systémů na polohové nebo rychlostní.

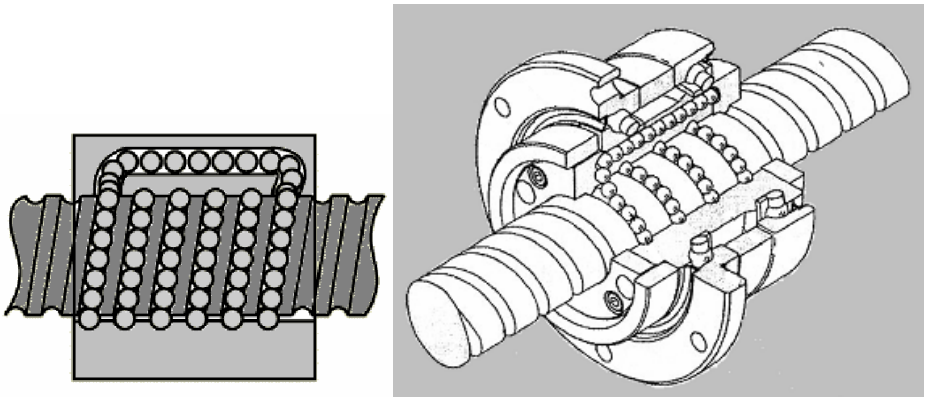
❑ Převody pohybů

Pohony pro automatizaci mají určité charakteristiky. Elektrické pohony lze konstruovat a dimenzovat snadno pro vysoké otáčky (výjimka jsou krokové motory). Často je žádoucí pohyb přímočarý. Pro mechanické systémy proto připadají v úvahu dva druhy převodů

- otáčivý pohyb na přímočarý
- otáčivý pohyb o vysokých otáčkách na otáčivý pohyb na nízkých otáčkách

Kuličkové šrouby

Tento strojní konstrukční prvek slouží k převedení rotačního pohybu na přímočarý. Plní funkci například posuvů obráběcích strojů. Je navržen tak, aby neměl prakticky žádnou vůli. Jeho konstrukce je zřejmá z obrázku 3.56. Kontakt mezi šroubem a otočnou maticí není třecí, ale odvalovací a je zprostředkován kuličkami.

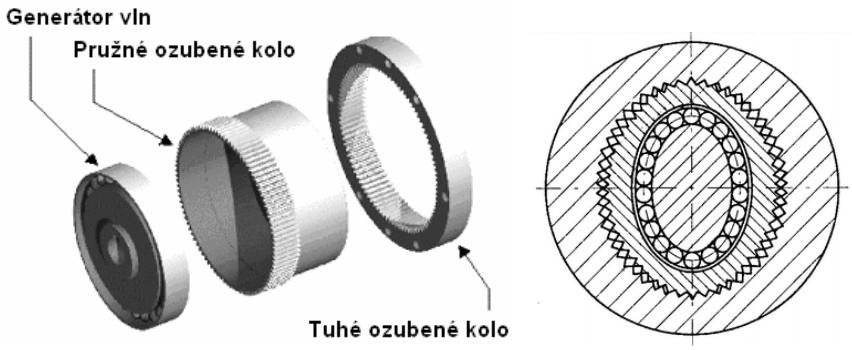


Obrázek 3.57 – Kuličkový šroub

Harmonické převodovky

K demonstraci funkce je vybrána harmonická převodovka firmy TG Drivers (www. TG-Drivers.cz), viz obrázek 3.57. Tyto převodovky typu jsou zvlášť vhodné pro aplikace vyžadující velké převodové poměry mezi motorem a poháněným zařízením prostřednictvím jednoho převodového stupně. Lze je použít k pohonu ramen robotů. Základními částmi převodovky jsou: pružné ozubené kolo, tuhé ozubené kolo a generátor vln (unášeč). Tuhé ozubené kolo má o dva nebo tři zuby více než pružné ozubené kolo. Pružné ozubené kolo s vnějším ozubením a počtem zubů například o dva menším než tuhé ozubené kolo s vnitřním ozubením je deformováno přes eliptický generátor vln a jeho zuby zapadají do zubových mezer v místě hlavní osy elipsy. Při otočení generátoru vln o jednu otáčku se posune pružné kolo o dva zuby vůči tuhému kolu v opačném směru. Pružné ozubené kolo má dno zesílené přírubou sloužící k upevnění výstupního hřídele převodovky. Tuhé ozubené kolo umožňuje montáž do skříně převodovky nebo na přírubu servomotoru. Generátor vln se montuje na hřídel servomotoru. Předností harmonických převodovek jsou následující

- velký převodový poměr (50 - 276)
- malé rozměry a nízká hmotnost, vysoká torzní tuhost
- vysoká opakovatelná přesnost, dlouhá životnost
- nízká vůle do 1 a 3 úhlových minut
- vysoká účinnost 75 až 85%.

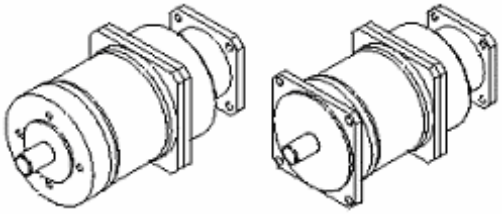


Obrázek 3.58 – Princip harmonické převodovky

Planetové převodovky

Planetové převodovky jsou konstruované pro použití v aplikacích pro řízení polohy. Je výhodné je využít při požadavku menších převodových poměrů (do $i = 50$). Redukují otáčky synchronního motoru, řízeného měničem frekvence. Přesným provedením převodovek je zaručena malá vůle, rovnoměrný chod a velká účinnost. Z hlediska vůlí se tyto převodovky vyrábějí v přesnostech od 1 do 20 úhlových minut. Uložení výstupní hřídele umožňuje radiální i axiální zatížení. Přesné a tvrdé provedení ozubení snižuje třecí momenty a umožňuje zmenšit rozměry ozubených kol, což má za následek snížení momentu setrvačnosti převodovky. Příklad jejich provedení je na obrázku 3.58.

Provedení čelní příruby



Obrázek 3.59 – Planetové převodovky firmy TG Drivers

❑ Regulační orgány pro ovládání průtoku plynů par a kapalin

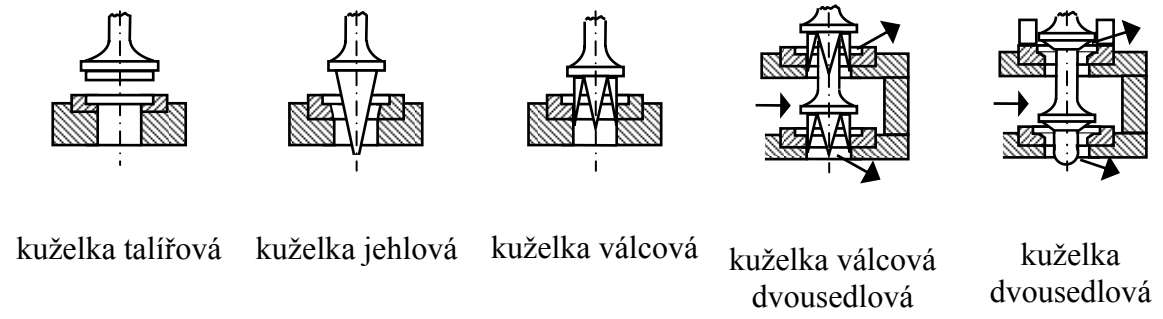
K ovládání průtoku uvedených médií se používají konstrukční prvky

- ventily (uzavírací, regulační, třícestné směšovací, pojistné zpětné a škrtící)
- kohouty (válcový, kuželový, kulový)
- šoupátka
- klapky (klapka jednoduchá a protisměrná, také křídlový ventil)
- žaluzie.

Ventil se skládá z tělesa, sedla, kuželky (podle tvaru talířové, jehlové, válcové a dvousedlové, dříku a těsnění). Charakteristickým znakem ventilu, že v něm dochází ke změně směru proudění a není tedy přes něj vidět a nelze jím prostrčit rovný drát. Ukázky konstrukce kuželek je na obrázku 3.59. Jehlové ventily slouží k jemné regulaci průtoku. Pracovním prvkem je zabroušená jehla, zasouvaná do kalibrovaného otvoru. Talířové ventily pracují s plochým talířem, zapadajícím do obrobeného osazení v tělese ventilu. Ventil je schopen udržet velmi vysoké tlaky, využíván je pro svou samotěsnící schopnost ve spalovacích motorech. Variantou talířových ventilů je pružně poddajná membrána. Používají se mimo jiné v konstrukcích dýchacích přístrojů a respirátorů či v automobilovém průmyslu [http://cs.wikipedia.org/wiki/Ventil].

Kuličkové ventily se používají k zamezení zpětného toku pracovního média. Pracují s kuličkou, unášenou v pracovním směru proudem média. Při obrácení toku je kulička médiem vtlačena do osazení a zastaví tak průtok nežádoucím směrem. Tento ventil je vhodný na kontrolu zapnutí/vypnutí.

Podle funkce lze ventily rozdělit na uzavírací, regulační, třícestné směšovací, pojistné zpětné a škrtící. Hlavní funkce uzavíracích ventilů je těsnit, například plyn, proti vyššímu tlaku. Do skupiny uzavíracích ventilů patří také solenoidové ventily ovládané elektrickým proudem. U regulačních ventilů je přípustná netěsnost po uzavření 1% u jednosedlového ventilu a 5% u dvousedlového ventilu.



Obrázek 3.60 – Konstrukce kuželek ventilů

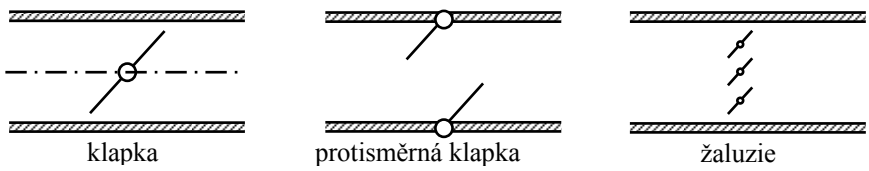
Třícestné ventily jsou rozdělovací a směšovací. Používají se v chemickém průmyslu a v tepelné technice pro regulaci teploty.

Zpětné ventily mají rozdílnou charakteristiku při změně směru proudu. Účel škrtících ventilů je obdobný elektrickému odporu.

Kohouty se uzavírají pootočením otočné částí. Patří mezi uzavírací armatury, protože jsou velmi těsné. Podle tvaru otočného tělesa se dělí na válcové, kuželové, a kulové. Pracovní částí kohoutu je obrobený a provrtaný válec, koule nebo kužel, otáčející se v zalapovaném prostoru s přívodním a vývodovým potrubím umístěným v ose vrtání. Kohout může pracovat s vysokými tlaky při relativně malé potřebné ovládací síle. Z tohoto důvodu jsou často využívány u energetických zařízení. Tento ventil je vhodný na regulaci toku. Kohout lze snadno rozebrat a vyčistit, proto bývá využíván ve výrobních technologiích a chemických aparaturách.

Šoupátko je rovněž uzavírací armatura typu stavidla, které se pohybuje přímočaře.

Klapka je umístěná v průřezu potrubí a je otočná. Jsou vyráběny jako jednoduché klapky, protisměrné klapky a nebo žaluzie s více listy. Žaluzie a protisměrná klapka je vhodná v potrubích s obdélníkovým průřezem, které je používáno v klimatizaci. Tyto typy regulačních orgánů jsou znázorněny na obrázku 3.60.

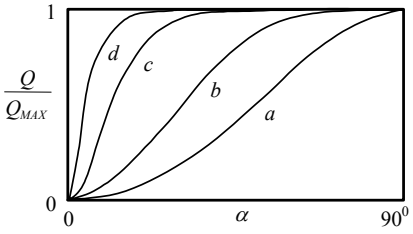


Obrázek 3.61 – Regulační orgán pro průtok vzduchu a plynu

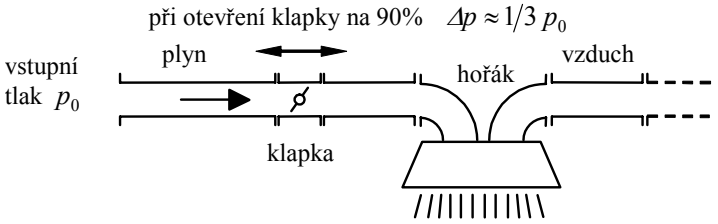
O funkci regulačního obvodu rozhoduje charakteristika regulačního orgánu, kterým je závislost průtočného množství na jeho poloze, nejčastěji úhlu natočení α. Průtočné množství se udává relativní vzhledem k průtočnému množství při plně otevřeném průtočném průřezu. Průtočné množství je přirozeně závislé na vstupním tlaku. Na obrázku 3.61 vlevo je znázorněn příklad této charakteristiky pro klapku v potrubí. Nejvýhodnější pro regulaci je

průtok přímo úměrný natočení klapky. Nejblíže lineární charakteristice je charakteristika *a*, zatímco charakteristika *d* využívá regulačního rozsahu natočení jen z části. Projektant regulačního obvodu musí správně dimenzovat škrtící orgán. Je vhodné, aby závislost velikosti průtoku na stupni otevření (reprezentováno posunem nebo natočením) byla v co největším rozsahu lineární. Například pro plyny platí, že při téměř otevřeném regulačním orgánu (např. na 90%) má být tlakový spád na tomto škrtícím orgánu asi třetinou vstupního tlaku jak je znázorněno na obrázku 3.61 vpravo. Špatně dimenzována škrtící klapka je například tehdy, jestliže při zavírání se do stupně otevření 10% průtok téměř nezmění a klapka začne regulovat průtok v posledních 10% procentech rozsahu nastavení úhlu otevření před uzavřením. Při projektování regulačního obvodu je třeba se pečlivě seznámit s doporučeními, které výrobce různých škrtících klapek nebo žaluzií doporučují pro jeho správnou funkci.

Jak již bylo zmíněno, směšovací trojcestné ventily slouží k regulaci teploty topné vody v systémech ústředního topení. Příklad je uveden na obrázku 3.62. Horká výstupní voda je směšována s vratnou ochlazenou vodou a do radiátorů proudí tedy voda se sníženou teplotou. Příklad škrtící klapky pro topnou vodu Honeywell (www.honeywell.cz) je na dalším obrázku 3.63.



Charakteristika regulační armatury



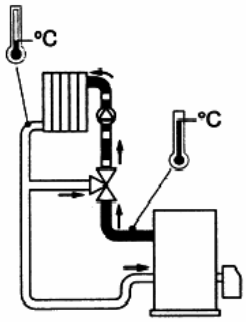
Podmínka správné funkce klaply nebo ventilu

Obrázek 3.62 – Volba vhodné regulační klapky

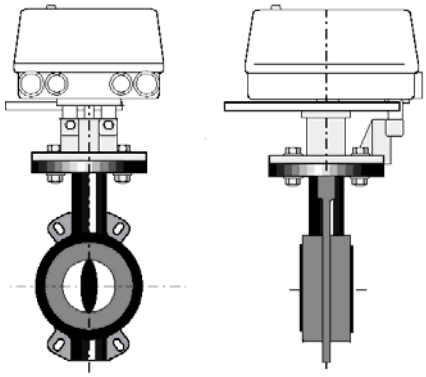
Průtok tekutiny ventilem lze popsat rovnicí (3.14), ve které k_V označuje průtokový součinitel ventilu. Průtokový součinitel je uváděn výrobci v katalogu a technickém popisu ventilu.

$$Q = k_V \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}}, \quad \left[m^3 s^{-1}; Pa, kgm^{-3}\right] \tag{3.14}$$

Již výše bylo uvedeno, že podmínkou správné funkce klapky je vhodná tlaková ztráta při otevřené poloze. Diagram závislosti tlakové ztráty pro různý stupeň otevření a objemovém průtoku na rychlosti proudění lze najít k katalogu dodavatele těchto regulačních prvků. Z diagramu se lze dovědět, jaký lze očekávat průtok nebo rychlost proudění kapaliny pro danou tlakovou ztrátu a úhel otevření škrtící klapky.



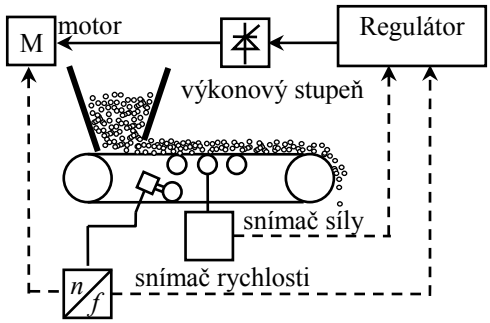
Obrázek 3.63 – Směšovací třícestný ventil u kotle ústředního topení



Obrázek 3.64 – Škrtící klapka pro topnou vodu, výrobek firmy Honeywell

❑ Kontinuální dávkování sypkých hmot

Zkrácené označení pro zařízení, které zajišťuje kontinuální tok sypkého materiálu ze zásobníku, je dávkovací váha. Toto zařízení je základem poměrové regulace průběžného dávkování směsi. Vynášení směsi ze zásobníku se řeší trojím způsobem, a to vibračními podávači, kde vynášený tok směsi je dán amplitudou vibrací, dále talířovými a pásovými vynášeči. U talířového podávače je pod zásobník umístěn rotující plochý talíř se svislou osou mimo osu otvoru zásobníku. Vynesená směs se pak shrnuje škrabkou.



Obrázek 3.65 – Princip pásové dávkovací váhy

Otáčky talířového podávače a rychlost vynášecího pásu spolu s velikostí štěrbiny mezi dolním okrajem zásobníku a pohybující se plochou určují vynášené množství komponenty směsi.

Poslední uvedený způsob dávkování, nyní již dominujícím, využívá krátkého podávacího pásu, jehož rychlost a případně velikost štěrbiny určuje dávkované množství. Princip funkce pásové dávkovací váhy je na obrázku 3.64.

Průběžná pásová dávkovací váha obsahuje jeden váleček, jehož svislé zatížení je snímáno a spolu s rychlostí pohybu pásu určuje vynášené množství dávkovaného sypkého materiálu. Vynášené množství je ovládáno změnou rychlosti pohybu pásu. Regulační smyčka pak změnami otáček pohonu vynášecího pásu udržuje zadaný průtok sypkého materiálu. Přesnost dávkování je shodná s přesností pásové váhy.

Otázky 3.6.

1. K čemu je kuličkový šroub?
2. K čemu slouží harmonická převodovka?
3. K čemu slouží žaluzie?

4. Jaká je podmínka správné funkce klapky?

3.8. Elektrické pohony

Čas ke studiu: 3 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat základní typy elektrických pohonů, pracovní oblasti, charakteristiky motoru, oblasti použití.
- charakterizovat základní prvky silnoproudé elektroniky sloužící k napájení pohonů a k jejich řízení.

Výklad

Tato kapitola obsahuje všeobecný popis vlastností elektrických pohonů včetně prvků silnoproudé elektroniky, které slouží k napájení pohonů a k jejich řízení.

Tranzistor ve spínacím režimu

Elektrický spínač uzavírá elektrický obvod pro průchod elektrického proudu. Je známo, že k sepnutí nebo k rozpojení spínače, například světelného obvodu v domácnosti, je třeba vnějšího impulsu. Pro větší proud budou na rozdíl od světelného vypínače kontakty spínače masivní a navíc může být výhodné, aby jeho sepnutí bylo dálkově ovladatelné. Řešení nabízí stykač, který byl již popsán v kapitole o logickém řízení.

Mechanické kontakty stykače se mohou opalovat obloukem, který vzniká ve fázi jejich přiblížení nebo oddálení před sepnutím nebo po rozepnutí zátěže indukčního charakteru. Jejich životnost není nekonečná. Je tedy výhodné používat bezkontaktní spínání polovodičovými prvky.

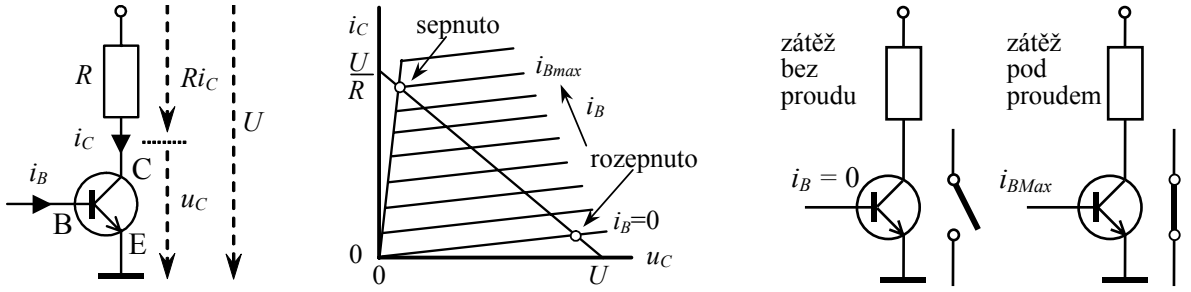
Nejjednodušší řešení poskytuje obyčejný tranzistor. Proud mezi kolektorem a emitorem u tohoto prvku je ovládán mnohem menším proudem v obvodu báze – emitor. Funkce bude vysvětlena na příkladu použití tranzistoru NPN, který je zapojen podle schématu na obrázku 3.65 vlevo. Charakteristika tranzistoru je funkce kolektorového proudu i_C na proudu bází i_B a napětí na kolektoru u_C. Platí

$$i_C = f(i_B, u_C). \tag{3.15}$$

Charakteristika tranzistoru je znázorněna v obrázku 3.66 uprostřed. Ve skutečnosti je to celá skupina křivek pro diskrétní hodnoty proudu bází. Linearizace poslední rovnice ukazuje, že mezi proudem báze a kolektorem platí přibližně $\Delta i_C = \beta \Delta i_B$, kde β je součinitel zesílení proudu. Mezi napájecí napětí o velikosti U a kolektor C je zapojen odpor o velikosti R. Napětí mezi kolektorem a emitorem (vývody tranzistoru C a E) je následující

$$u_C = U - R\, i_C. \tag{3.16}$$

V souřadnicích charakteristiky tranzistoru představuje poslední rovnice přímku, která protíná síť charakteristik tranzistoru a nazývá se zatěžovací. Velikost proudu bází je obvodu vnucena zvenčí, proto napětí mezi kolektorem a emitorem a proud kolektorem tvoří dvě neznámé veličiny soustavy dvou posledních rovnic. Jedna z těchto rovnic je lineární rovnice (3.16) a druhá je nelineární rovnice (3.15). Grafickým řešením této soustavy jsou průsečíky, tzv. pracovní body, charakteristik tranzistoru a zatěžovací přímky.



Tranzistor NPN | Charakteristika tranzistoru a zatěžovací přímka | Tranzistor jako spínací obvod

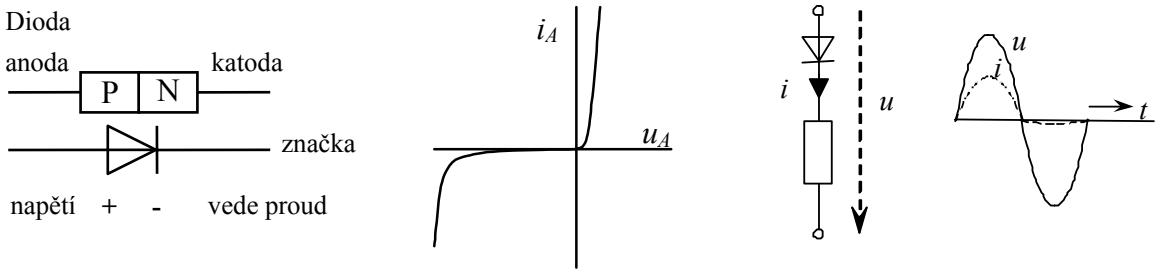
Obrázek 3.66 – Značka tranzistoru NPN, charakteristika a funkce ve spínacím režimu

Z množství pracovních bodů jsou ve spínacím režimu zajímavé pouze dva, a to pro nulový proud bází a pro proud bází, kterým jsou přechody tranzistoru nasyceny. Příslušné stavy jsou znázorněny na obrázku 3.65 vpravo. Při nulovém proudu bází prochází tranzistorem velmi malý proud a napětí na tranzistoru se blíží k napájecímu napětí. Zátěž není téměř pod proudem a chová se jako při rozepnutém ekvivalentním spínači. Druhý stav odpovídá proudu zátěží o velikosti téměř *U/R* a velmi malém úbytku napětí mezi kolektorem a emitorem. Tento stav odpovídá sepnutému ekvivalentnímu kontaktu. Teoreticky proud báze při sepnutí stačí takový, který odpovídá pracovnímu bodu sepnuto z obrázku 3.65. Pro bezpečnost funkce je vhodné volit proud báze poněkud větší. Pomůckou je parametr β tranzistoru. Příliš velký proud může prodloužit dobu rozepnutí u velmi rychlých obvodů.

Polovodičová dioda

Dioda je elektronický prvek, který za určitých podmínek vede nebo nevede elektrický proud. Princip funkce je založen na vlastnostech přechodu P-N, který je vytvořen z polykrystalického (selén) materiálu nebo monokrystalů (křemík nebo germanium). Tento materiál je slabě dotován nečistotami různého typu, které ve svém důsledku vyvolávají tzv. děrovou (P) nebo elektronovou vodivost (N). Základní vlastnosti polovodičové diody a obvodová značka jsou znázorněny na obrázku 3.68 vlevo. Volt-ampérová charakteristika diody, tj. závislost okamžitých hodnot proudu na napětí anoda-katoda, je na obrázku 3.66 uprostřed. Pro otevřenou diodu (kladné napětí na anodě) vzniká na diodě malý úbytek napětí a diodou protéká proud. Germaniové diody mají úbytek 0,4 V, zatímco křemíkové diody 0,6 až 0,8 V. Při uzavřené diodě (anoda záporná) nevede proud až do závěrného napětí, které je pro germaniové diody 100 V a křemíkové diody až 4000 V. Diody mohou být dimenzovány až na stovky ampér.

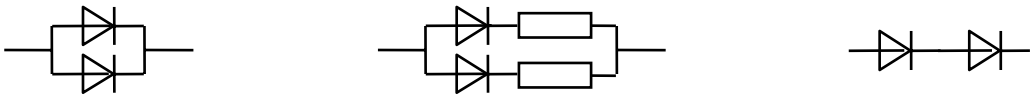
Dioda má usměrňovací efekt pro střídavý proud. Závislost časového průběhu napětí a proudu je znázorněna na obrázku 3.66 vpravo. Velikost proudu nelze ovládat.



Princip činnosti diody | Charakteristika diody | Usměrňovací efekt diody

Obrázek 3.67 – Značka diody, volt-ampérová charakteristika a usměrňovací efekt

Zvětšení proudu nebo závěrného napětí se řeší zapojeními, které jsou znázorněny na obrázcích 3.67. Pro přerozdělení proudu u diod lišících se svou charakteristikou se použijí přídavné sériové odpory.



Paralelní zapojení pro zvýšení proudu | Paralelní zapojení pro zvýšení proudu a přerozdělení úbytku napětí | Sériové zapojení pro zvýšení závěrného napětí

Obrázek 3.68 – Zapojení pro zvětšení proudu nebo závěrného napětí

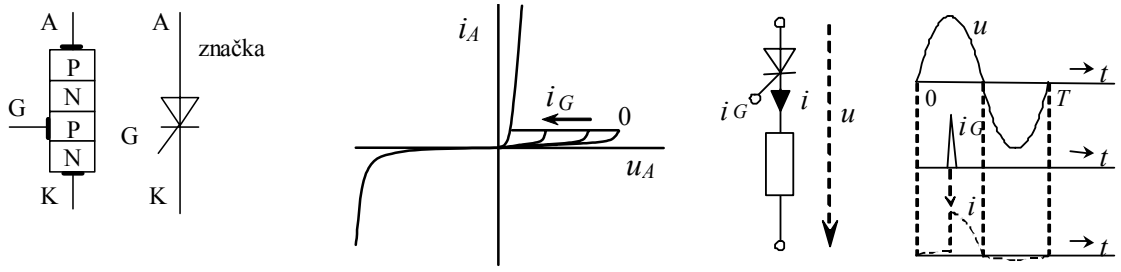
Tyristor

Tyristor je prvek, u kterého lze na rozdíl od diody ovládat propustnost proudu. Jde o sériové spojení dvou přechodů P-N, viz. obrázek 3.68 vlevo. K jednomu z přechodů je připojena elektroda G (Gate - hradlo). Volt-ampérová charakteristika tyristoru je na obrázku 3.68 uprostřed. Parametrem charakteristiky je zapalovací proud i_G. Impuls proudu přivedený na tuto elektrodu ve stavu s kladným napětím na anodě otevře tyristor k průchodu proudu, který potrvá až do okamžiku změny napětí na anodě na záporné. Tímto způsobem lze ovládat velikost proudu zátěží jak je znázorněno na obrázku 3.68 vpravo.

Velikost proudu se hodnotí nejčastěji jeho efektivním hodnotou I_{ef}, což je druhá odmocnina střední hodnoty kvadrátu proudu $i(t)$ za dobu jeho periody T. Efektivní hodnota proudu je dána integrováním druhé mocniny proudu podle času. Jen u střídavého proudu se sinusovým průběhem je efektivní hodnota vypočtena dělením jeho amplitudy odmocninou ze dvou.

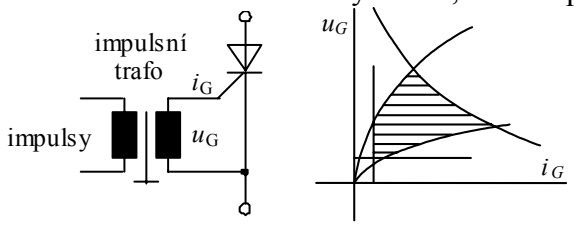
$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (i(t))^2 dt} \qquad (3.17)$$

Spuštění proudu tyristorem zajišťuje tzv. zapalovací obvod, který je znázorněn na obrázku 3.69. Z důvodu galvanickému oddělení se ke katodě a elektrodě G připojí sekundární vinutí impulsního transformátoru. Pro zjednodušení je obvodová značka pro vinutí transformátoru podobná odporu, ovšem odlišuje se vnitřním vybarvením. Spouštěcí napětí a proud musí vyhovovat určitému tolerančnímu poli v charakteristice i_G a u_G na tomtéž obrázku.



Princip činnosti tyristoru | Charakteristika tyristoru | Usměrňovací a řídicí efekt tyristoru

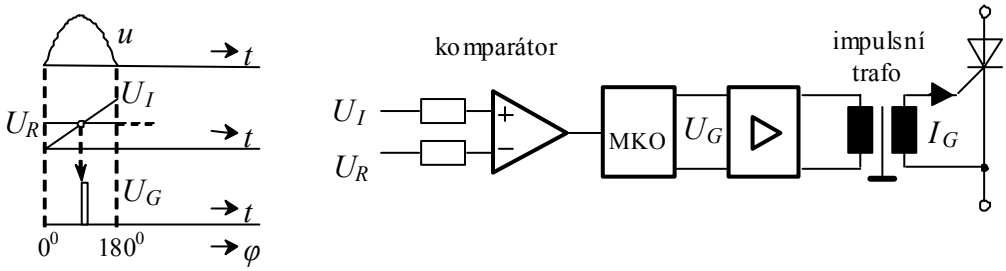
Obrázek 3.69 – Značka tyristoru, volt-ampérová charakteristika a řídicí účinek na proud



Obrázek 3.70 – Zapalovací obvod tyristoru

Úplný obvod pro generování spouštěcích impulsů je znázorněn na obrázku 3.70. Po dobu půlperiody napájecího napětí, kdy může tyristor vést proud, je generováno lineárně rostoucí napětí U_I, které je v komparátoru srovnáváno s řídicím napětím U_R. V okamžiku, kdy pilovité napětí přesáhne řídicí napětí, změní výstup komparátoru polaritu a monostabilní klopný obvod (MKO) vygeneruje napěťový impuls U_G o konstantní

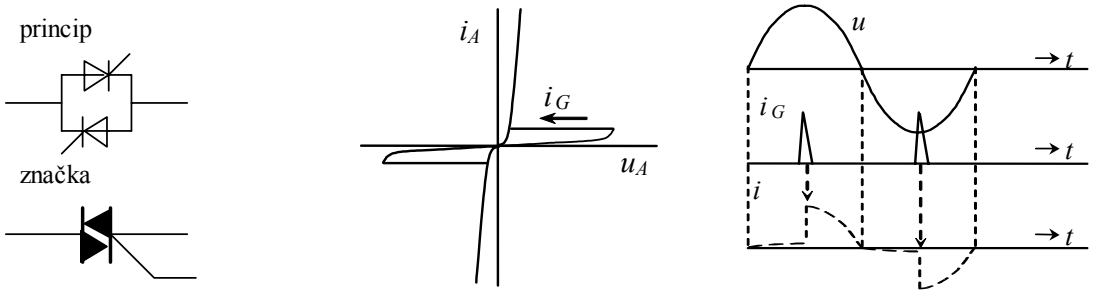
Šířce (délce časového intervalu). Napěťový impuls je zesílen a přiveden na vstup impulsního transformátoru, na jehož výstupu se objeví proudový spouštěcí impuls I_G.



Obrázek 3.71 – Obvod řízení otevření tyristoru

Triak

Funkci triaku odpovídá antiparalelní zapojení dvou tyristorů. Značka, volt-ampérová charakteristika a funkce při řízení proudu jsou znázorněny na obrázcích 3.71.



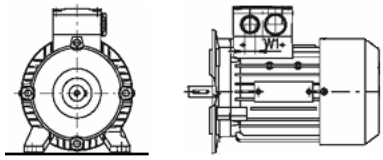
Princip a značka triaku | Charakteristika triaku | Funkce triaku

Obrázek 3.72 – Značka triaku, volt-ampérová charakteristika a řídicí účinek na proud

❑ Přehled typů elektrických motorů

Elektrické motory mohou být děleny podle různých hledisek, například

- podle tvaru (viz obrázek 3.72)
  - patkové (montážní plocha – patky - je rovnoběžná s osou motoru)
  - přírubové (montážní plocha – příruba - je kolmá na osu motoru)
  - vestavné
- podle způsobu chlazení
  - bez chlazení (motory nejnižších výkonů)
  - vlastní ventilace pro otevřené motory (na hřídeli je ventilátor, který prohání vzduch motorem)
  - cizí ventilace (ventilátor s vlastním pohonem)
  - cizí chlazení (vodou)
- podle krytí (odolnost proti vlhkosti, prachu, apod.)
- podle napájecího napětí.
  - stejnosměrné motory (stejnosměrné napájení, ovlivňování otáček napájecím napětím a buzením)
  - střídavé motory (napájení střídavým proudem, otáčky jsou vázány na frekvenci otáčení magnetického pole a počet pólů)
  - asynchronní motory (mezi frekvenci napájecího napětí a otáčkami existuje skluz v závislosti na zatížení motoru)
  - komutátorové motory, které jsou používány například v ručních vrtačkách, bruskách, atd..
  - synchronní motory (otáčky a frekvence napájecího napětí jsou synchronní nezávisle na zatížení motoru)
  - krokové motory



patkové přírubové

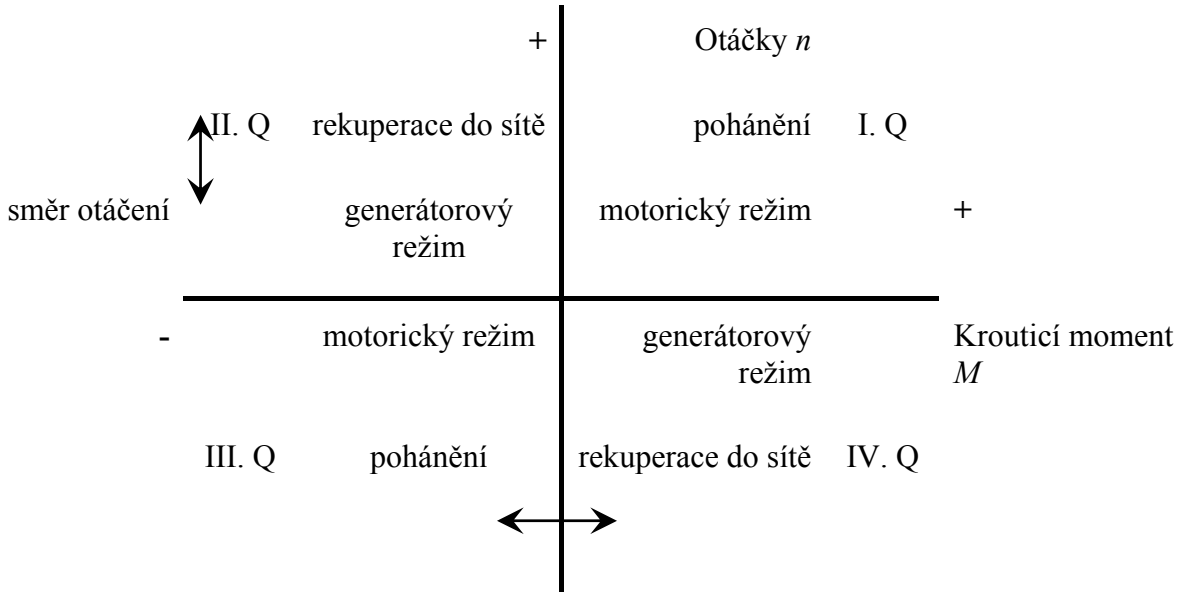
Obrázek 3.73 – Provedení elektromotorů

Napájecí napětí určuje konstrukci motoru a především jeho statické a dynamické vlastnosti. Každý elektrický pohon má své specifické použití. Vlastnosti pohonné jednotky je třeba posuzovat v komplexu napájecích obvodů a motoru.

❑ Pracovní oblasti pohonů

Pohon může pracovat v motorickém režimu nebo v generátorovém režimu. V motorickém režimu pohání motor připojené zařízení (stroj) představující jeho zátěž, zatímco v rekuperačním režimu připojený stroj naopak pohání motor, který se jeví jako generátor, který odebírá ze stroje mechanickou energii. Tyto funkce může plnit pro jeden směr otáčení. Funkce poháněného stroje může vyžadovat reverzaci otáček, tj. chod motoru

dvěma směry. Všechny pracovní režimy motoru lze znázornit čtyřkvadrantovým diagramem. Vodorovná osa znázorňuje kroutící moment *M* motoru. Na svislé ose jsou otáčky motoru *n*. V diagramu je rozhodující znaménko zmíněných veličin.

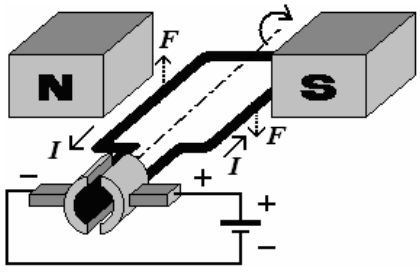


Jednokvadrantový pohon znamená, že připojený pohon má jen jeden směr otáčení a působí jako pohon (bez brzdění). Dvoukvadrantový pohon může pracovat buď v I. a IV. kvadrantu nebo v I. a II. kvadrantu. Čtyřkvadrantový pohon má pracovní režimy ze všech kvadrantů.

❑ Stejnosměrný motor

Stejnosměrný motor představuje nejjednodušší realizaci základního fyzikálního zákona o síle *F* působící na vodič, kterým protéká proud I a který je umístěn v magnetickém poli o indukci B. Jestliže je tento vodič o délce l orientován kolmo k siločárám pole, pak na něj působí síla $F = BIl$. Směr síly lze určit podle Flemingova pravidla levé ruky. Jestliže siločáry vstupují do dlaně a prsty ukazují směr proudu, pak palec určuje směr síly.

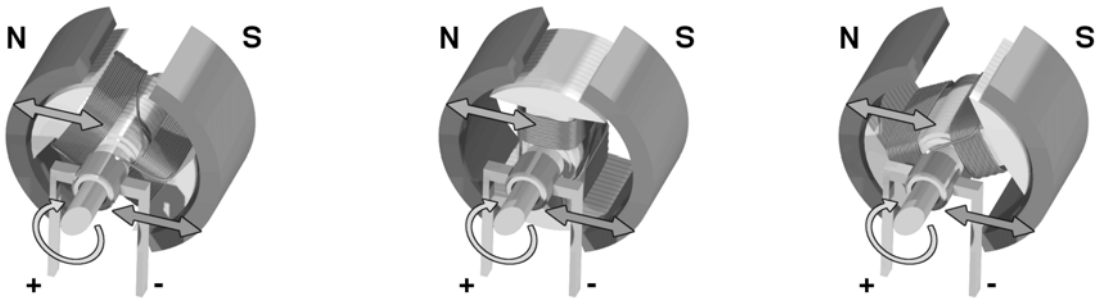
Vodič ve tvaru smyčky (součást rotující kotvy) s osou rovnoběžnou s osou rotace mění periodicky směr pohybu kolmý na siločáry, a proto je třeba ve vhodném okamžiku dvakrát za otáčku změnit směr proudu, což zajišťuje komutátor, viz obrázek 3.73. Konce proudové smyčky jsou připojeny ke dvěma shodným vodivým segmentům, ke kterým se přivádí přes kartáčky elektrický proud. V okamžiku, kdy je smyčka v rovině kolmé na magnetické siločáry, se vystřídá propojení segmentů a kartáčků, což způsobí změnu proudu v otáčející se smyčce a následnou změnu směru síly, která působí na vodiče smyčky v magnetickém poli.



Obrázek 3.74 – Funkce komutátoru

Klasický stejnosměrný motor má kotvu tvořenou elektromagnetem. Kroutící moment je vytvořen na základě vzájemného přitahování opačných magnetických pólů a odpuzování souhlasných pólů (Sever - North, Jih - South). Na obrázku 3.74 je znázorněn tento pohon ve

třech fázích natočení. Třetí fáze je kreslena těsně před okamžikem reverzace proudu komutátorem.



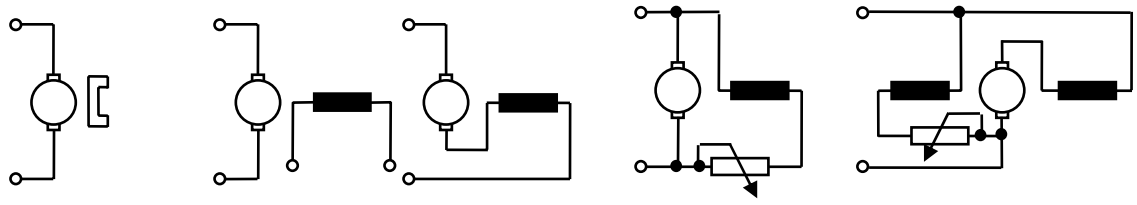
1. poloha 2. poloha 3. poloha

Obrázek 3.75 – Stejnosměrný motor s rotujícím elektromagnetem

Magnetické pole může být vybuzeno permanentním magnetem nebo cívkou napájenou stejnosměrným proudem ze zvláštního zdroje (cizí buzení) a nebo cívkou, kterou protéká proud napájející kotvu motoru. Schématicky je zapojení nakresleno na obrázku 3.75. Kromě sériového buzení může být motor buzen také paralelně (derivační buzení) nebo smíšeně (tzv. kompaudní motor). Podle budícího toku rozdělujeme stejnosměrné motory na

- motory s budícím tokem nezávislým na zatížení (buzení cizí, paralelní a permanentní magnety)
- motory s budícím tokem závislým na zátěži (sériové buzení)
- motory s buzením smíšeným (kompaundní buzení)

Permanentní magnet | Cizí buzení | Sériové buzení | Derivační buzení | Kompaudní buzení



Obrázek 3.76 – Rozdělení motorů podle buzení

Statické charakteristiky motoru popisují dvě rovnice, a to pro kroutící moment M v závislosti na magnetickém toku Φ a proudu kotvou I

$$M = k\Phi I \tag{3.18}$$

a pro elektromotorické napětí indukované na kotvě motoru v závislosti na magnetickém toku a úhlové rychlosti ω

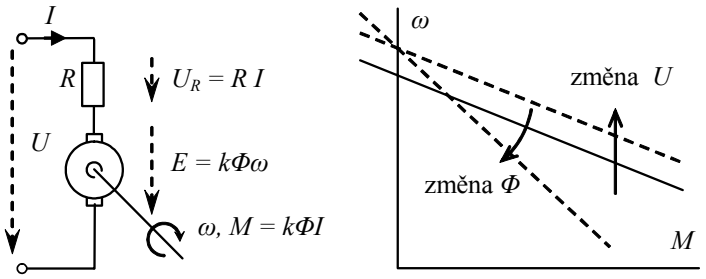
$$E = k\Phi\omega\,. \tag{3.19}$$

Při běhu bez zatížení pod napětím na kotvě způsobí náhlé odbuzení ($\Phi \to 0$) efekt, kdy se pro stálou velikost E roztočí motor ($\omega \to \infty$) až k hranici destrukce odstředivými silami (jak uvádí ve svých vzpomínkách doc. Chmelík z elektrofakulty).

Elektrické náhradní zapojení stejnosměrného motoru musí respektovat odpor kotvy R a indukčnost v obvodu kotvy. Magnetické pole vybuzené proudem, který protéká kotvou, se skládá s polem daným buzením v nezatíženém stavu motoru. Tento jev se nazývá reakce kotvy. Nepříznivý účinek na změnu směru magnetických siločar (a tím i komutaci) se kompenzuje kompenzačním vinutím, které je v sérii v obvodu kotvy. Tímto způsobem se ruší magnetický účinek proudu kotvou.

Jestliže bude motor v ustálením stavu, není třeba s indukčností počítat. Charakteristika motoru představuje závislost kroutícího momentu na otáčkách. Tuto charakteristiku lze odvodit z rovnice (3.20). Regulaci otáček motoru nebo krouticího momentu je možné změnami elektrických veličin, kterými jsou napětí na kotvě U a magnetický tok Φ. Magnetický tok u motoru s cizím buzení je dán proudem budící cívkou. U sériových motorů je budící proud totožný s proudem kotvy. Změna magnetického toku není u motorů s permanentním magnetem možná.

$$\omega = \frac{E}{k\Phi} = \frac{U - RI}{k\Phi} = \frac{U - RM/k\Phi}{k\Phi} = \frac{U}{k\Phi} - \frac{R}{(k\Phi)^2} M \,. \tag{3.20}$$



Obrázek 3.77 – Náhradní zapojení stejnosměrného elektrického motoru a statická charakteristika motoru s cizím buzením nebo s paralelním buzením

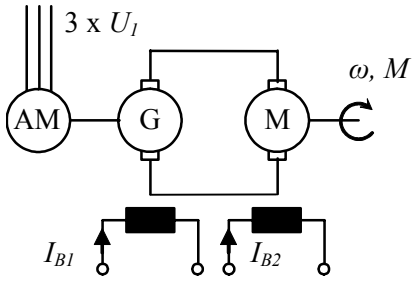
Chyba! Objekty nemohou být vytvořeny úpravami kódů polí.

Obrázek 3.78 – Charakteristika motoru se sériovým buzením

Charakteristika stejnosměrného motoru s cizím buzením nebo s paralelním buzením je přímka, jejíž sklon určuje magnetický tok, tj. proud budícím vinutí, viz obrázek 3.76. Přímka se posouvá změnou napětí na kotvě motoru. Změna buzení mění sklon charakteristiky. Otáčky motoru při tomto buzení jsou závislé na zatížení. Tento druh regulace je vhodný tam, kde se otáčky příliš nemění.

Charakteristika sériového motoru je na obrázku 3.77. Krouticí moment je nepřímo závislý na otáčkách. Její výhodou je vysoký záběrový moment pro nízké otáčky. Sériové motory mají využití u dopravních prostředků, u kterých je při rozjezdu vyvinout velký krouticí moment.

Dynamické charakteristiky elektrické části motoru musí respektovat indukčnost vinutí koty a indukčnost budícího vinutí. Poměr velikosti indukčnosti a odporu kotvy určuje elektrické časové konstanty. Mechanická časová konstanta souvisí s momentem setrvačnosti rotoru a připojeného zařízení.



Obrázek 3.79 –Ward-Leonardovo soustrojí

Regulace stejnosměrného motoru (M) vyžaduje zdroj regulovatelného napětí v minulosti se používalo dynamo (G), které bylo poháněno asynchronním motorem (AM), viz soustrojí Ward-Leonard (příjmení a jméno) na obrázku 3.78.

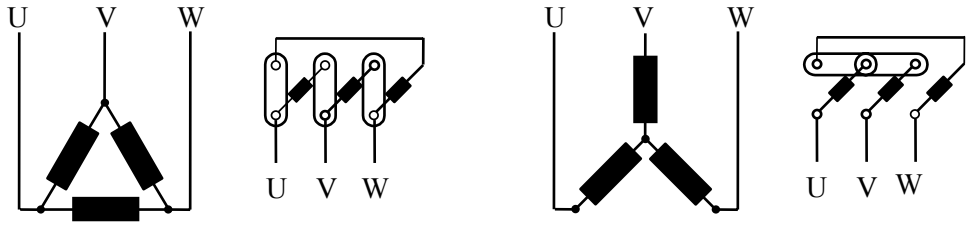
Protože otáčky asynchronního motoru jsou téměř neměnné, lze otáčky soustrojí regulovat změnou buzení jak u dynama, tak u motoru. Napětí a proud generátoru lze určit pomocí shodných rovnic jako v případě motoru. Moderní napájecí obvody obsahují jen polovodičové prvky.

❑ Střídavý asynchronní motor

Střídavý třífázový asynchronní motor je nejrozšířenějším typem pohonné jednotky. V regulaci měla dříve nevýhodu obtížná měnitelnosti otáček. Polovodičové frekvenční měniče tuto nevýhodu nyní odstraňují. Typický asynchronní motor má statorové vinutí pro třífázové napájení složené ze tří statorových cívek, které vytvářejí kruhové točivé magnetické pole. Motorek s jednou fázi by se teoreticky nemohl samostatně rozběhnout. K jeho rozběhu slouží pomocné vinutí, které je připojeno přes elektrický kondenzátor krátkodobě k fázi. Kondenzátor způsobí fázový posun, točivé magnetické pole je eliptické. Na trhu jsou také asynchronní motorky s trvale zapojeným pomocným vinutím přes kondenzátor.

Statorové cívky jsou zapojeny do hvězdy nebo do trojúhelníku. Pro určité napětí má zapojení do hvězdy 1,7krát (odmocnina ze tří) menší odběr proudu než do trojúhelníka, což se využívá všeobecně při rozběhu motoru s výkonem nad 4 kW. Nejprve se při rozběhu motor zapojí do hvězdy a po dosažení provozních otáček se přepojí do trojúhelníka.

Cívky statorového vinutí jsou zapojeny ke třem dvojicím svorek, které lze plochými propojkami trvale snadno přeskupit na oba zmíněné způsoby zapojení cívek, viz obrázek 3.79. Běžně se však používá spouštěcí otočný přepínač s polohami 0 (stop), Y (hvězda) a pak Δ (trojúhelník).



Zapojení do trojúhelníka Zapojení do hvězdy

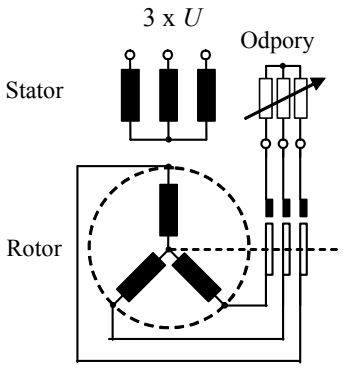
Obrázek 3.80 – Zapojení třífázového asynchronního motoru do trojúhelníka a do hvězdy

Rotor může mít dvojí provedení:

- kotva nakrátko
- vinutý, přičemž vinutí je vyvedeno z rotoru pomocí kroužků a kartáčů

Vinutý rotor má obdobně jako stator třífázové vinutí, které je založeno v drážkách. Toto vinutí se vždy spojuje do hvězdy a vzniknuvší uzel se nevyvádí ven, ale je vytvořen přímo na rotoru.

Počet pólů rotorového vinutí musí být shodný s počtem pólů statoru. Vývody z pohybujícího se rotorového vinutí lze realizovat prostřednictvím kluzných kontaktů, které jsou vytvořeny ze tří kroužků a uhlíkových kartáčů, jak je znázorněno na obrázku 3.80. Vinutí rotoru se pospojuje do uzlu přes vnější odpory, jejichž velikost lze měnit. Velikost těchto odporů lze měnit a takto „změkčit" charakteristiku motoru za rozběhu. Kluzný kontakt je relativně náročný na údržbu, proto se mnohem častěji užívají stroje s kotvou nakrátko, která tento kluzný kontakt nemá.



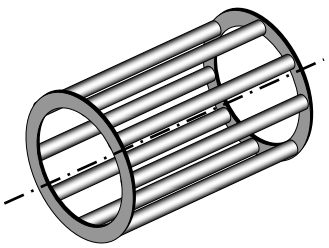
Obrázek 3.81 – Kroužkový asynchronní motor

Tento způsob regulace se používal například u pohonu pouťových kolotočů. Odpory představovala vodou naplněná nádobka, do které obsluha spouštěla tři segmenty napojené na rotorové vinutí pohonu. Rotor s klecí má v drážkách hliníkové (nebo měděné) tyče bez jakékoliv izolace a na koncích jsou tyče spojeny (rovněž hliníkovými) kruhy nakrátko, jak je znázorněno na obrázku 3.81. Toto provedení je nenáročné na údržbu.

Napájecí napětí ve statorových cívkách o frekvenci f_1 o počtu pólů p vytvoří točivé magnetické pole o úhlové rychlosti

$$\omega_0 = 2\pi \frac{f_1}{p}. \qquad (3.21)$$

Toto točivé magnetické pole indukuje ve vinutí rotoru nebo v kleci proud, který vyvolá sílu působící kolmo na vodiče rotoru. Dvojice sil na protilehlých stranách pak vyvolá krouticí moment.



Obrázek 3.82 – Klec nakrátko asynchronního motoru

Proud se v kleci indukuje jen za podmínky, že úhlová rychlost kotvy ω se liší od úhlové rychlosti ω_0 točivého elektrického pole. Tento rozdíl otáček se označuje jako skluzové otáčky $\omega_0 - \omega$. Skluz se určí ze vztahu

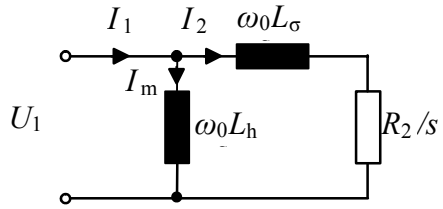
$$s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0}. \qquad (3.22)$$

Frekvence proudu v kotvě lze vyjádřit vzorcem

$$f_2 = s\, f_1 .$$

(3.23)

Zjednodušené náhradní schéma asynchronního motoru je znázorněno na obrázku 3.82.



Obrázek 3.83 – Zjednodušené náhradní schéma asynchronního motoru

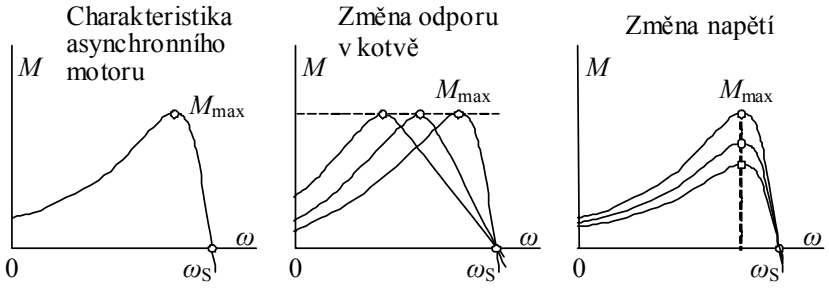
Zanedbány jsou ztráty ve statorovém vinutí a v železe v důsledku jeho magnetizace s hysterezí. Odpor vinutí rotoru je označen R_2. Napájecí napětí U_1 je předpokládáno konstantní. Skluz s určuje proud vinutí kotvy. Kroutící moment se odvodí z rovnosti elektrického a mechanického výkonu ($U_1 I_2 = M\omega$). Platí

$$M = \frac{\left|U_1^{\,2}\right|}{\omega_0 (1-s)\sqrt{(R_2/s)^2 + (\omega_0 L_\sigma)^2}} = \frac{\left|U_1^{\,2}\right|}{\omega_0 \sqrt{(R_2 (1-s)/s)^2 + ((1-s)\omega_0 L_\sigma)^2}} . \qquad (3.24)$$

Charakteristika asynchronního motoru je znázorněna v diagramu na obrázku 3.80. Při synchronních otáčkách (s = 0) je kroutící moment motoru nulový. Postupný vzrůst zatížení motoru krouticím momentem vyvolá pokles jeho otáček a tím i zvětšení skluzu. Motor se autoreguluje a zůstává ve stabilním stavu nebo jinak řečeno pracuje ve stabilním pracovním bodu, ve kterém se vyrovná hnací a zátěžný krouticí moment. V okamžiku, kdy je dosaženo maxima kroutícího momentu $M_{\max}$, tak přestane autoregulace působit. Motor nemůže vyrovnat krouticí moment zátěže, a proto jeho otáčky poklesnou a hnací moment také. Pracovní bod již není stabilní, což způsobí překotný pokles otáček obvykle k nule, jestliže zatížení zmizí. V opačném případě se může změnit i směr otáčení. Jestliže se motor zastaví, jeho krouticí moment je menší než moment maximální a odběr proudu se zvětší. Tento jev je znám těm, kdo mají zkušenost s řezáním dříví na cirkulárce a občasným "přepálením pojistek" při zablokování otáčení pily, když se přitlačí více „na pilu".

Popsané chování asynchronního motoru se týkalo tzv. motorického režimu. Jestliže na motor působí místo zátěže naopak hnací moment (jízda výtahem dolů vlivem hmoty vyšší než je protizávaží), dojde k překročení synchronních otáček, motor se dostane do generátorového režimu a směr proudu se obrátí. Pokud je motor připojen přímo na rozvodnou síť, je zpětně do rozvodné sítě rekuperován elektrický výkon.

Na obrázku 3.83 je demonstrován rovněž vliv změny odporu ve vinutí kotvy u kroužkového motoru. Zvětšení odporu rozšíří stabilní oblast charakteristiky tím, že se připustí větší skluz. Změna napájecího napětí motoru naproti tomu má vliv jen na velikost maxima kroutícího momentu při neměnné hodnotě skluzu. Zmíněné možnosti ovládat otáčky a krouticí moment asynchronního motoru nejsou vhodné k regulaci jeho otáček. Pro regulaci otáček se využívá změny frekvence napájecího napětí.



Obrázek 3.84 – Charakteristiky asynchronního motoru

Obrázek 3.85 – Nízkonapěťový asynchronní motor

Otáčky asynchronního stroje lze řídit plynule změnou frekvence napájecího napětí užitím frekvenčních měničů, skokově přepínáním počtu pólů a řízením skluzu (odporem v rotoru u kroužkových motorů, napájením rotoru a impulsním napájením).

❑ Jednofázový komutátorový motor

Jde o stejnosměrný motor připojený na jednofázovou síť. Pro trvalý chod musí být obvod statoru vyroben z izolovaných plechů a velkého počtu lamel (segmentů) na komutátoru. Komutace se u tohoto typu motoru zhoršuje, což nutí ke snížení magnetického toku a snížení kmitočtu. Oproti synchronním a asynchronním motorům lze u těchto motorů měnit otáčky v širokých mezích a také překročit hranici 3000 otáček za minutu, což je u dříve zmíněných motorů pro síť 50 Hz nemožné. Nevýhodou je jiskření na kartáčích, což způsobuje jejich opotřebení.

Komutátorové motory velkých výkonů se používají jako trakční motory pro dráhové systémy s kmitočtem 16 ⅔ Hz, což je třetina 50 Hz (dráhy v Německu, Rakousku a Švýcarsku), aby se změna frekvence dala snadno realizovat šestipólovými rotačními konvertory frekvence a střídavé napětí bylo možné transformovat. Z důvodu zamezení rezonančních jevů a možnost použití polovodičových prvků byla frekvence změněna na 16,7 Hz. Komutátorové motory pro malé výkony lze použít také pro síť s 50 Hz. Jedná se o domácí spotřebiče (mixery, fény, mlýnky, vysavače) a elektrické nářadí (ruční vrtačky a brusky apod.).

❑ Elektronicky komutovaný motor (EC motor)

Motor s komutátorem má nevýhodu v nutnosti údržby komutátoru, což u EC motorů odpadá. U elektronicky komutovaného motoru (EC) je vyměněna funkce statoru a rotoru. Také se jim někdy říká stejnosměrné bezkartáčové motory. Rotor tvoří permanentní magnet a do vinutí statoru je přiváděno elektronicky komutované napětí s fází závislou na poloze rotoru.

Obrázek 3.86 – Řada AC motorů firmy Berger Lahr

Příkladem může být třífázový elektronicky komutovaný synchronní motor firmy Berger Lahr, jehož vzorky jsou uvedeny na obrázku 3.85. Při malých rozměrech dosahují tyto motory relativně velkého výkonu a dynamiky, mají také tichý a plynulý chod. Rotor je tvořen permanentním magnetem ze vzácných zemin. Pro snímání polohy rotoru se používají Hallovy sondy, které se připojují spolu s fázemi motoru k servozesilovači. Motory dosahují velkých otáček při malém krouticím momentu. Pro dosažení vyššího krouticího momentu se používají čelní převodovky (do 12 Nm) nebo planetové převodovky (do 50 Nm).

❑ Synchronní střídavé motory

Synchronní motor pracuje pouze na synchronních otáčkách bez skluzu. Aby rotor sledoval otáčky točivého magnetického pole, musí obsahovat permanentní magnet nebo cívku napájenou stejnosměrným proudem. Synchronní motory se rozbíhají jako asynchronní s pomocným vinutím, ve kterém zanikne při synchronních otáčkách proud, a nebo postupným zvětšováním kmitočtu.

Velké synchronní motory mají zvláštní využití v energetice podniku, protože je lze použít ke kompenzaci indukční jalové složky proudu. Tato složka proudu vzniká v provozech, kde je velké množství například asynchronních pohonů. Tento motor může například pohánět centrální kompresor pro rozvod stlačeného vzduchu.

V automatizaci mají význam malé motory buzené permanentními magnety na rotoru. Tyto motory jsou nejvíce používány pro polohové řízení výrobních (obráběcích) strojů, protože jsou vybaveny precizním snímačem polohy a otáček s vysokým rozlišením. Svou konstrukcí jsou vhodné pro dynamicky náročné úlohy. Doplněním vhodnou planetovou převodovkou je možno optimalizovat potřebný moment k otáčkám pohonu.

Tyto střídavé motory jsou bezkartáčové synchronní motory s permanentními magnety na rotoru a třífázovým vinutím ve statoru. Optimalizovaná koncepce motoru s použitím nových magnetických materiálů (neodym-železo-bór) dovoluje až 5-násobné momentové přetížení a motory vychází konstrukčně kratší oproti jiným typům. Optický snímač polohy je s vysokým rozlišením až 16 384 impulsů na otáčku.

❑ Krokové motory

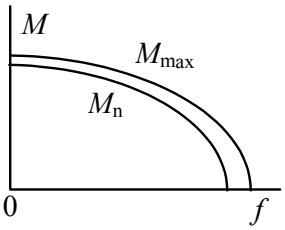
Podle konstrukčního provedení rotoru se krokové motory rozdělují do tří skupin

- krokové motory s pasivním rotorem mající vyjádřené póly (zuby) na statoru a rotoru, jsou označovány jako reakční nebo reluktanční využívající proměnlivou magnetickou vodivost (Variable Reluktance), podmínkou funkce je rozdílný počet pólů na statoru a rotoru

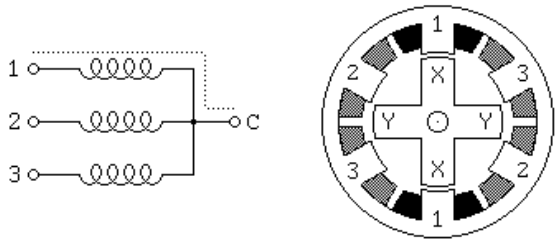
- krokové motory s aktivním rotorem, který obsahuje magneticky aktivní část, tj. budící vinutí nebo permanentní magnet, počet pólů rotoru a statoru je rozdílný; motory s permanentním magnetem udržují klidovou polohu i když statorové vinutí je bez proudu
- skupina slučující konstrukční řešení obou předchozích typů.

Statická charakteristika krokových motorů na obrázku 3.86, kterou poskytuje výrobce, obsahuje dvě křivky. První představuje závislost jmenovitého výkonu na frekvenci a druhá určuje maximální výkon, po jehož překročení krokový motor vypadne ze synchronismu.

Konstrukční princip reluktančního motoru je znázorněn na obrázku 3.87. Stator obsahuje tři cívky na pólových nástavcích 1-1, 2-2 a 3-3. Rotor má dvě dvojice zubů X-X a Y-Y. Na obrázku je nakreslen stav, kdy proud protéká cívkou 1-1 a rotor je svými výstupy (zuby) X-X natočen stabilně tak, aby uzavíral magnetický obvod. Přepnutí proudu do cívky 2-2 se pootočí rotor o 30^0 do nového stabilního stavu, ve kterém je uzavřen magnetický obvod mezi pólovými nástavci cívky 2-2 a výstupy rotoru Y-Y, atd.

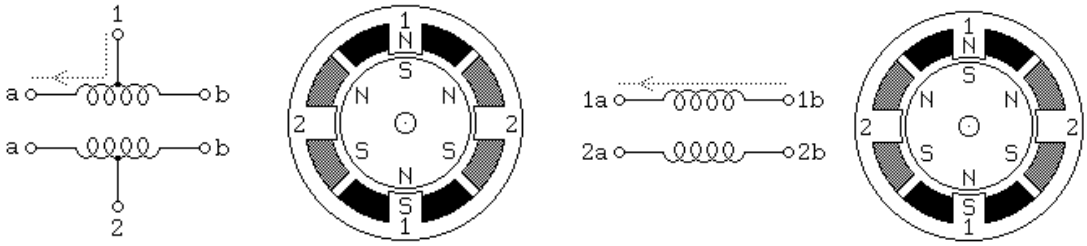


Obrázek 3.87 – Charakteristiky krokového motoru



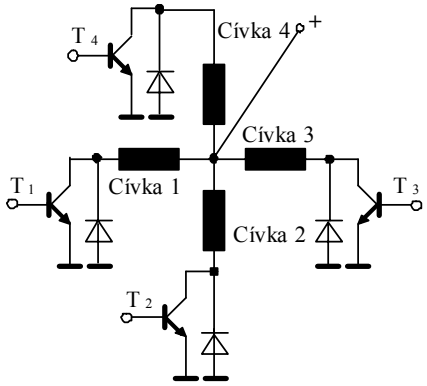
Obrázek 3.88 – Reluktanční krokový motor

Rotor se třemi permanentními magnety a dvěmi cívkami statorového vinutí je znázorněn ve dvou variantách zapojení cívek na obrázku 3.88. Postupným přepínáním proudů do jednotlivých sekcí vinutí statorových cívek se dosáhne stejného efektu jako v předcházejícím případě.



Obrázek 3.89 – Dvě varianty zapojení cívek krokového motoru s permanentními magnety

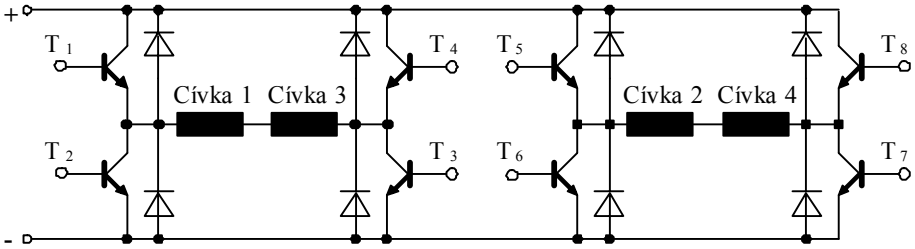
Řízení krokových motorů rozeznáváme unipolární a bipolární. Při unipolárním řízení krokového motoru se čtyřmi statorovými cívkami prochází v každém okamžiku proud jen jednou cívkou (viz obrázek 3.89), což je zajištěno sepnutím jen jednoho z tranzistorů T_1 až T_4. Sepnutí tranzistoru je zabezpečeno proudem do jeho báze po požadovanou dobu. Motor má menší odběr proudu a také nejmenší kroutící moment oproti bipolárnímu řízení. Při bipolárním řízení prochází proud dvěma protilehlými cívkami (viz obrázek 3.90). Tyto cívky jsou zapojeny tak, že mají navzájem opačně orientované magnetické pole. Motor v tomto režimu vyvozuje větší krouticí moment za cenu vyšší spotřeby proudu oproti zapojení unipolárnímu.



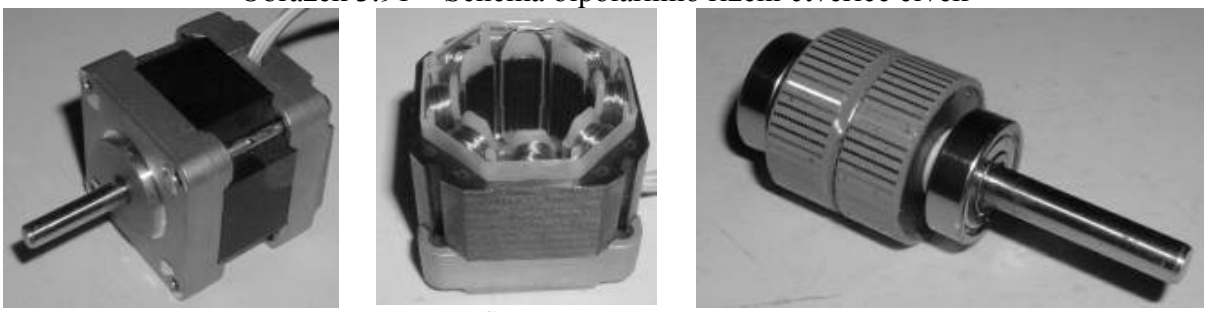
Obrázek 3.90 – Schéma unipolárního řízení

Krokové motory se řídí jednofázově nebo dvoufázově. Při jednofázovém řízení generuje magnetické pole pouze jedna cívka (případně dvojice cívek při bipolárním buzení). Při dvoufázovém řízení generují shodně orientované magnetické pole dvě sousední cívky. Počet poloh rotoru se zdvojnásobí, protože lze rotor natočit také do mezipoloh daných jednofázovým řízením.

Řízení lze provádět s plným nebo polovičním krokem. Řízení s plným krokem odpovídá počtu pootočení za otáčku rovném počtu zubů statoru daného motoru. Řízením s polovičním krokem dosáhneme dvojnásobné přesnosti.



Obrázek 3.91 – Schéma bipolárního řízení čtveřice cívek



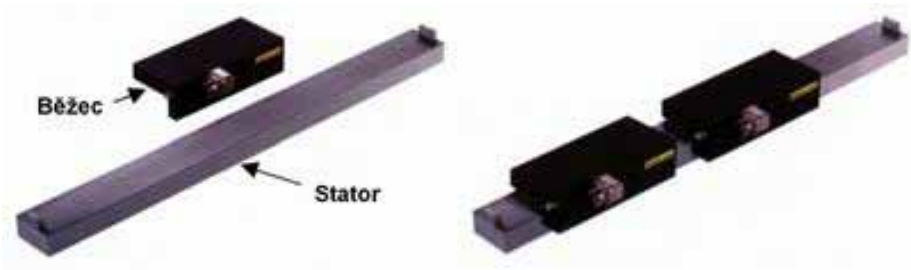
Celkový pohled | Stator | Rotor

Obrázek 3.92 – příklad krokového motoru s 200 kroky na otáčku (převzato z http://robotika.cz/articles/steppers/cs)

Na obrázku 3.91 je příklad krokového motoru s 200 kroky na otáčku (tj. 1.8 stupně na krok). Stator krokového motoru tvoří sada 4 dvojic cívek. Pólové nástavce statoru jsou vroubkovány se stejnou roztečí jako je rozteč magnetů na rotoru. Rotor tvoří hřídel usazená na kuličkových ložiskách a prstencem permanentních magnetů. Proud procházející cívkou statoru vytvoří magnetické pole, které přitáhne opačný pól magnetu rotoru. Vhodným zapojováním cívek dosáhneme vytvoření rotujícího magnetického pole, které otáčí rotorem.

Krokové motory nejsou jen pro otáčivý pohyb, ale také pro lineární posunutí. Příklad takového lineárního motoru je na obrázku 3.92 od firmy Berger Lahr. Lineární krokový motor využívá principu permanentně buzeného reluktančního krokového motoru**.** Stator je tvořen hranolem z nerezové oceli, ve kterém je vytvořena velmi přesná struktura zubů a mezer vyplněných polymerem. Povrch statoru je zabroušen. Stator tak vytváří současně vedení lineární osy a žádné další přídavné vedení není nutné. Běžec se pohybuje nad statorem na

silně stlačeném tenkém vzduchovém polštáři (asi 15 μm), který vzniká rozvedením tlakového vzduchu do trysek po vnitřní ploše běžce a působí proti magnetické síle přitahující běžec ke statoru. Vypnutím přívodu vzduchu je běžec magneticky pevně přitažen ke statoru a motor tedy nepotřebuje žádnou přídavnou brzdu. V běžci jsou kromě rozvodu tlakového vzduchu zabudovány tři fáze vinutí motoru, které jsou vyvedeny na kovový konektor.

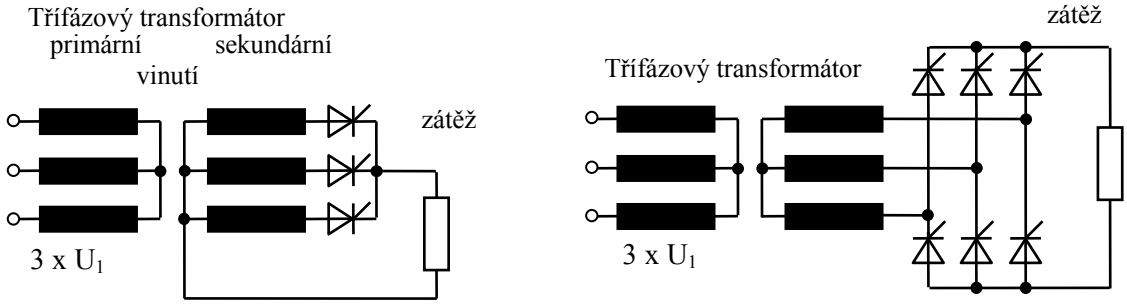


Obrázek 3.93 – Schéma bipolárního řízení čtveřice cívek

❑ Napájení elektrických motorů řízeným usměrňovačem

Řízený usměrňovač je zdrojem regulovatelného napájecího napětí pro stejnosměrné elektrické motory. Jejich funkce je založena na tyristorech. Výkonové řízené usměrňovače používají pro napájení třífázové napětí, které je transformováno třífázovým transformátorem. Řízené usměrňovače jsou buď uzlové (obrázek 3.93 vlevo) nebo můstkové (obrázek 3.93 vpravo). Tyristory mohou vést proud za podmínky, že na jejich anodě je vyšší napětí než katodě. Tento stav pro každý tyristor trvá po dobu jedné třetiny periody napětí. Uzlové zapojení vyžaduje vyvedení a hlavně zatížení nulového vodiče transformátoru, což není často dovoleno. Naproti tomu můstkové zapojení se obejde dokonce bez transformátoru.

Obvody obou usměrňovačů na zmíněném obrázku neobsahují pro jednoduchost zdroje řídicích impulsů pro tyristory. Tyto signály je třeba k oběma usměrňovačům připojit.

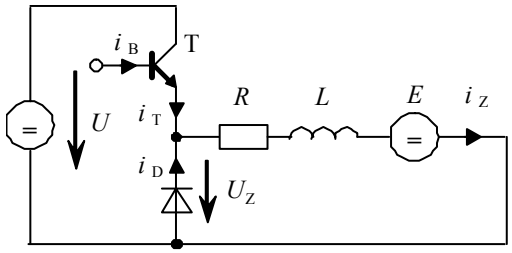


Uzlové zapojení řízeného usměrňovače Můstkové zapojení řízeného usměrňovače

Obrázek 3.94 – Řízené usměrňovače

Pohony představují pro zdroje napětí odporovou a indukční zátěž. V obvodech pro jejich řízení jsou používané rychlé polovodičové spínače. Jevy, které v těchto obvodech vznikají, lze demonstrovat na jednoduchém obvodu, který je znázorněn na obrázku 3.94. V tomto obvodu je spínán tranzistorem proud ze stejnosměrného napěťového zdroje o napětí U pro stejnosměrný motor, jehož kotva vykazuje odpor o velikosti R a indukčnosti L. Na kotvě motoru se indukuje elektromotorická síla o velikosti $E = k\Phi\omega$. Lze předpokládat, že setrvačnost motoru včetně poháněné soustavy je tak velká, že v intervalu spínání tranzistoru T se otáčky motoru téměř nemění a elektromotorická síla *E* je proto téměř konstantní.

Nechť proud báze i_B se impulsně mění podle časového průběhu na obrázku 3.91. Po dobu průchodu proudu bází tranzistoru se vybudí stav nasycení tranzistoru (ekvivalentní sepnutí fiktivního spínače mezi kolektorem a emitorem) a na jeho emitoru se objeví napětí blízké napětí zdroje, tj. *U*. Indukčnost vinutí kotvy motoru účinkuje tak, že se proud tranzistorem a vinutím začne exponenciálně zvětšovat s časovou konstantou $\tau = L/R$ z počátečního proudu, který bude označen i_{Z0}.



Obrázek 3.95 - Spínání proudu pro stejnosměrný motor

$$i_Z = i_{Z0} + \left(\frac{U}{R} - i_{Z0}\right)\left(1 - \exp\left(-t/\tau\right)\right). \tag{3.25}$$

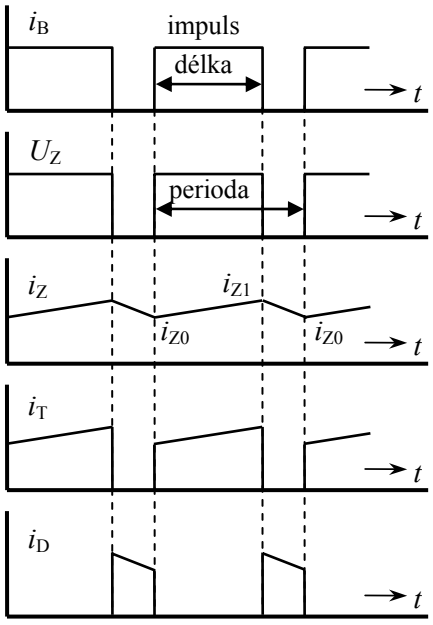
Protože proudové impulsy do báze se předpokládají mnohem kratší než je zmíněna elektrická časová konstanta motoru, jeví se náběh proudu vinutím motoru lineární s časem. Při přerušení proudu kolektorem a emitorem tranzistoru začne proud klesat z dosažené hodnoty i_{Z1} až k hodnotě i_{Z0}, kdy se vše opakuje znovu.

$$i_Z = i_{Z1} \exp\left(-t/\tau\right). \tag{3.26}$$

Úbytek napětí na cívce je dán výrazem $L\,di_z/dt$. Změna znaménka derivace proudu způsobí, že na anodě diody se objeví kladné napětí proti její katodě a dioda se stane pro proud vodivá. Proud indukčností motoru střídavě prochází tranzistorem a diodou, jak je naznačeno v časových průbězích na obrázku 3.95.

Kdyby v obvodu dioda chyběla, pak se na indukčnosti bude v okamžiku přerušení proudu indukovat vysoké napětí, které má udržet proud v neuzavřeném obvodu. Tato napěťová špička by prorazila přechody v tranzistoru, což by znamenalo jeho zničení. Dioda tedy plní také ochrannou funkci před napěťovým přetížením tranzistoru.

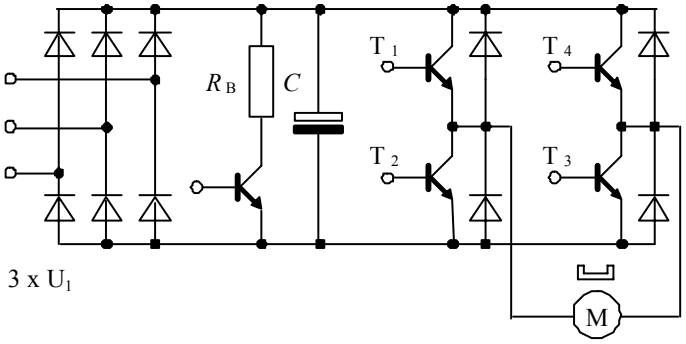
Kompletní zapojení pro toto řízení stejnosměrného motoru je na obrázku 3.96. Obvod umožňuje reverzování otáček motoru. Vzhledem k tomu, že diodový můstkový usměrňovač neumožňuje



Obrázek 3.96 – Časový průběh napětí a proudu při spínání

rekuperaci proudu do sítě, je při brzdění, např. během doběhu, sepnut tranzistor s odporem R_B, který zatěžuje motor ve funkci dynama tím, že zvýší jeho proudový odběr. Elektrolytický kondenzátor vyhlazuje napětí po usměrnění diodovým můstkem.

Tranzistory jsou v obvodu na obrázku 3.96 kresleny bez připojené báze. Předpokládá se, že na tyto vstupy bude přiveden impulsní řídicí signál podobně jako pro obvod na obrázku 3.95.

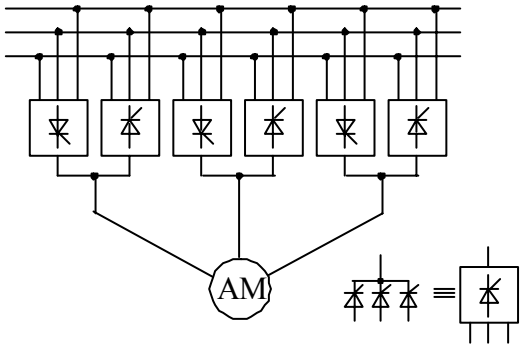


Obrázek 3.97 – Tranzistorový pulsní měnič

❑ Měniče frekvence

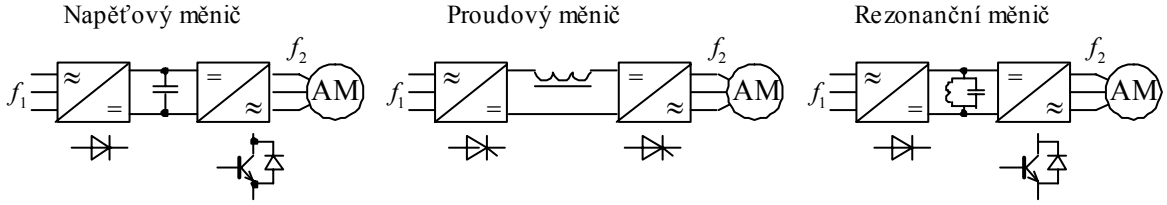
Elektrické pohony střídavé (synchronní a asynchronní) mají otáčky vázané na frekvenci napájecího proudu. Otáčky synchronních pohonů jsou přímo úměrné frekvenci. U asynchronních motorů ovlivňuje tuto závislost z menší části také proměnný skluz. Pro tyto střídavé motory je tedy zapotřebí proud o řiditelné frekvenci. V rozvodné síti je k dispozici proud o stálé frekvenci 50 Hz (60 Hz v USA). Proto je třeba změnit frekvenci proudu uměle speciálním zařízením, které se nazývá frekvenční měnič.

Frekvenční měniče se rozdělují na měniče přímé a nepřímé. U přímých měničů se napětí jedné frekvence (50 Hz) mění přímo na napětí proměnlivé frekvence. K přímým měničům se řadí cyklokonvertory a maticové měniče. Nepřímé měniče nejprve usměrňují elektrický proud na stejnosměrný, který pak střídáním mění na střídavý o libovolné (z určitého rozsahu) frekvenci. Princip cyklokonvertoru je znázorněn na obrázku 3.97. Je realizován třemi reverzačními tyristorovými usměrňovači s fázovým řízením. Každý tento usměrňovač napájí jednu fázi třífázového asynchronního motoru. Výstupní frekvence může dosáhnout jen asi 25% vstupní frekvence a proto má význam jen k řízení pomaluběžných motorů.

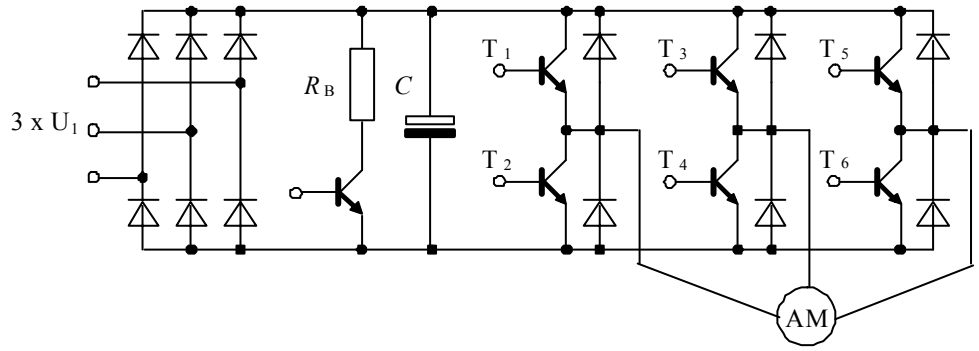


Obrázek 3.98 – Princip cyklokonvertoru

Nepřímé měniče nejprve střídavé napětí o frekvenci f_1 usměrní na stejnosměrný proud, který je spínacími prvky přerušován tak, že vznikne napětí o frekvenci f_2. Blokové schéma zapojení tří typů měničů je znázorněno na obrázku 3.98. Napěťový měnič má ve své stejnosměrné části vyhlazovací elektrický kondenzátor, který se chová jako napěťový zdroj s velmi malou vnitřní impedancí. Proudový měnič využívá k vyhlazení zvlnění proudu indukčnost (tlumivka). Měniče malých výkonů mají usměrňovací obvod s diodami, zatímco pro větší výkony se využívá tyristorů. Usměrňovač a střídač je vybaven tyristory, což umožňuje rekuperaci energie do sítě. To znamená, že energie pro zbrzdění pohonů se nemaří na teplo, ale je dodávána zpět do elektrorozvodné sítě. Frekvenční měnič využívá měkkého spínání tranzistorů, tj. spínání a rozpínání obvodu dochází v okamžiku, kdy je na kolektoru tranzistoru nulové napětí. Rezonanční obvod kmitá na vysoké frekvenci, např. 100 kHz. Harmonického průběhu proudu se dosahuje vynecháváním některých pulsů.



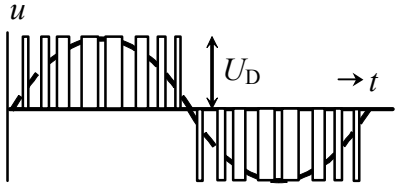
Obrázek 3.99 – Principy nepřímých měničů



Obrázek 3.100 – Napěťový měnič frekvence s diodovým napáječem

Třífázový napěťový měnič frekvence s diodovým napáječem je znázorněn na obrázku 3.99. Obsahuje diodový můstkový usměrňovač, elektrolytický vyhlazovací kondenzátor ve stejnosměrné části obvodu a tranzistorový třífázový střídač. Diodový usměrňovač podobně jako v obrázku 3.92 neumožňuje rekuperaci, proto se tranzistorem spíná do obvodu brzdný odpor. Spínacími tranzistory se napájí současně sinovým napětím všechna tři vinutí asynchronního motoru. Funkce diod v obvodu byla vysvětlena na zjednodušeném obvodu na obrázku 3.94 a 3.95.

K vytváření sinusového průběhu napětí se používá pulsně šířkové modulace impulsním signálem. V průběhu jedné periody se připojuje a odpojuje stejnosměrné napájecí napětí s šířkou impulsu úměrnou okamžité hodnotě sinusového napětí. Princip této modulace je znázorněn na obrázku 3.100. Impulsy o různé šířce jsou filtrační schopností indukčnosti elektromotoru vyhlazeny tak, že odpovídají sinusovce.



Obrázek 3.101 – Princip pulsní šířkové modulace

Otázky 3.7.

1. Které motory se zapojují do hvězdy a trojúhelníka?
2. Co je to asynchronní motor?
3. K čemu se používá střídač nebo měnič frekvence?
4. Co je to krokový motor a kde se použije?
5. Jak se liší řízený usměrňovač od střídače?
6. Jakým zdrojem elektrického proudu se napájí stejnosměrný elektrický motor?
7. Co je to synchronní motor?
8. Které elektrické motory se otáčejí stejně rychle jako točivé magnetické pole, které vybudí statorové cívky?

3.9. Hydraulické a pneumatické pohony

Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat pomocná zařízení obsahující pneumatické a hydraulické obvody (zdroje tlakového vzduchu nebo kapaliny, tlakové omezovací ventily, průtokové regulační ventily.
- popsat výhody a nevýhody pneumatických a hydraulických systémů.

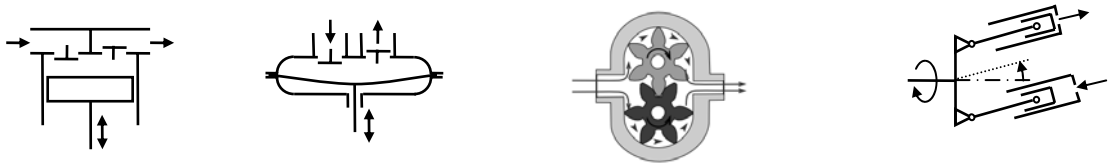
Výklad

K pneumatickému a hydraulickému obvodu patří také zdroje tlakového vzduchu nebo kapaliny. Tlakový vzduch dodávají kompresory. Tato zařízení lze rozdělit na několik typů: objemové kompresory (pístové, membránové), rotační kompresory (vícekomorový rotační, šroubové, zubové), proudové kompresory (axiální, radiální).

Tlakovou kapalinu (olej) dodávají hydrogenerátory: zubové, šroubové, lamelové, lopatkové a pístové (axiální nebo radiální pístové čerpadlo). Pro hydrogenerátor se používá také běžně označení čerpadlo.

Ukázky kompresorů a čerpadel jsou na obrázcích 3.101. Jedná se o kompresor pístový, kompresor membránový, zubové čerpadlo a axiální pístové čerpadlo.

Charakteristika čerpadla je obecně závislost průtoku pracovní kapaliny čerpadlem na jeho výstupním tlaku. Naklápěním pístů axiálního čerpadla oproti ose rotace lze řídit průtok tohoto čerpadla.

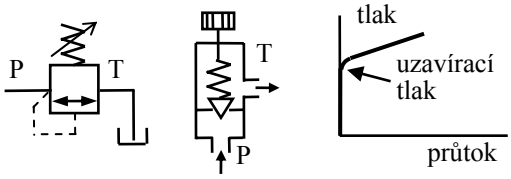


Pístový kompresor | Membránový kompresor | Zubové čerpadlo | Axiální pístové čerpadlo

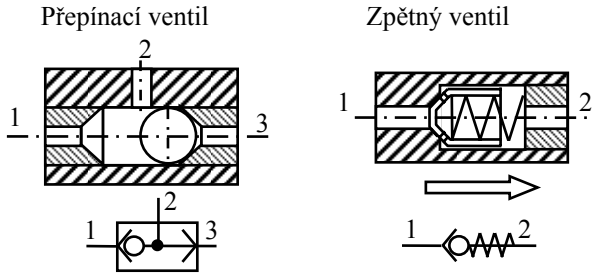
Obrázek 3.102 – Princip funkce kompresoru a hydrogenerátoru (čerpadla)

Pneumatické a hydraulické obvody vyžadují další pomocná zařízení. Některé z nich jsou součástí tabulky 3.2 s obvodovými značkami. Tlakový omezovací ventil je znázorněn na obrázku 3.102. Jeho úlohou je chránit obvod před přetlakem. Tlakový ventil se otevře, jestliže síla působící na kuželový ventil je větší než přítlačná síla pružiny. Předpětí pružiny lze nastavit ručně. Pohyb ventilového kužele může zpomalovat tlumící píst. Na charakteristice tohoto prvku je zřejmý uzavírací tlak, po jehož překročení začne hydraulická kapalina protékat. Jak je na obrázku zřejmé, uzavírací tlak je stavitelný změnou předpětí pružiny naznačeným šroubem.

Na obrázku 3.103 je přepínací a zpětný ventil. Přepínací ventil pracuje tak, že se na vývod 2 dostane vyšší tlak z přívodu 1 a 3, který přetlačí kuličku. Zpětný ventil umožňuje proudění jen jedním směrem.

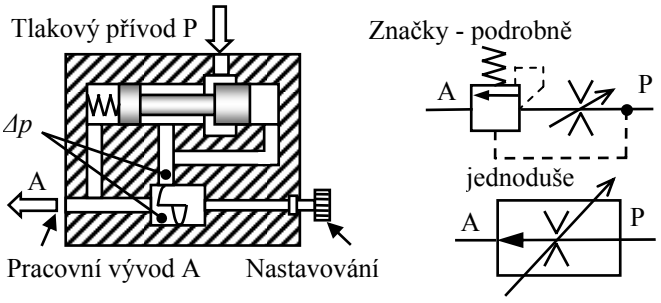


Obrázek 3.103 – Tlakový omezovací ventil



Obrázek 3.104 – Přepínací a zpětný ventil

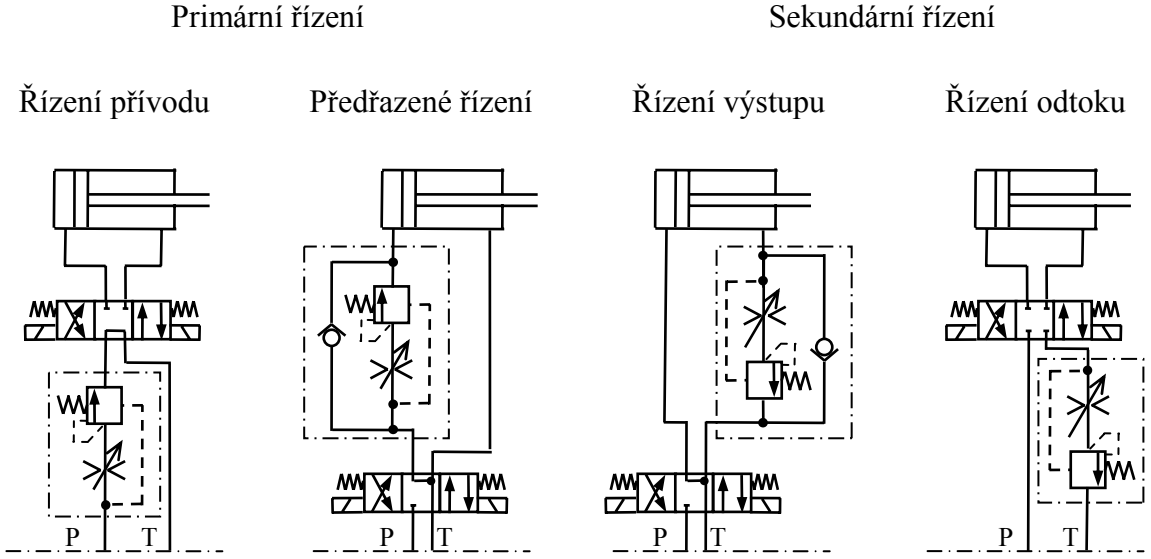
Na obrázku 3.104 je znázorněn průtokový regulační ventil, který se nazývá také tlaková váha. Tento ventil obsahuje nastavitelnou clonu, na které vzniká průtokem určitá tlaková diference Δp. Řídicí píst tlakové váhy má dvě části. Tlak oleje na vnitřní stěny obou pístů, které spojuje pístní tyč, nemá na polohu řídicího pístu vliv. O jeho poloze rozhoduje rovnováha přítlaku pružiny a síla daná velikostí tlakové diference a plochy pístu.



Obrázek 3.105 – Průtokový regulační ventil

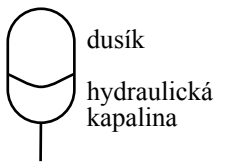
Jestliže se clonou zvětší průtok, například zvýšením tlaku na přívodu P, pak diference tlaků přetlačí vnitřní pružinu směrem doleva a přivře průtok oleje na tlakovém přívodu. Zpětná vazba působí tak, aby se obnovila nastavena velikost tlakové diference na cloně. Účelem průtokového regulačního ventilu je tedy udržovat průtok na nastavené hodnotě. Průtok oleje určuje rychlost pohybu pístu v hydraulickém válci. Konstantní průtok oleje zabezpečí také konstantní rychlost pohybu a omezí účinek kolísání tlaku a zátěže.

Průtokový regulační ventil lze využít k řízení rychlosti pohybu dvojčinného hydraulického válce. Podle umístění tohoto ventilu po směru toku oleje lze rozeznat primární a sekundární způsob řízení. Pro primární řízení jsou varianty řízení přívodu a předřazené řízení. Pro sekundární řízení je to řízení výstupu a řízení odtoku. Všechny varianty jsou znázorněny na obrázku 3.105. Čerchovaná čára odděluje funkční celky zapojení. Přívod tlakového oleje je označen písmenem P a výpusť T. Primární řízení šetří těsnění válců, namáháno je jen vedení mezi čerpadlem a ventilem. Chybějící protitlak může vést při střídavém zatížení ke zpětnému pohybu pístu. Při sekundárním řízení je brzděn odtok kapaliny z hydraulického válce. Regulační ventil tak vytváří protitlak pracovnímu tlaku a píst je držen mezi dvěma sloupci tlakového oleje. Nevýhodou řízení pomocí škrtících ventilů jsou energetické ztráty.



Obrázek 3.106 – Řízení rychlosti

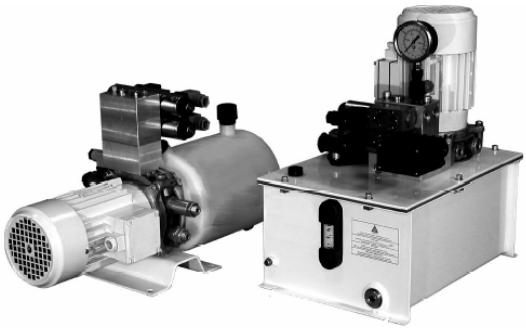
Akumulátor tlakové energie je znázorněn na obrázku 3.106. Jedná se o zásobník rozdělený pružnou membránou, kterou kapalina tlačí proti uzavřenému prostoru naplněnému dusíkem. Vysoká stlačitelnost plynné náplně dusíkem umožní pohlcovat tlakové rázy v potrubí. Hydraulická kapalina je oproti plynu téměř nestlačitelná a má vysokou tuhost.



Obrázek 3.107 – Akumulátor tlaku

Hydraulické obvody jsou otevřené a uzavřené. V otevřeném obvodu se olej shromažďuje v nádobě, odkud se zase čerpá zpět. Uzavřené obvody mají uzavřený oběh, doplňují se jen shromažďované ztráty z vložené nádrže.

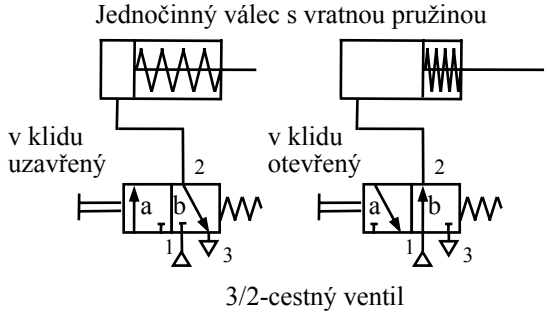
Čerpadlo, filtry, pojistné ventily a případně i akumulátor tlaku tvoří hydraulický agregát, jehož vzorové provedení je na obrázku 3.107. Je to výrobek firmy ARGO-HYTOS a.s., představující malý kompaktní agregát SMA 04 s nádrží na olej od 1,5 do 40 dm^3 pro maximální tlak 25 MPa a maximální průtok 17 dm^3/min. Výkon poháněcího elektrického motoru je 0,12 až 3 kW.



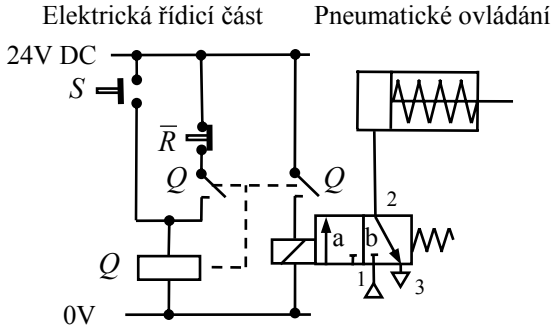
Obrázek 3.108 – Malé kompaktní agregáty SMA 04 od firmy ARGO-HYTOS

Po základních informacích o hydraulických a pneumatických obvodech následují ukázky jejich zapojení. Na obrázku 3.108 je třícestný dvoustavový ventil s vratnou pružinou ve spojení s jednočinným pneumatickým válcem se dvěma variantami klidové polohy ventilu, které se liší připojením vývodů k jednomu ze dvou bloků. Variantě obvodu s ventilem, který je v klidu uzavřen, odpovídá poloha pístu válce s roztaženou vratnou pružinou a naproti tomu u varianty s jiným ventilem, který je v klidu otevřen, je píst v poloze se stlačenou vratnou pružinou.

Ventily na obrázku 3.108 mají obecné ruční ovládání, zatímco na obrázku 3.109 je ovládání elektromagnetické. Přesun do obou krajních poloh je po stisku tlačítek, z nichž jedno je spínací a druhé rozpínací. Elektrická řídicí část obsahuje kromě tlačítek také stykač. Zapojení stykače odpovídá klopnému obvodu typu RS. Zapojení na obrázku představuje elektropneumatický systém řízení. Na rozdíl od obrázku 3.109 je ve schématech elektropneumatického řízení silová pneumatická část kreslena odděleně od elektrické řídicí části. Řídicí část se kreslí podle stejných pravidel, které platí pro schémata logického řízení.



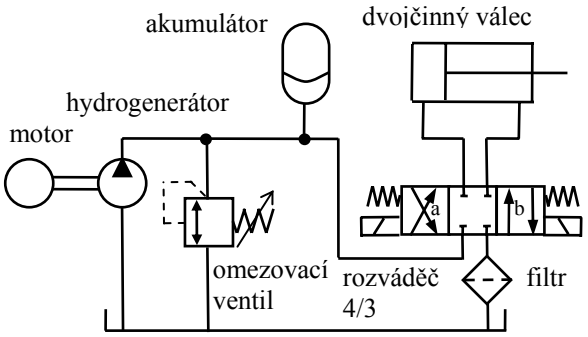
Obrázek 3.109 – Varianty funkce třícestného dvoustavového ventilu



Obrázek 3.110 – Elektropneumatické řízení

Druhá ukázka na obrázku 3.110 se týká hydraulického obvodu se čtyřcestným třístavovým ventilem, který je ovládán dvěma cívkami působícími v opačných směrech, a centrován v klidové poloze pružinami. V klidové poloze je přívod kapaliny do hydraulického válce zablokován. Ve dvou zbývajících polohách je dodávána tlaková kapalina na opačné strany pístu. Dalšími důležitými prvky, kterými je tento hydraulický obvod vybaven jsou filtr, čerpadlo (hydrogenerátor), akumulátor tlaku, pojistný tlakový ventil a samozřejmě dvojčinný hydraulický válec.

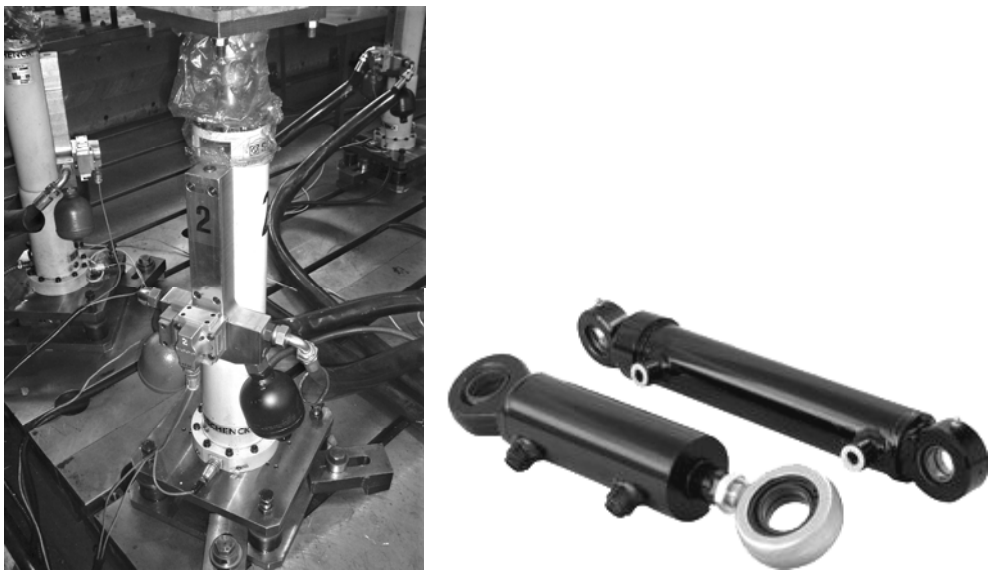
Všímavý student zjistí, že při centrované poloze ventilu prochází z čerpadla celé dodávané množství přes pojistný ventil zpět bez užitku, tj. ztrácí se výkon daný součinem tlakové ztráty (Pa) a objemového průtoku (m^3/s). Takto je mařen výkon motoru čerpadla. Moderním hydraulické pohony jsou vybaveny čerpadlem s regulací na konstantní tlak, konstantní výkon nebo s tzv. load-sensing regulací.



Obrázek 3.111 – Příklad hydraulického obvodu

Přehled hydraulických a pneumatických pohonů byl zmíněn při definici jejich obvodových značek. Hydromotory mají v některých případech stejnou konstrukci jako generátory. Od generátorů se liší tím, že kapalina se do motoru přivádí pod tlakem, a tak je schopna zaplňovat pracovní prostor. Hydromotory mohou konat rotační, přímočarý a kývavý pohybe. Rotační pohyb může vykonávat například zubové čerpadlo, jestliže se napojí na zdroj tlakového oleje. Hydromotory pro přímočarý pohyb (válce) jsou jednočinné nebo dvojčinné. U jednočinných působí tlak kapaliny jen na jednu stranu pístu, tzn. jen jeden zdvih je pracovní. Zpětný (nepracovní) pohyb pístu musí být zajištěn vnější silou (pružinou hmotností pístu a pracovního nástroje nebo jiným hydromotorem). Dvojčinné hydraulické válce mají přívod tlakové kapaliny střídavě na obě strany pístu. Tyt hydromotory mou být s jednostrannou nebo dvoustrannou pístnici, což znamená, že plocha pístu ze strany pístnice je menší než na straně bez pístnice. K hydromotorům s přímočarým pohybem patří také plunžr a teleskopický válec. Hydromotory s kývavým pohybem jsou výrobně náročné a používají se jen ve speciálních případech. Jedno z možných řešení používá píst s hřebenovým ozubením, se kterým zabírá pastorek.

Ukázka hydraulického válce, který je určen pro dopravní stroj je na obrázku 3.111.



Obrázek 3.113 – Ukázka provedení hydraulických válců

Porovnání hydraulických a pneumatických obvodů ovládání a řízení

Pneumatické systém mají následující přednosti a nevýhody:

- vyžadují centrální rozvod stlačeného vzduchu nebo aspoň kompresor, který je velmi hlučný
- nutnost rozprášení oleje do tohoto vzduchu pro bezchybnou funkci zařízení
- nelze dosáhnout velkých sil na pístech pneumatických válců, protože se používá tlak jen do 1 MPA
- dynamika řízení je značně závislá na zatížení pneumatických pohonů
- nelze dosáhnout pomalých pohybů
- možnost práce v prostředí s nebezpečím výbuchu nebo pod vodou.

Hydraulické systémy lze charakterizovat těmito výhodami a nevýhodami:

- prostorově malé jednotky přenášející velké síly a výkony
- rychle, jemně a plynule přestavitelné rychlosti pohybů válců a motorů
- jednoduché zabránění přetížení omezením tlaku
- viskozita hydraulického oleje závisí na teplotě
- vznikají ztráty prosakováním
- náchylnost ke kmitání a hluku.

Otázky 3.8.

1. Co je charakteristika čerpadla?
2. Jak se liší uzavřený a otevřený hydraulické obvody?
3. Mohou pneumatické pohony pracovat v prostředí s nebezpečím výbuchu?
4. Které pohony přenášejí vyšší výkony, pneumatické nebo hydraulické?

3.10. Piezoelektrické aktuátory

Čas ke studiu: 0,5 hodin

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat piezoelektrický aktuátor oblasti jeho aplikace.
- popsat provedení piezoelektrických aktuátorů (vrstvené, laminární,).

Výklad

Piezoelektrické aktuátory se staly velmi důležitým prvkem pro mikromanipulaci (micropositioning), kde mají nezastupitelnou úlohu. Uplatňují se také v systémech aktivního potlačování hluku a vibrací. Tyto aktuátory využívají inverzní piezoelektrický efekt. Přímý piezoelektrický efekt objevili bratří Pierre a Jacques Curie v předminulém století, kteří zjistili, že některé krystalické materiály (keramika) mají schopnost generovat elektrický náboj úměrně vnější síle, která na ně působí. Tento jev je využíván ve snímačích síly, především dynamické. Inverzní jev spočívá v tom, že elektrické pole, které je orientováno paralelně ke směru polarizace, vybudí mechanické roztažení nebo smrštění materiálu. Piezoelektrický efekt je anizotropní, tj. působí jen v určitém směru.

Nejvíce populárním piezoelektrickým materiálem je keramika PZT (Lead-Zirconate-Titanate) nebo polymer PVDF (Polyvinilidene fluoride).

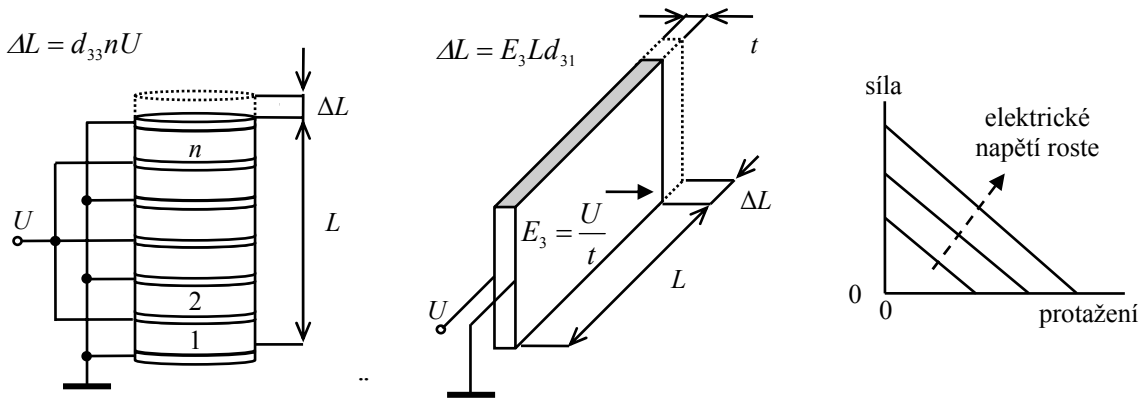
Lineární piezoelektrický aktuátor je vrstven z tenkých keramických destiček (tloušťka mezi 0,1 až 1 mm), které jsou odděleny elektrodami, jak je znázorněno na obrázku 3.112 vlevo. Potřebné napětí pro jednu destičku tvaru disku tloušťky 0,1 mm je asi 100 V, což je označováno jako nízkonapěťová LVPZ (Low voltage piezo). Destička o tloušťce 1 mm vyžaduje 1000 V a je proto označována jako vysokonapěťová HVZP. Maximální protažení je mezi 0,1 až 0,13 %, což znamená, že aktuátor o délce 100 mm má maximální protažení 100 μm. Tyto prvky vykazují hysterezí až 15 %.

Laminární uspořádání je znázorněno na obrázku 3.112 uprostřed.

Napětí, které je přivedeno na elektrody, je označeno U. K výpočtu protažení podle vzorců uvedených v obrázcích je třeba znát kromě vyznačených délek také piezoelektrické konstanty d_{33} a d_{31}. K dimenzování je navít třeba znát také maximální mechanické napětí a intenzitu elektrického pole. Tyto údaje jsou uvedeny v tabulce 3.5.

Tabulka 3.5 – Vlastnosti piezoelektrických materiálů

Materiál	PZT	PVDF
Piezoelektrické konstanty d_{33} (10^{-12} C/N nebo m/V) d_{31} (10^{-12} C/N nebo m/V)	 300 -150	 -25 jednoosý d_{31}=15 d_{32}=3 dvouosý d_{31}=d_{32}==3
Maximální napětí (MPa) tlak tah	 600 80	 200 200
Max. intenzita elektrického pole (V/mm)	2000	5.10^5
Hustota (kg/m^3)	7600	1800



Vrstvené provedení aktuátoru

Laminární provedení aktuátoru

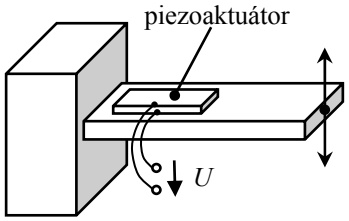
Charakteristika aktuátoru

Obrázek 3.113 – Provedení piezoelektrických aktuátorů a jejich charakteristika

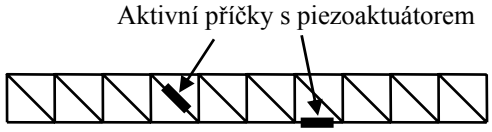
Charakteristika aktuátoru je znázorněna na obrázku 3.112 vpravo. Jedná se o závislost síly a protažení s parametrem elektrické napětí.

Firma CEDRAT dodává vrstvené piezoaktuátory v provedení označeném PI 840.30 pro protažení 45 μm a sílu 1500 N, dále APA 50 S pro protažení 55 μm a sílu 45 N (APA 100

N, 110 m a 117 N). Tloušťka vrstvy u laminárních aktuátorů je typicky 250 μm a je potažena stříbrnými elektrodami. Materiál PVDF je ohebnější ve srovnání s PZT, avšak tyto aktuátory mají 300krát menší citlivost.



Obrázek 3.114 – Vetknutý nosník s piezoaktuátorem



Obrázek 3.115 – Příhradová konstrukce s aktivními příčkami

Jak již bylo uvedeno, piezoaktuátory mají uplatnění v systémech aktivního tlumení vibrací a zvuku (obrázek 3.113 a 3.114). Jestliže budou umístěny blízko vetknutí nosníku, pak jeho volný konec lze rozkmitat nebo v případě kmitání utlumit. Jiným aplikačním příkladem je příhradová konstrukce. Jestliže je třeba její kmitání utlumit, pak se místo některých prvků umístí piezoelektrické aktuátory, které kmitání vhodným způsobem řízení utlumí. Tento princip byl studován pro tlumení anténních systémů na oběžné dráze kolem země.

Další aplikace lze nalézt v reproduktorech, pohybových ústrojích zrcadel laserů, frekvenční modulace laserového paprsku užitím Dopplerova jevu, vstřikování paliva do válců systémem common rail, inkoustové tiskárny, mikroskopy. Dokonce byl zkonstruován rotační krokový motor, které je piezoaktuátory poháněn.

Otázky 3.9.

1. Jaký je nejčastěji používaný piezoelektrický materiál?
2. Jaké veličiny tvoří charakteristiku aktuátoru?
3. Uveďte tři příklady aplikace piezoaktuátorů.

3.11. Počítačové sítě

Čas ke studiu: 1 hodina

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat komunikační protokol, IP adresy.
- popsat rozdělení sítí z hlediska aplikací, územní rozlehlosti nebo topologie.
- vysvětlit symbolické adresy, vybrané služby www.

Výklad

Předávání informací je důležitá součást naší civilizace. První drátový přenos informací začala zajišťovat telefonní síť již více než před 100 lety. Každý ví, že telefonovat lze kamkoliv do světa. Počítačová síť je vymoženost konce 20. století a také se s ní lze setkat kdekoliv v civilizovaných místech na zeměkouli. Sítě vznikly s cílem sdílet

- počítačové programy a dat
- technické vybavení (například společná tiskárna)

Z hlediska aplikací lze sítě rozdělit na

- jednoúčelové sítě
  - rezervační (letenky)
  - bankovní
  - pro důležité organizace (armáda)
  - pro řízení výroby
  - atd.
- veřejné sítě

Z hlediska územní rozlehlosti lze jsou sítě s tímto označením

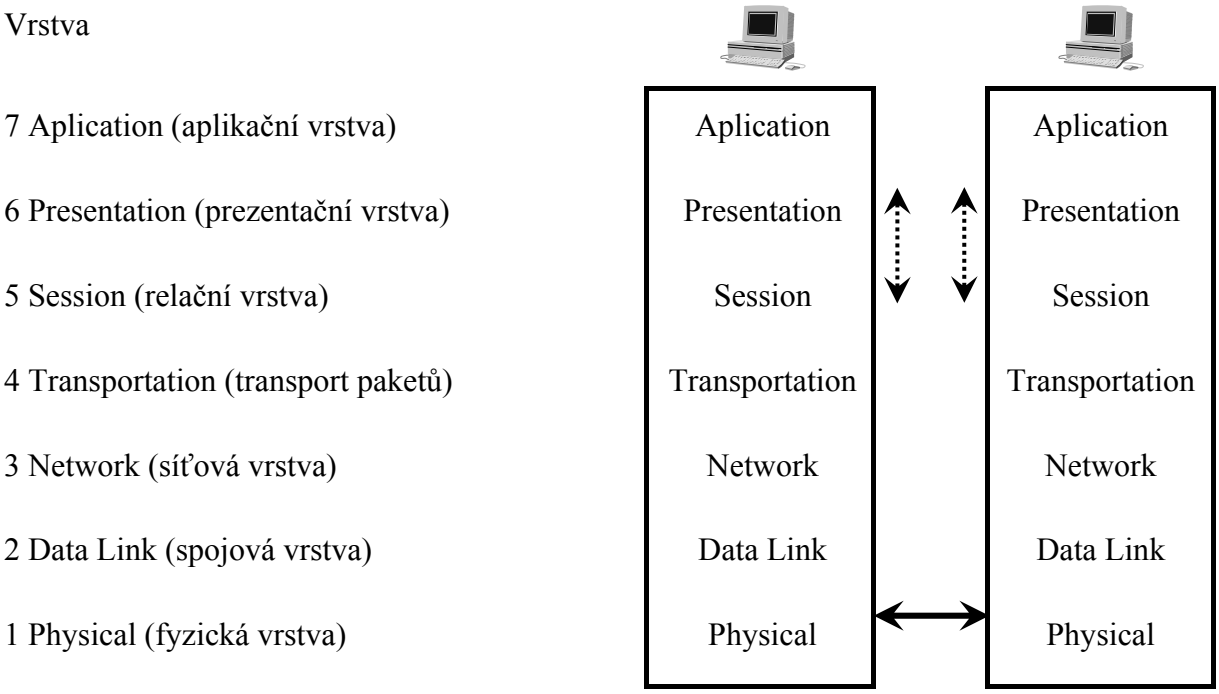
- LAN (Local Area Network) pro jednu instituci, například univerzita
- MAN (Metropolitan Area Network) pro městskou aglomeraci
- WAN (Wide Area Network) přesahující města, například síť Internet

Síť může být z hlediska topologie, tj. vzájemného pospojování počítačů

- sběrnicová (na jednu sběrnici jsou připojeny všechny počítače bez priority)
- kruhová (sběrnice je uzavřena do kruhu)
- hvězdicová (jeden centrální počítač – centrální uzel, ke kterému jsou ostatní připojení)
- typ stromu (síť se rozvětvuje v rozbočovačích)
- typ polygonu (každý s každým)

Velmi často jsou sítě hybridní s částmi tvořenými různou topologií. Sítě jsou standardizovány v normě IEEE 802 zobecněním konkrétních výrobků jako například sítě arcnet, token-ring a ethernet. Arcnet je historicky nejstarší standard (1982). Token-ring je síťovou implementací firmy IBM

Pravidla komunikace po sítích určují komunikační protokoly. Komunikace má řadu vrstev (problémových oblastí) od řešení fyzického propojení (vlastnosti signálů elektrických a optických) až po aplikační programy. Standard ISO OSI (Open System Interconection) rozeznává 7 vrstev.



Obrázek 3.116 – Komunikační protokol ISO OSI

Označení vrstva je zvoleno, protože mezi nimi dochází k předávání informací. Mezi dvěma počítači se samozřejmě bezprostřední přenos informací odehrává na nejspodnější fyzické vrstvě.

Technické prostředky obsahují

- opakovač – repeater, tvaruje a zesiluje přijatý zkreslený signál (pracuje na fyzické vrstvě)
- převodník, nejen zesiluje, ale i převádí z jednoho kabelu na jiný, například elektrický signál na optický (pracuje na fyzické vrstvě)
- přepínač – switch, zajišťuje větvení signálu například v sítích se stromovou topologií (pracuje na fyzické vrstvě)
- most – bridge, spojuje dva segmenty kabelové sítě a zajišťuje přenos paketů (nese data jedné aplikace – jednoho spojení). Toto zařízení vykonává některé inteligentní funkce tím, že reaguje na obsah paketů a rozeznává část jejich adresy a rozhoduje, který paket má být poslán vně svého segmentu, kde vznikl (pracuje na úrovni spojové vrstvy). Most spojuje také sítě, které se liší na úrovni fyzické vrstvy.

- směrovač – router, plní obdobné funkce jako most, ovšem na vyšší úrovni lití LAN (pracuje na úrovni síťové vrstvy). Směřovač je schopen určit každému paketu jeho další cestu, tato činnost se nazývá směrování paketů.
- brána – gate, pracuje na nejvyšší úrovni a slouží k propojení LAN na cizí prostředí.

Síťové operační systémy představují nástavbu operačního systému počítače, která má zajistit komunikaci s ostatními účastníky sítě. Síťové programové vybavení zajišťuje sdílení prostředků (společné využití například tiskáren), synchronizaci počítačů,ochranu prostředků sítě, obsluhu tisku a organizování front, zpracování chyb a administrativní úkony (statistika spojení).

Každý síťový operační systém umožňuje vytvořit server a pracovní stanici. Servery jsou počítače, ke kterým jsou připojeny sdílená zařízení (například tiskárny) a které obsahují společná data. Servery poskytují služby ostatním účastníkům sítě.

Servery jsou různých typů: diskový, souborový, tiskový, komunikační a zálohovací. Pro programovou obsluhu sítě typu Lan se používají dva typy operačních systémů, síť server-klient a pear-to-pear (já pán, ty pán).

❑ Síť Internet

Síť internet se řídí protokolem označeným zkratkou TCP/IP (Transmision Control Protocol/Internet Protocol). Má schopnost maximálně pružně směrovat zprávy v rámci rozlehlé sítě. Síťovým protokolem se označují i konkrétní softwarové prostředky, které slouží ke komunikaci v počítačové síti. V našem případě jsou to prostředky nezávislé na platformě (počítač, operační systém) a na síťovém hardware (síťové karty, kabeláž).

Internet protokol odpovídá síťové vrstvě a přenáší mez vzdálenými počítači IP-datagramy, které ve svém záhlaví obsahují adresu příjemce. Síť může přenášet každý datagram samostatně. Lze uvést, že datagramy mohou ke příjemci dorazit i v jiném pořadí, než byly vyslány. Každé síťové rozhranní (síťová karta) má v rámci celosvětové sítě jednoznačnou IP adresu, kterou nesmí používat žádné jiné síťové rozhranní. Internet je tvořen jednotlivými sítěmi, které jsou propojeny pomocí směrovačů (router).

Protokol TCP odpovídá transportní vrstvě. Jeho úkolem je transportovat datové segmenty jednotlivým aplikacím. Protokol TCP zajišťuje spojení mezi aplikacemi (programy), které běží na vzdálených počítačích. Zabezpečovat však také může komunikaci mezi procesy jednoho počítače. Adresou pro doručování datových segmentů je port.

Aplikační protokoly odpovídají několika vrstvám OSI: relační, prezentační a aplikační, které jsou spojeny do jediné aplikační vrstvy TCP/IP. Aplikačních protokolů je velké množství, a proto z hlediska uživatele jsou uvedeny jen tyto

- HTTP (Hypertext Transfer Protokol)
- TELNET (vzdálený terminál počítače)
- FTP (File Transfer Protocol) pro přenos souborů
- POM3, SMTP a IMAP pro elektronickou poštu (E-mail)

❑ IP adresy

IP-adresa je 32bitové číslo, které identifikuje síťové rozhranní. Existují dva nejpoužívanější způsoby, jak toto číslo uvádět:

- Dekadický zápis, například 10.240.5.100
- Binární (bitový) zápis, například 00001010.11110000.00000101.01100100

V obou případech se jedná o posloupnost čtyř čísel oddělených tečkou. Každé číslo může nabývat dekadických hodnot 0 až 255 (omezeno 8 bity).

IP adresa má dvě částí, tzv. síťovou a hostitelskou (Host Number). Obě části se rozeznají podle síťové masky. Síťovou masku můžeme zadávat ve třech způsobech zápisu:

- Dekadický zápis, například 255.255.255.0
- Binární (bitový) zápis, například 11111111.111111111.11111111.00000000
- Zkrácený zápis, například /24

Nejpřehlednější je pravděpodobně druhý zápis, nejúspornější naopak třetí. Bity s logickými jedničkami odpovídají síťové adrese. Princip získání jednotlivých částí IP adresy je velmi jednoduchý. Tam, kde má síťová maska jedničky (v binárním zápisu), tam je v IP adrese síťová část, a tam, kde jsou nuly, je host část. Síťová část adresy se dostane logickým vynásobením adresy hodnotou masky a host část logickým vynásobením adresy negovanou hodnotou masky .

IP sítě se dělí do tří tříd podle velikosti. Úplná IP adresa obsahuje síťovou část a hostitelskou část (adresu zařízení v rámci sítě). Síťová a hostitelská část mají v různých třídách sítí různou délku, jak ukazuje tabulka 3.6.

Sítím připojeným k Internetu jsou přiřazeny typy tříd, které určují maximální počet možných hostitelů v síti. Předchozí tabulka š.6 ukazuje, jak se v jednotlivých třídách liší síťová a hostitelská část IP adresy. Třída A je přiřazena síti, která má více než 65 535 hostitelů; třída B je pro sítě, které mají 256 až 65 534 hostitelů; třída C je pro sítě s méně než 256 hostiteli. Všechny síťové adresy mimo tyto rozsahy pro třídy D a E jsou rezervovány nebo používány pro experimentální sítě nebo skupinové vysílání.

Tabulka 3.6 – Rozdělení IP-adresy pro jednotlivé třídy

Bity	0					8								16								24							
Třída A	0	síťová adresa												host														
Třída B	1	0	síťová adresa																			host						
Třída C	1	1	0	síťová adresa																						host		
Třída D	1	1	1	0	adresa pro skupinové (vícesměrné) vysílání (multicast)																							
Třída E	1	1	1	1	0	rezervováno pro budoucí použití																						

Pokud hostitelská část IP adresy obsahuje samé nuly, identifikuje síť a ne hostitele. Takovou adresu nelze přiřadit žádnému fyzickému zařízení. Síťová část adresy musí začínat hodnotou od 1 do 126 nebo od 128 do 223. Všechny ostatní hodnoty v síťové části mohou být od 0 do 255 s výjimkou, že ve třídě B jsou rezervovány síťové adresy 128.0.0.0 a 191.255.0.0 a ve třídě C jsou rezervovány síťové adresy 192.0.0.0 a 223.255.255.0.

Hodnoty v hostitelské části IP adresy fyzického zařízení mohou být v rozmezí 0 až 255, tato část však nesmí obsahovat samé 0 nebo samé 255.

Síťová část musí být stejná pro všechna IP zařízení v samostatné fyzické síti (např. jedné ethernetové LAN nebo připojení WAN). Hostitelská část musí být různá pro každé IP zařízení (nebo přesněji, pro každý IP port nebo rozhraní), které je přímo připojeno do této sítě. Síťová část IP adresy se v tomto návodu označuje jako číslo sítě; hostitelská část jako číslo hostitele (stanice).

Pro připojení k Internetu nebo libovolné privátní IP síti, která používá Internetem přiřazené číslo sítě, se musí získat registrované číslo IP sítě od internetového autorizačního síťového informačního centra.

❑ Symbolické adresy

IP adresa je výhodná pro počítač, avšak pro uživatele je nepohodlná. Naštěstí existuje síťová služba DNS (Domain Name System), která zajišťuje používání jmenných názvů uzlů místo jejich IP adres, například symbolickou adresu www.vsb.cz na místo IP adresy 158.196.149.74. Princip DNS je velmi jednoduchý, základem je databáze se dvěma položkami a to jmenným názvem počítače a IP adresou.

Databáze DNS má hierarchické uspořádání, což znamená, že jednotlivé jmenné názvy jsou rozděleny do vzájemně nadřazených skupin, které se nazývají domény a subdomény.

Jména v jedné doméně k sobě logicky patří, ať už v rámci jedné organizace či celého státu. V rámci jednotlivých domén lze rozlišovat podskupiny jmen, tzv. subdomény, ty mohou mít další vnořené subdomény atd. Každé doméně a subdoméně je přiřazeno nějaké jméno. Název síťového uzlu je pak tvořen z posloupnosti řetězců, které jsou odděleny tečkami

jméno_uzlu.subdoménaN. subdoména2.subdoména1.doména

Doména je nejobecnější část z celého jména. V našem případě to bude označení státu České republiky (cz).

Databáze DNS je distribuovaná, což znamená, že je rozmístěna na více počítačích po celém světě. Těmto počítačům se říká *name* servery. Pro každou doménu existují dva *name* servery: primární a sekundární. Primární jmenný server udržuje platné informace a sekundární tyto informace v pravidelných časových úsecích zálohuje. Tyto *name* servery jsou organizovány distribuovaně. Pro každou úroveň DNS existuje jedna skupina serverů. Jinými slovy servery, které se starající o nejvyšší úroveň DNS, znají servery, které mají na starost nižší úroveň.

❑ Některé služby internetu

Nejvíce využívanou službou internetu je služba WWW (World Wide Web), která zprostředkuje přístup k internetovým (webovým) stránkám, které se vyvinuly z prostého textu, přes jednoduché obrázky až k dnešním multimediálním prezentacím.

Přenos webových stránek zajišťuje protokol HTTP (Hyper Text Transfer Protocol). Platí pro něj platformní nezávislost (PC nebo Apple Macintosh), a tak lze surfovat po Internetu pod jakýmkoliv současným operačním systémem. K prohlížení internetových stránek je zapotřebí tzv. internetový prohlížeč. Na protější straně komunikace je spuštěn WWW server, který přijímá požadavky od klientů (prohlížečů) a jako odpověď posílá zdrojový kód stránek. Ten je v prohlížeči interpretován a zobrazen. Internetové stránky jsou psány v jazyce HTML (Hypertext Markup Language). Zdrojový kód stránky obsahuje

formátovací příkazy. Kromě tohoto jazyka se užívají skriptovací nástroje typu JavaScript či VBScript, popřípadě plnohodnotné programovací jazyky (Java, C#, VB.NET).

Přenos souborů zajišťuje služba FTP a protokol FTP (File Transfer Protocol), kterého tato služba využívá. Jde o nástroj pro vzdálenou práci se soubory a složkami. Dovoluje kopírovat soubory mezi vzdálenými počítači, popřípadě zakládat a rušit složky.

Další oblíbenou službou internetu je poštovní služba. Umožňuje posílat pomocí Internetu elektronickou poštu - emaily. Poštovní služby zajišťují poštovní servery, které shromažďují došlou korespondenci a tuto rozesílají. V Internetu tedy komunikují poštovní servery mezi sebou a teprve v okamžiku připojení k serveru elektronickou poštu předají adresátovi. Poštu zajišťují tři nejrozšířenější poštovní protokoly POP3, moderní IMAP a SMTP. Některé protokoly jsou určené pro odesílání pošty, jiné pro přijímání. Protokol POP3 (Post Office Protocol) poštu přijímá. Také protokol IMAP (Internet Mail Access Protocol) elektronickou poštu dovede přijmout, avšak na rozdíl oproti POP3 poskytuje možnost práce s dopisy přímo na poštovním serveru. Tímto odpadá kopírování na lokální počítač jako u protokolu POP3. Protokol SMTP (Simple Mail Transfer Protocol) je určen k odesílání pošty z lokálního počítače na poštovní server.

Otázky 3.10.

1. Co je to IP adresa na internetu?
2. Co je to LAN?
3. Vyjmenujte některé služby internetu.
4. K čemu se používá přepínač – switch?

3.12. Vizualizace a řízení z operátorského pracoviště

Čas ke studiu: 2 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat pojem vizualizace, operátorské řízení, alarm, trend, runtime, vývojové prostředí SCADA/HMI, tenký a tlustý klient
- popsat hlavní funkce vizualizace v průmyslové automatizaci
- vysvětlit jednotlivé úrovně řízení a jejich uspořádání do systémové architektury

Výklad

Vizualizace

Vizualizace znamená zviditelnění. Umožňuje zobrazit vhodným způsobem to, co není vidět nebo co je našimi smysly nepostřehnutelné, a tím srozumitelnou formou přibližuje nějaký děj. Takovýmto dějem může být právě získávání, zpracování a grafické zobrazení dat z řízeného procesu, či zviditelnění rozpracované výroby v reálném čase. Vizualizační systém má za úkol:

- grafické znázornění řízeného děje,
- sledování – jinými slovy monitorování - a archivace zvláštních a chybových stavů - alarmů,
- sledování průběhů a archivace vývoje vybraných parametrů v čase – časové charakteristiky – neboli tzv. trend,
- možnost zpětného vyvolání průběhu děje z archívu k analýzám a k dalšímu zpracování potřebných parametrů,
- vytváření a archivace reportů o průběhu řízeného děje.

Pro vizualizace je využívána celá řada programových a komunikačních prostředků. Byly vytvořeny proto, aby byly zviditelněny vazby mezi výrobním zařízením a hardware a software prostředky pro jejich řízení.

Obrázek 3.118 - Jednoduchá vizualizace pro signalizaci stavu zapnuto/vypnuto a signalizaci poruchy nebo krajního stavu (blikání žárovky, diody) a moderní software prostředí pro operátorské řízení (rozhranní člověk-stroj)

❑ Systémy řízení z operátorského pracoviště

Vizualizace nám tedy umožňuje na monitoru počítače nebo řídicím panelu zobrazit probíhající technologický proces, aktuální měřené hodnoty v podobě čísel nebo grafu, být informováni o vzniklých poruchách popř. možnostech jejich řešení. Je nám rovněž dovoleno nastavovat žádané hodnoty nebo manuálně zasahovat do automatického procesu, apod. V takovém případě mluvíme o vizualizaci procesu v reálném čase, někdy nazývaném jako runtime systému.

Systémy pro operátorské řízení jsou často označovány jako SCADA/HMI (z anglického *Supervisory Control And Data Aquisition/ Human Machine Interface*), tedy systémy pro supervizí řízení a získávání dat/ s rozhranním člověk – stroj). Jsou využívány také jako vývojová prostředí již při projektování systémů řízení ještě před jejich nasazením do provozu. Představují tak programovou podporu při projektování systémů řízení. Jsou rovněž důležité pro aktualizace a inovace systémů řízení již zprovozněných.

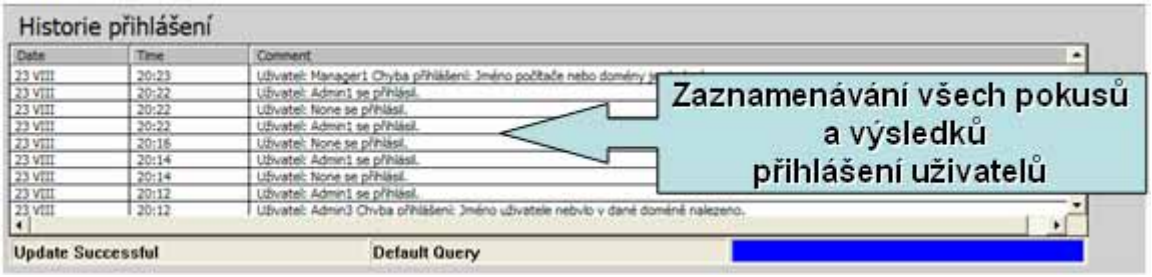
Klíčové funkce SCADA/HMI systémů jsou:

- Sběr a ukládání dat 7/24
- Zpracování dat do vhodných a námi definovaných formátů
- Prezentace výsledků:
  - včas
  - na správné místo
  - kompetentním osobám

Úloha sběru a prezentace dat na monitor operátorského pracoviště – vizualizace – tak musí být rozšířena o další systémovou funkci, a sice zabezpečení aplikace – aby k ní měli přístup pouze kompetentní osoby.

O bezpečný přístup k datům se v aplikaci starají konfigurace:

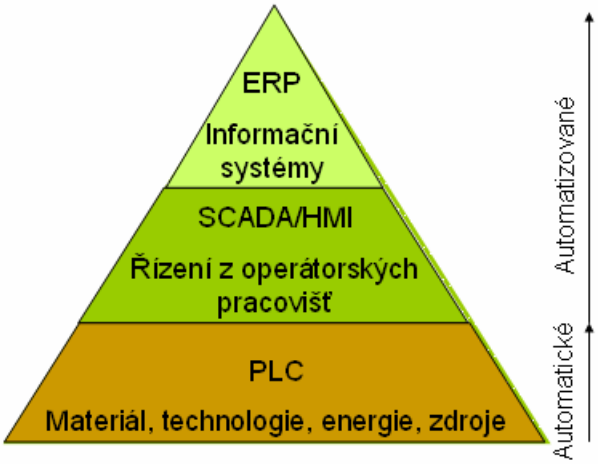
- Hesla a jména uživatele systému
- Přístupová práva k aplikaci
- Viditelnosti objektů aplikace až po přihlášení do aplikace



Obrázek 3.119 - Vizualizace zabezpečení přístupu k datům aplikace

❑ Architektura vizualizačního systému

Programové a komunikační prostředky pracují na platformách specifických pro danou oblast průmyslu a síťovém prostředí. Každý průmyslový podnik, který chce nasadit systém vizualizace a řízení z operátorského pracoviště, potřebuje nejdříve vybudovat síťovou architekturu pro komunikaci mezi jednotlivými zařízeními a vlastním řídicím systémem postaveným na algoritmech naprogramovaných pro PLC. Úroveň řízení postavená na PLC je často nazývaná jako úroveň řízení 1 (automatické řízení). Řízení z operátorských pracovišť pak tvoří úroveň nadřazenou, tedy úroveň 2 (automatizované řízení). Dvou a více úrovňové architektury řízení jsou tak hierarchické. Rozhranním mezi jednotlivými úrovněmi řízení se označuje jako interface. Rozhraní mezi úrovní 1 a 2 je často nazýváno jako rozhranní člověk – stroj (HMI z anglického human machine interface), protože na rozdíl od úrovně 1, kde řízení probíhá automaticky podle programů napsaných z algoritmů, se od úrovně 2 již počítá s aktivní úlohou člověka – operátora - a jeho zasahováním do probíhajícího řízení z operátorského pracoviště.



Obrázek 3.120 - Hierarchie architektury systémů řízení

Příkladem software architektury je tzv. Service Oriented Architecture, zkráceně SOA. Využívá služby - software services – které jsou nezávislé na vyvíjecích platformách, programovacím jazyce a technologiích, např. Java, .NET apod.

Služby psané v C# běží na .Net platformě, služby psané v Java běží na Java EE platformě. Oba typy umí poskytovat služby stejným SOA systémům a aplikacím. Aplikace na kterékoli platformě umí používat službu té druhé jako webové služby (viz. kapitola 3.10). Definice rozhraní (interface) skrývá způsob provedení služby.

- **Vizualizace dat v Internet/Intranet sítích**

Přenos dat z řízených technologických procesů v síti Internet je příkladem více-úrovňové architektury řízení. Data získávaná z technologie a předávaná z PLC do operátorských pracovišť jsou navíc prostřednictvím služby www (World Wide Web) poskytovaná do sítě Internet. Tímto způsobem jsou data z technologie dále předávána mezi Internetovými klienty a servery. Internetový klient je počítač žádající o zasílání dat-dokumentů. Internetový server je počítač, na kterém běží software schopný odpovídat na požadavky. Komunikace mezi klientem a serverem probíhá pomocí protokolu HTTP(HyperText Transfer Protokol).

Internetový server může data předávat ve standardním formátu, např. ve formátu HTML (HyperText Markup Language) nebo XML (eXtended Markup Language). Dokument v tomto formátu lze prohlížet v běžném prohlížeči Internetu (Internet Explorer). Tato vizualizace se nazývá tenký klient. Tenkým klientem pak může být i počítač, který je v hierarchii řízení součástí nejvyšší úrovně řízení označované jako úroveň 3. Tímto způsobem jsou data sdílena v informačních systémech zodpovědných za komplexní plánování výrobních zdrojů podniku (ERP z anglického Enterprise and Ressource Planning). Mezi výrobní zdroje patří data o lidských zdrojích, tedy zaměstnancích, materiále a energiích, výrobním zařízení atd.

Internetový server může také data předávat v jiném než standardizovaném formátu. V takovém případě je nutné mít na straně klienta nainstalovaný vizualizační software, který umí získaná data zpracovat a zobrazit (InTouch a Internet Explorer). V tomto případě se jedná o tlustého klienta.

❑ Alarmy

Alarm je definován jako specifický či výjimečný stav nebo hodnota monitorované veličiny systému procesu řízení. Úkolem tohoto generovaného stavu je signalizovat změny definované v procesu jako důležité (start, ukončení pracovní činnosti) nebo závažné (např. překročení limitní hodnoty).

Alarmy lze dělit podle typu sledované veličiny:

- Analogový alarm- je definován na analogové hodnoty, veličiny definované v určitém rozsahu.
- Diskrétní alarm– vždy jeden ze dvou stavů je před-definovaný jako alarm.
- Odchylkový alarm- je aktivován tehdy, pokud dojde k procentuální odchylce od určené meze. Procentuální odchylka je vypočítána v reálném čase.
- Alarm na rychlost změn - se vyvolá vždy, pokud je rychlost změny sledované veličiny větší než nadefinovaná mez.
- Speciální alarm– definuje ostatní změny statických vlastností.

Alarmy mohou být organizovány ve skupinách. Tyto skupiny alarmů jsou obvykle seřazeny **hierarchicky** – jako nadřazené a podřazené. Podřazené skupiny jsou navzájem propojené a posílají se jako alarmové hlášení jednomu nadřazenému systému, který je sjednocuje a vyhodnocuje – tzv. **systém s distribuovanými alarmy**. Pokud je v dané kompetenci tohoto systému vyrozumět operátora na dané úrovni řízení, tak to udělá. Tímto způsobem je možné rozdělit kompetence pro obsluhu systému a zabránit tomu, aby na jednu obrazovku operátora nechodila hlášení, která s řízením procesu z této stanice nesouvisí.

Priorita alarmu označuje závažnost alarmu a určuje, jak kritický nebo důležitý je sledovaný stav. V případě překročení limitu hodnoty ve sledovaném prostředí může být alarm zařazen do kategorie "velmi závažný" a vyžadovat okamžitou reakci a jednání za účelem záchrany života nebo majetku. Naopak míra závažnosti a tedy i priorita alarmu nastaveném pro zakončení pravidelné pracovní činnosti bude minimální.

Sledovaná veličina může mít hned několik definovaných alarmů. V takovém případě se jedná o **více-stavový alarm**. Například může mít alarmový stav několik mezních hodnot-limitů:

- Vysoký- (označen Hi, High)
- Velmi vysoký (HiHi, High High)
- Nízký – (Lo, Low)
- Velmi nízký – (LoLo, Low Low).

Hlavním účelem alarmů je upozornit obsluhu systému na výjimečný stav, úkolem obsluhy je pak tyto stavy vzít na vědomí („acknowledge"), tím potvrdí, že jsou se situací obeznámeni a umí patřičně zasáhnou. Toto potvrzení nemusí automaticky znamenat nápravu, ani vracení sledované veličiny do normálního stavu.

❑ Trendy

Trend je definován jako průběh sledované veličiny v čase. Existují dva základní způsoby, jak zobrazit trend:

1. **Reálný trend** představuje průběh sledované veličiny, který je zobrazen na obrazovku operátora v reálném čase. Důležité je si však uvědomit, že je zobrazován pouze časový

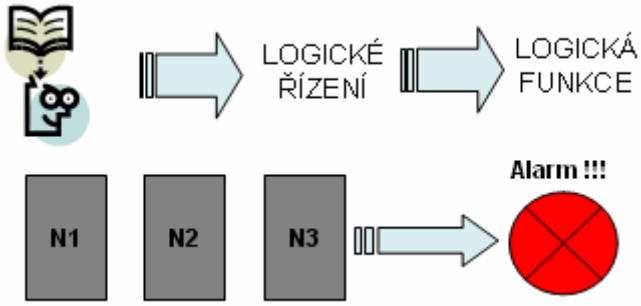
úsek definovaný rozsahem kreslícího nástroje. Data sledované veličiny nejsou nikam ukládána, není tedy potřeba tento nástroj zvlášť konfigurovat pro záznam historie dat.

2. **Historický trend** představuje nástroj pro záznam a ukládání dat s možností jejich dodatečného prohlížení. Data jsou ukládána do souboru a pak teprve posílána do kreslícího nástroje, je tedy nutné pohled na trend aktualizovat například tlačítkem pro aktualizaci („update“). Tento typ nástroje umožňuje operátorovi vyhledávat v minulosti uložené průběhy, k čemuž má k dispozici konfigurovatelná tlačítka a lišty pro pohyb a přiblížení v časové oblasti (zoom).

❑ Příklad řešení vizualizace laboratorní úlohy

Zadání: předpokládejme známou úlohu dílny, kde jsou umístěny tři nádrže s technologickými kapalinami. V každém zásobníku je umístěno čidlo indikující minimální množství kapaliny nutné pro provoz dílny. V případě, že alespoň ve dvou zásobnících je již méně kapaliny, než je minimální množství, je třeba kontrolkou informovat operátora, aby doplnil kapalinu.

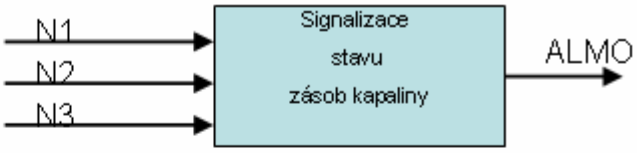
Obrázek 3.121 ukazuje návrh řešení úlohy vizualizace



Obrázek 3.121 - úloha pro vizualizaci

Řešení úlohy provedeme podle dříve popsaných metod řešení, viz. schéma na obr. xxx

Blokové schéma



Pravdivostní tabulka

N1	N2	N3	ALMO
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	1
1		0	1
1	1	1	1

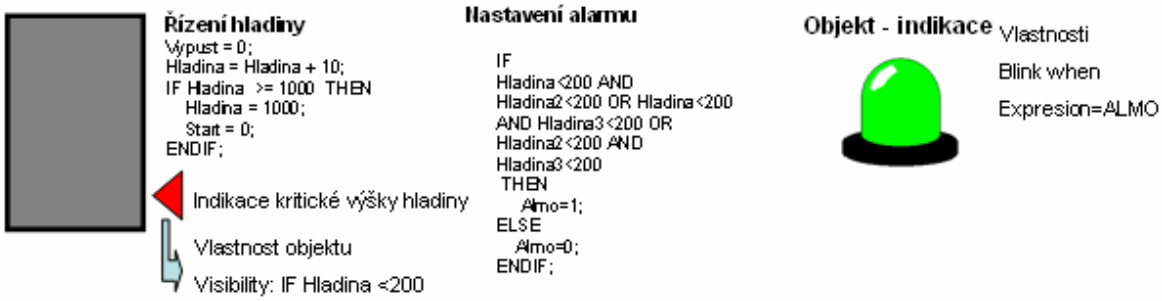
Algebraická rovnice

$$ALMO = N1.N2 + N1.N3 + N2.N3$$

Dalším krokem bude:

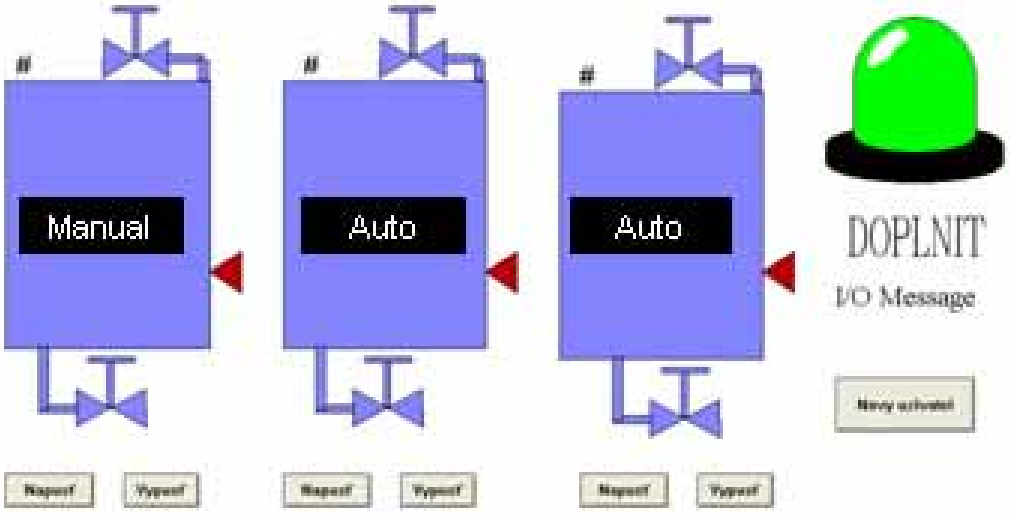
- Navrhnout vzhledu aplikace ve vizualizačním prostředí
- Definice proměnných pro aplikaci vizualizace
- Spuštění aplikace v provozním režimu (runtime), viz. schéma na obrázek 3.122.

Proměnné	Typy	Popis
Hladina	analog	Změna výšky hladiny
VENTIL	discrete	Indikace stavu ventilu
ALARM	discrete	Výstup logické funkce ALMO



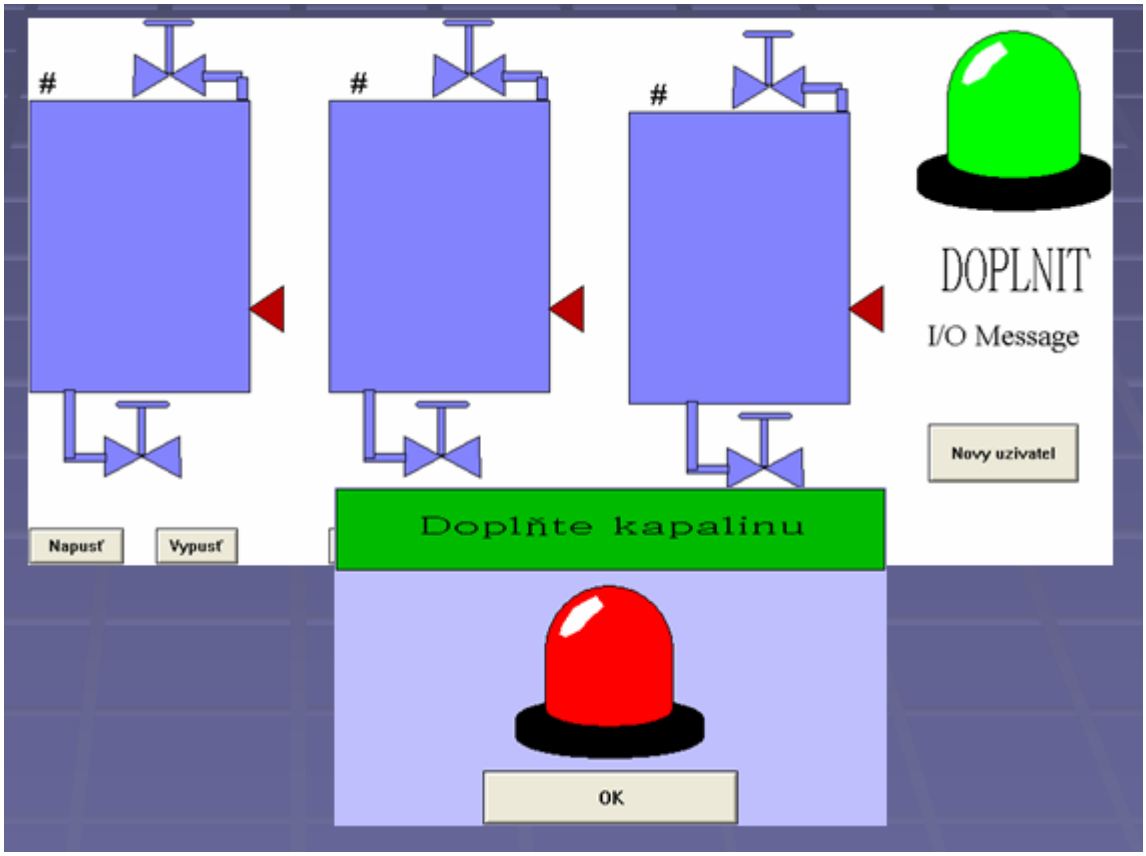
Obrázek 3.122 - Návrh aplikace

Vzhled navržené vizualizace je na obrázku 3.123.



Obrázek 3.123 - Vzhled vizualizace aplikace

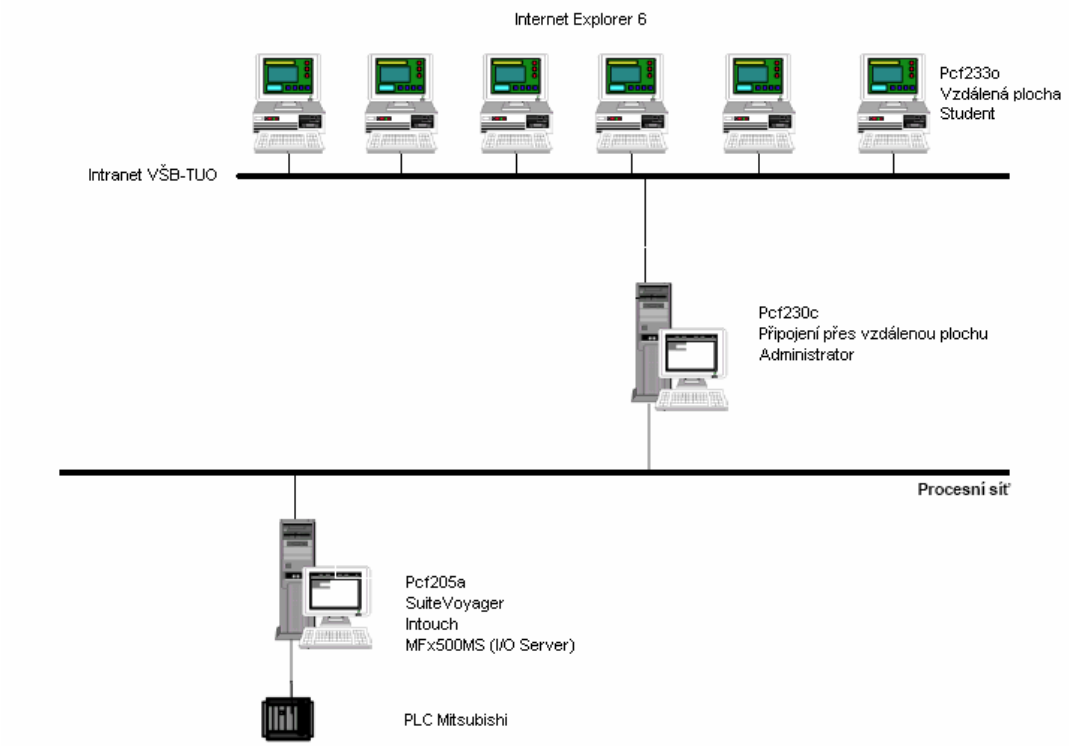
V případě dosažení minimální hladiny u více než dvou nádrží je operátor vyzván k zásahu funkcí alarmu, viz. obr.:



Obrázek 3.124 - Alarmové hlášení v aplikaci vizualizace

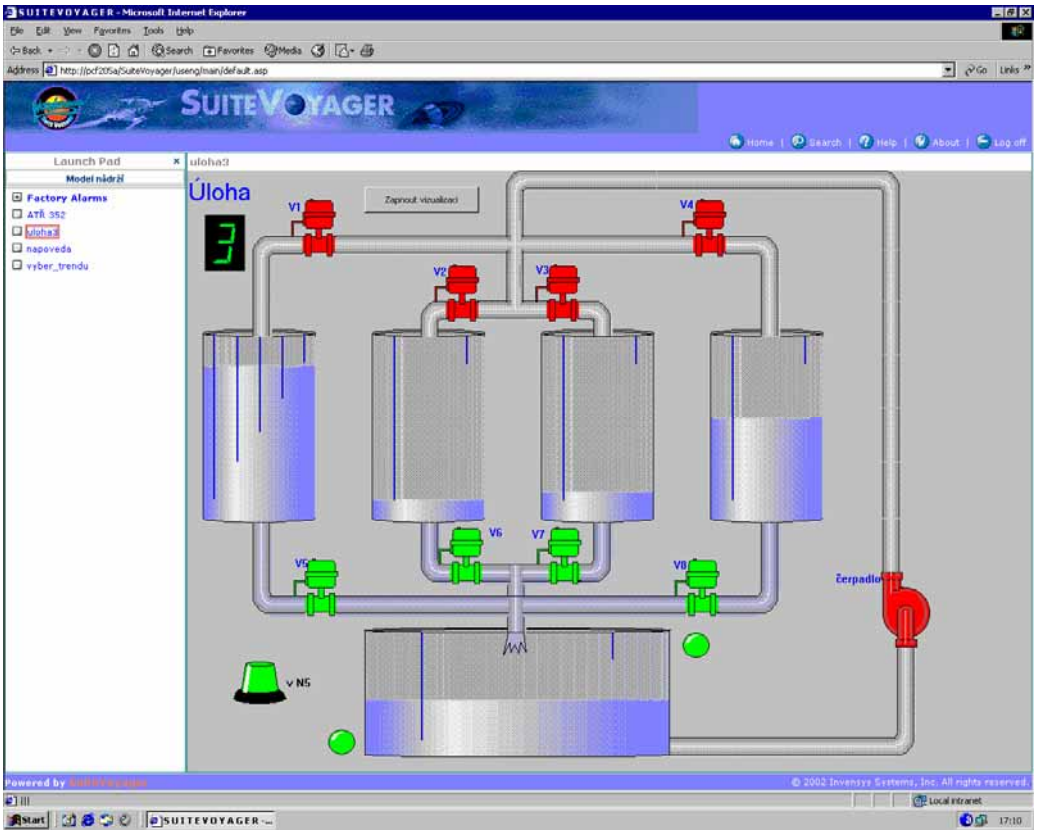
- **Řešení vizualizace dat z laboratorní úlohy do prostředí internetu**

Výrobní informační portál je prostředí, kam bývají publikována výrobní data z různých zdrojů, tj. aplikací běžících na vzdálených počítačích. Tato data pak portál vhodně organizuje, zabezpečuje a poskytuje definované skupině oprávněných klientů ze sítí Internet/intranet. Klientskou aplikací pro přístup k informacím publikovaným na portál je Microsoft Internet Explorer od verze 5.5. Klienti (uživatelé) nemusí mít na svých klientských počítačích instalován žádný speciální software (jsou to tzv. softwarově tencí klienti). Architektura systému pro pokročilé úlohy vizualizace je znázorněna na obrázku 3.125.



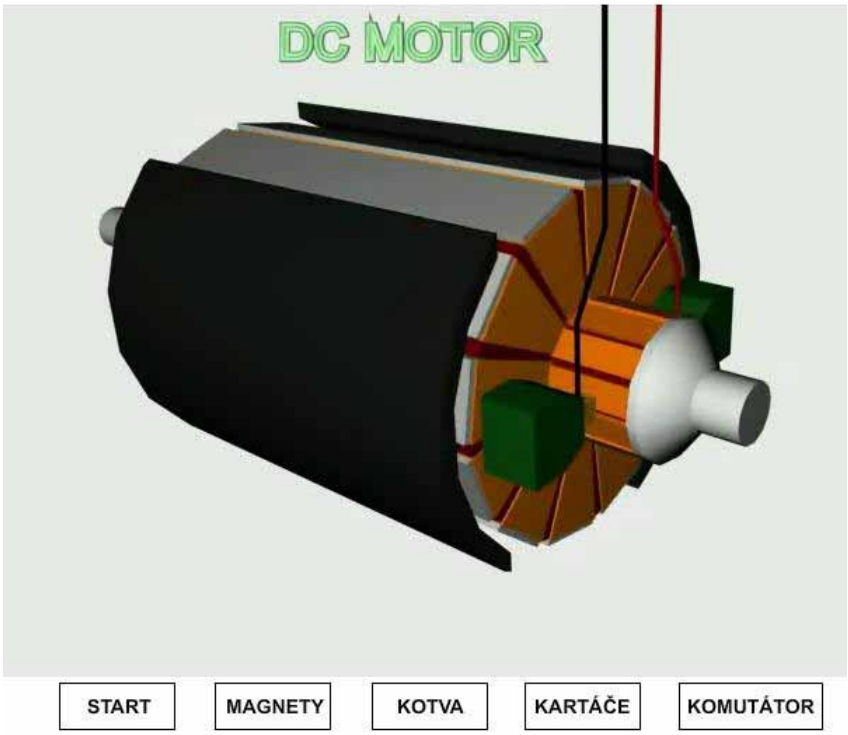
Obrázek 3.125 - Architektura systému

Vzhled aplikace v prohlížeči oprávněného klienta je vidět na obr. 3.126.

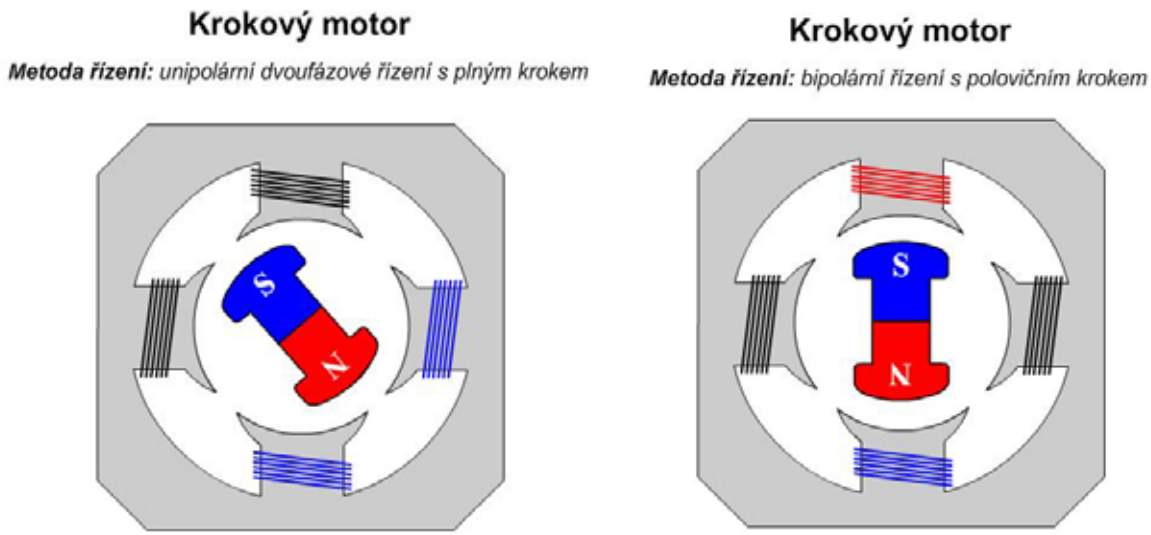


Obrázek 3.126 - Vizualizace úlohy v prohlížeči klienta

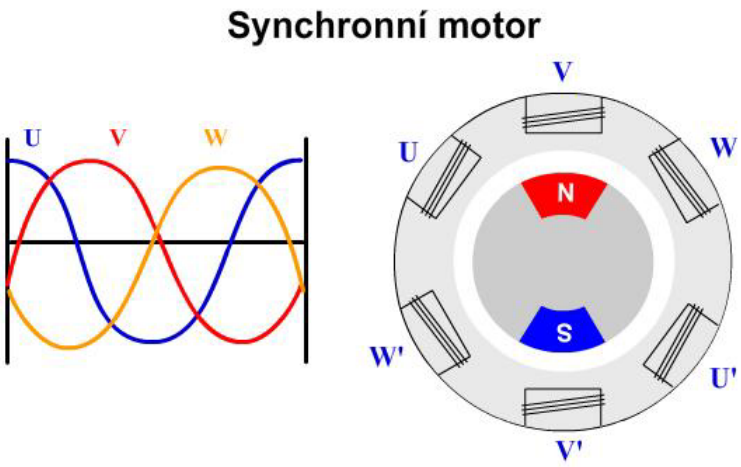
Kliknutím na následující obrázky lze spustit vytvořené animace, které vysvětlují funkci vybraných regulačních obvodů nebo akčních členů.



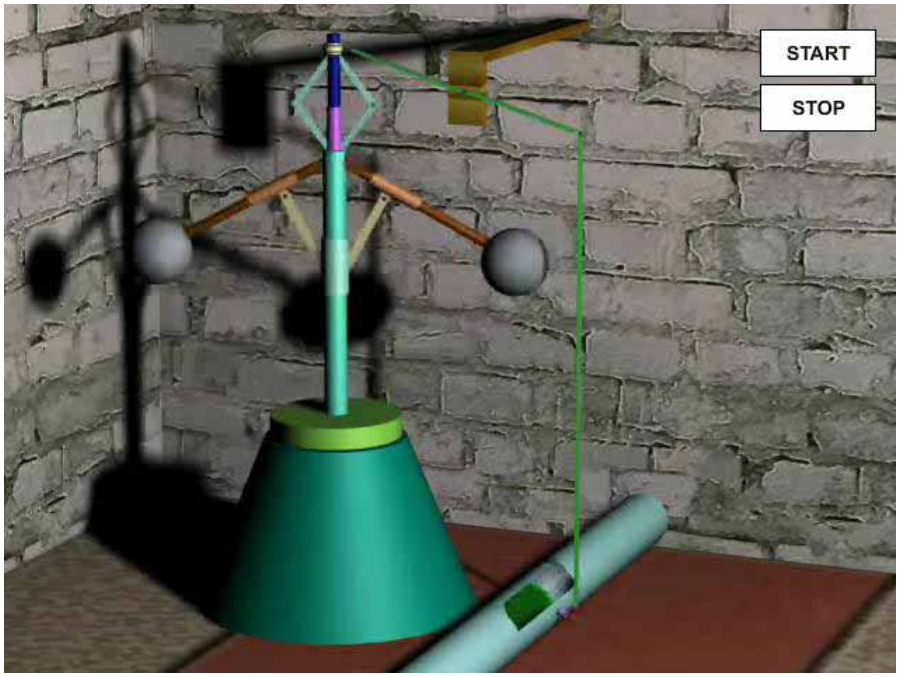
Obrázek 3.127 – Animace stejnosměrného motoru



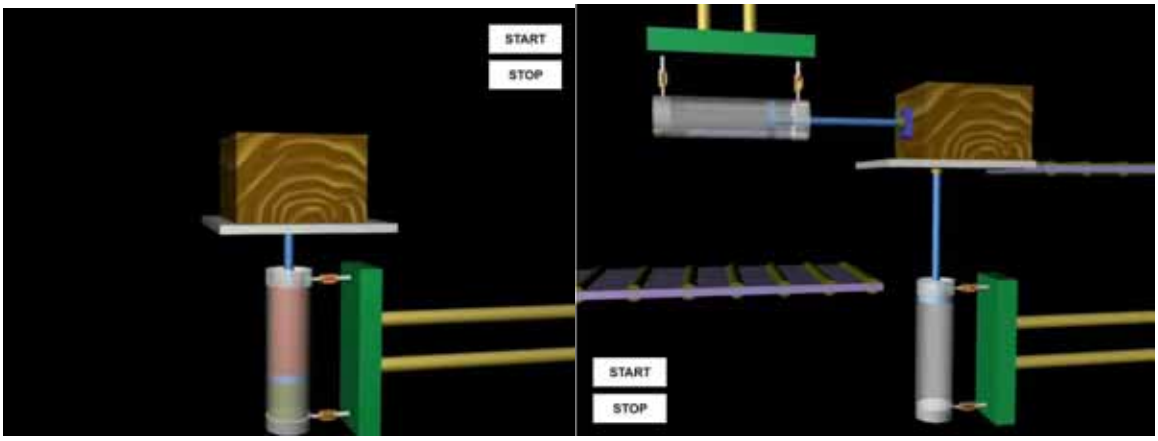
Obrázek 3.128 – Animace krokových motorů



Obrázek 3.129 – Animace synchronního motoru



Obrázek 3.130 – Animace funkce Wattova regulátoru



Obrázek 3.131 – Animace pneumatického (vlevo) a hydraulického (vpravo) polohování

Otázky 3.11.

1. Co je na nejnižším stupni hierarchické pyramidy řízení?
2. Co je v systému SCADA/HMI alarm?
3. Co jsou to historické trendy ve SCADA/HMI?

Další zdroje

[1] ORLÍKOVÁ, S. Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů. *Elektrorevue*. 2001/49. Dostupný z www: <URL:http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/>

[2] http://www-dt.fme.vutbr.cz/measure/Senzor/Cl-TerCl.htm

[3] http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k45-prut.htm

[4] VOLÁČEK, A, *Fóliové tenzometry - princip, provedení, použití, historie*. Dostupný z www: <URL:http://automatizace.hw.cz/view.php?cisloclanku=2005111201>

[5] BENEŠ, P., CHLEBNÝ, J., LANGER, J., MARTINÁSKOVÁ, J. & VORÁČEK, R *Automatizace a automatizační technika, Prostředky automatizační techniky*. Praha : Computer Press, 2000, 204 s. ISBN 80-7226-248-3.

4 APLIKACE AUTOMATIZAČNÍ TECHNIKY V TECHNICKÉ PRAXI

Čas ke studiu: 3 hodiny

Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat kaskádovou regulaci, integrační smyčkovou regulaci.
- popsat způsoby regulace teploty, dávkování směsí sypkých hmot, regulaci zásoby, řízení polohy.
- popsat řídicí jednotky automobilu a sběrnici CAN, řízení vstřikování a zapalování paliva zážehových motorů, servořízení.
- popsat použití GSM automatu pro zabezpečení „inteligentního domu“.

Výklad

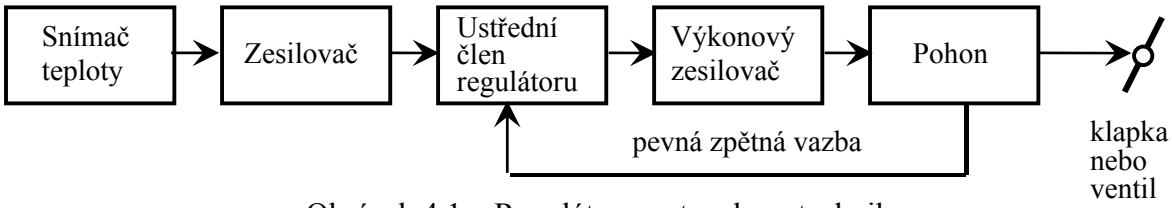
4.1. Regulace v tepelné technice

❑ Regulace teploty

Teplota se reguluje v průmyslových ohřívacích pecích, sušárnách, někdy také v topeništi, například v plynovém hořáku a v různých chemických reaktorech. Podle akčních zásahů lze regulační obvody teploty rozdělit na dvě skupiny, a to akční zásahy do průtoku topného media respektive teplonosné kapaliny a regulační zásahy změnou velikosti elektrického proudu v topném vinutí.

První skupina ovládá průtok páry nebo horké vody a nebo plynu pro hořák. Používaným prvkům se říká regulační armatury. Těmito regulačními orgány je třeba posouvat nebo jimi otáčet. Slovo regulační znamená, že zvenčí se ovládá odpor škrticího orgánu proti proudění, nejčastěji velikosti průtočného průřezu. K pohonu slouží elektrické (nebo pneumatické) servomotory buď pákové nebo přímočaré. Součástí pohonu je snímač polohy regulačního orgánu, který se může pohybovat v rozsahu 0 až 100% otevření. Elektronické obvody ústředního členu regulátoru nemohou ovládat servomotor přímo, a proto je do obvodu zařazen výkonový zesilovač s tyristory a triaky. Zesilovač musí zajistit otáčení servomotoru dvěma směry (otvírání a zavírání).

Řetězec složený z ústředního členu regulátoru, zesilovače, servomotoru a regulačního orgánu (nejčastěji klapky nebo ventilu) je uzavřen tzv. pevnou zpětnou vazbou (tradiční označení), která přenáší do ústředního členu regulátoru informaci o poloze škrtícího orgánu. Tepelné procesy jsou obvykle z hlediska rychlosti odezvy na akční zásah velmi pomalé. Regulátor je vybaven možnosti chodu v automatickém nebo ručním (manuálním) režimu. Ruční režim znamená, že operátor velínu pohybuje svými příkazy regulačním orgánem a je současně informován o jeho poloze na ukazateli, který je součástí regulátoru. Blokové schéma regulátoru pro tepelnou techniku je znázorněno na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1 – Regulátor pro tepelnou techniku

Zvláštní problematiku regulace teploty představují kotle pro výrobu obvykle přehřáté páry. Při ohřevu plynem jde o výše popsanou regulaci průtoku. Jinou možností je foukání práškového uhlí a nebo jeho dávkování na rošt. Zde se uplatňují regulovatelné podávače nebo přímo dávkovací váhy.

Přesná regulace teploty přehřáté páry se realizuje také vstřikem studené vody do vody před přehřívákem jako průtočným kotlem, což je znázorněno na schématu v obrázku 4.2. Teplota páry T_1 a horké páry T_2 se měří termočlánky. Je zřejmé, že odezva teploty páry v místě před přehřívákem na změnu skokovou změnu přídavku studené vody bude rychlejší než odezva teploty přehřáté páry na tuto akční veličinu regulačního obvodu. Ve zmíněném obrázku je různost odezev demonstrována na přechodových charakteristikách. Regulace teploty se realizuje kaskádově dvěma regulátory. První regulátor má žádanou hodnotu rovnou teplotě přehřáté páry. Výstup tohoto regulátoru představuje žádanou hodnotu teploty páry po vstřiku studené vody pro druhý regulátor, který průtok této vody reguluje. S ohledem na vyloučení trvalé regulační odchylky je první regulátor typu PI, tj. s integrační složkou, která tuto funkci zajišťuje. Druhý regulátor je typu PD. Derivační složka přispívá ke stabilite soustavy.

Průmyslové pece ohřívané elektrickým proudem mají topné vinutí z odporového materiálu (např. konstanta). Malé uhlíkové retorty jsou ohřívány přímo průchodem elektrického proudu. Při regulaci teploty se používají podle funkce dva druhy snímačů, často termočlánků nebo odporových teploměrů. Jeden, tzv. regulační snímač teploty bývá umístěn tak, že má rychlou odezvu na akční zásah. U elektricky ohřívaných pecí je situován co nejblíže topného vinutí. Druhý snímač se nazývá měřící a je umístěn do prostředí, jehož teplota se má regulovat. Záznam teploty z tohoto snímače je obvykle rozhodující pro správnou funkci regulačního obvodu.

Pro velkou setrvačnost regulované soustavy je regulace vykonávána dvouhodnotovým regulátorem (zapnuto-vypnuto). Malé proudy lze regulovat plynule. Proud pro laboratorní pece se v dávné minulosti plynule měnil magnetickými zesilovači, nyní jsou to již výhradně polovodičové prvky.

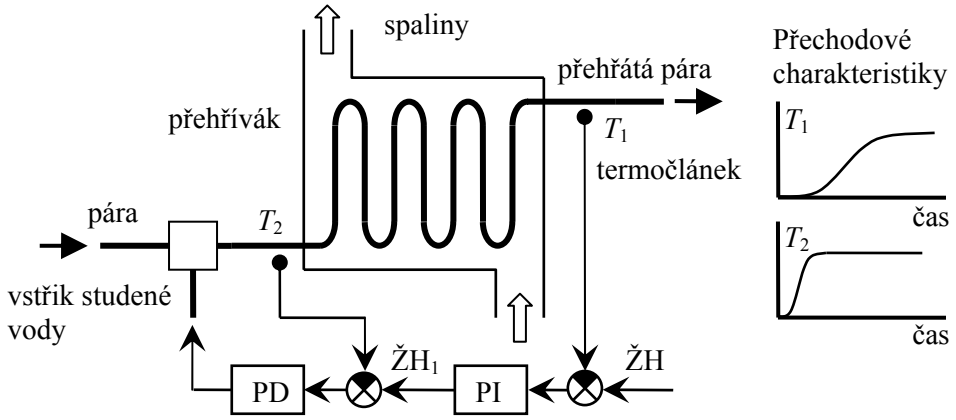
❑ Kaskádová regulace v tepelné technice

V tepelné technice je běžné, že regulovaná soustava má pomalou odezvu, tj. relativně velké dopravní zpoždění a velkou časovou konstantu, nebo řád jejího přenosu je také vyšší než je obvyklé. Po změně akční veličiny následuje velmi pomalá odezva v časovém průběhu regulované teploty. Těmto pro regulaci nevýhodným podmínkám se čelí tzv. kaskádovou regulací. V regulované soustavě se vyhledá teplota, jejíž odezva je podstatně rychlejší než odezva regulované teploty.

Příklad kaskádové regulace je ilustrován na přehříváku tlakové páry na obrázku 4.2. Znázorněný přehřívák je průtočný kotel. Teplota páry pro například turbínu je požadována velmi stálá. Kolísání teploty páry a tím i turbíny může urychlit únavu materiálu, ze kterého je vyrobena. Teplota výstupní páry se reguluje změnami průtoku studené vody, která je

vstřikována do páry před přehřívákem. Odezva na vstřik studené vody ve změně teploty páry před ohřívákem je téměř okamžitá. Součástí obrázku 4.2 jsou přechodové charakteristiky demonstrující rozdílnost odezev u obou zmíněných teplot páry na skok průtoku studené vody.

Kaskádové zapojení obsahuje dva regulátory. První regulátor reguluje teplotu páry na výstupu přehříváku. Akční veličina tohoto regulátoru je žádanou hodnotou teploty páry na vstupu do přehříváku pro druhý regulátor. Tento druhý regulátor pracuje s regulovanou veličinou, kterou je teplota páry na vstupu do přehříváku, a s akční veličinou, kterou je průtok studené vody. První regulátor musí pracovat bez trvalé regulační odchylky a proto obsahuje integrační člen. Druhý regulátor musí pracovat s co nejrychlejší odezvou a proto obsahuje derivační složku.

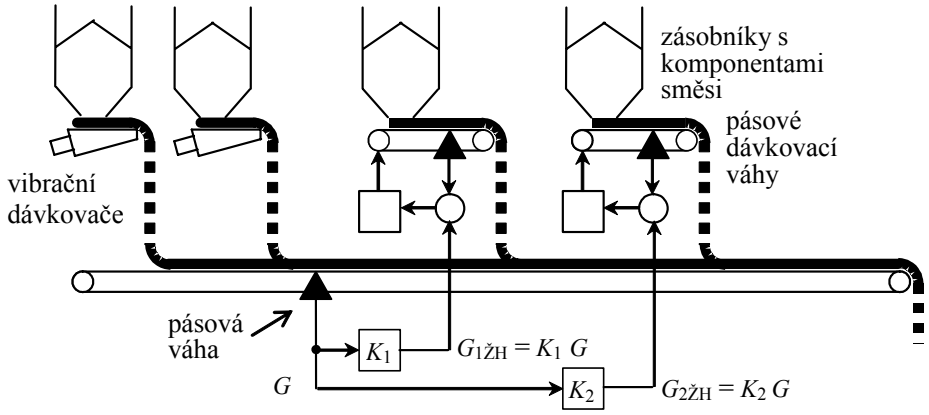


Obrázek 4.2 – Kaskádová regulace

4.2. Řízení dávkování směsi a řízení zásoby sypkých hmot

❑ Dávkování směsi sypkých hmot

Regulace průtoku sypkých hmot a materiálů má široké uplatnění při vytváření směsí nebo dodávku materiálu do technologického zařízení. Příkladem může být zavážení paliva do kotle nebo spékání aglomerátu v hutích a nebo výroba stavebních hmot. Směs lze připravovat obecně dvojím způsobem. První je jednoduché odvážení potřebné dávky, které se následně nějakým způsobem jednorázově promíchají. Toto dávkování nelze označit slovem kontinuální regulace. Druhý způsob vytváření směsi je nepřetržité a má svoje uplatnění v technologických procesech, které probíhají kontinuálně. Dávkuje se obvykle na dopravní pás, přičemž směs je dále promíchána v průtočném míchacím zařízení, například v otáčejícím se bubnu s mírně skloněnou osou, a pokračuje k dalšímu zpracování. Kontinuální dávkování vyžaduje průběžné měření průtoku směsi po dopravníku.



Obrázek 4.3 – Dávkování směsi

Uspořádání systému dávkování směsi může kombinovat použití levnějších postupů vynášení základní komponenty směsi, přičemž je měřen její celkový průtok, a k ní se regulovatelnou pásovou dávkovací váhou přidávají zbylé komponenty. Uspořádání systému řízení dávkování směsi je znázorněno na obrázku 4.3. Základní komponenta směsi se vynáší ze zásobníků na sběrná dopravní pás vibračními podávači. Hmotový průtok této komponenty G je použit k odvození žádané hodnoty pro obě pásové dávkovací váhy.

❑ Regulace zásoby

Obrázek 4.4 – Provedení snímačů zatížení

Kontinuální technologické procesy probíhají obvykle v několika stupních tak, že materiál postupuje od jednoho stupně k druhému. Mezi těmito stupni se vytváří zásoba, aby bylo možné vykrýt neplánované prostoje a kontinuita procesu v daném stupni nebyla porušena. Při výrobě aglomerátu (kovonosná vsázka pro vysoké pece po zkusovění prachových rud spékáním) je technologie výroby rozdělena do dvou stupňů a to přípravy směsi a pak spékání na spékacích pásech. Před spékacími pásy jsou mezizásobníky pro hodinu provozu spékacích pásů. Velikosti této zásoby je třeba přizpůsobit dodávku směsi ze stupně přípravy směsi.

Kriterium regulace není přesně dodržovaná hladina zaplnění, ale pouze předejití situaci, kdy se zásobníky vyprázdní nebo přeplní. Zároveň nejsou žádoucí prudké výkyvy v dodávce směsi do zmíněných mezizásobníků.

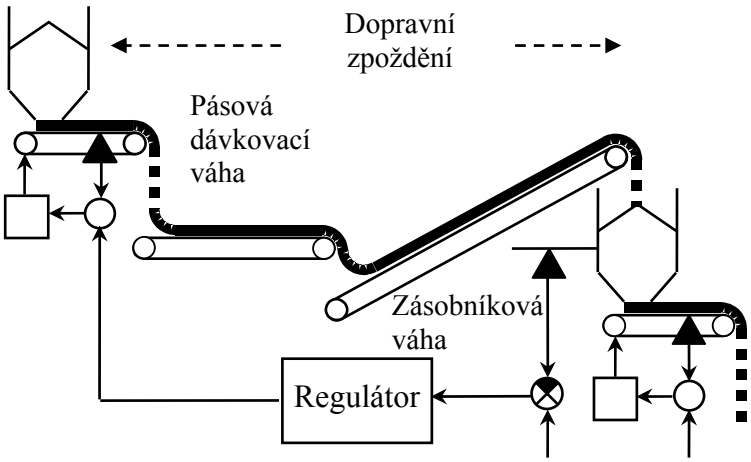
Velikost zaplnění (zásobu) je tedy třeba regulovat. K tomuto účelu je třeba průběrně znát velikost zaplnění a mít možnost ovládat výkon dávkovacího zařízení. Velikost zásoby se snímá různými snímači. Nejoblíbenější jsou tenzometrické váhy (tenzometrické krabice) s rozsahem desítek tun, na které se konstrukce zásobníku prostě umístí. Staticky určité je umístění zásobníku na tři tenzometrické krabice. S únosnou přesností lze uložit zásobník také na čtyři snímače. Měřící rozsah snímačů Schenck typu RTN je od 1 do 470 t. Při konstrukci je třeba dbát na uchycení horizontálních sil a zabránění klopení zásobníku. Ukázka snímačů a umístění tenzometrických krabic je na obrázku 4.4 a 4.5.

Dalším typem měření velikosti zásoby v zásobnících jsou kapacitní sondy založené na principu měření kapacity mezi materiálem a proměnlivě ponořenou elektrodou sondy. Jsou také čidla založena na odměřování výšky hladiny, například mechanicky (příkladem je vysoká

pec s periodicky spouštěným závažím), dobou odrazu ultrazvuku a nebo radioizotopy s čidlem sledujícím rozhraní mezi stínem a volným průchodem záření.

Hladina kapalin se snímá podobně, zvláštní předností je plochost hladiny. U kapaliny lze využít ke zjišťování výšky hladiny hydrostatickým tlakem. Podobně množství plynu v uzavřené nádobě je dáno jeho tlakem.

Obrázek 4.5 – Zásobníková váha se třemi snímači zatížení



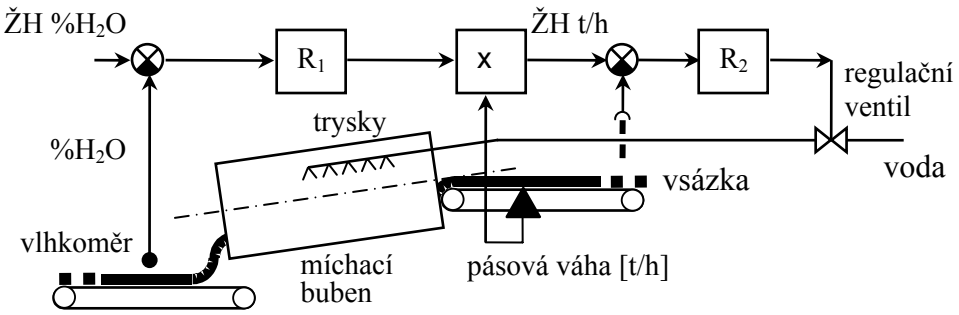
Obrázek 4.6 – Regulační obvod zásoby

Účelem regulace zásoby je vyrovnání produkce jednoho výrobního úseku s nerovnoměrností spotřeby v následujícím výrobním úseku. Charakteristickou vlastností regulované soustavy je dopravní zpoždění mezi zásobníkem a prvky ovlivňujícími velikost průtoku materiálu do zásobníku, jak je znázorněno na obrázku 4.6. Odůvodněním zpoždění jsou dopravní cesty z pásových dopravníků, které se pohybují stálou (neproměnlivou) rychlostí. Regulace rychlosti pohybu dopravníků se může jevit pro nákladnost plynule regulovaných pohonů nepřijatelná.

❑ Kontinuální regulace vlhkosti sypkých hmot

Některé technologické procesy vyžadují, aby tok vstupní suroviny obsahoval zadané procento vlhkosti. Takovou surovinou může být například aglomerační vsázka z prachové rudy, paliva a přísad. Optimální prodyšnost této směsi na spékacím páse zajistí určité procento vlhkosti. Spékací pás vyrábí aglomerát pro vysoké pece. Shodný problém může být při výrobě cementu nebo jiných stavebních hmot. Směs je přirozeně málo vlhká a navíc její vlhkost se nahodile mění. Proto se dovlhčuje v míchacím (peletizačním) bubnu, kde se při otáčení převaluje a sbaluje do pelet (kuliček). Regulační obvod dávkování vody do rozprašovacích trysek sestává ze dvou regulátorů jak je znázorněno na obrázku 4.7. První regulátor R_1 určuje akční zásah na základě rozdílu žádané hodnoty a skutečné výsledné vlhkosti. Vlhkost se měří kontinuálně například na principu pohlcování infračerveného záření nebo pohlcování neutronů. Výstup regulátoru R_1 je ve významu dodané vlhkosti v procentech. Násobením tohoto procenta hmotnostním průtokem vsázky se dostane hmotnostní průtok vody do trysek uvnitř míchacího bubnu. Regulátor R_2 tento požadovaný průtok vody reguluje změnami otevření ventilu.

Vzájemné propojení regulačních obvodů je označováno jako vlečná regulace. Ve srovnání s kaskádovou regulací se jedná o shodné zapojení. Z důvodu zvyklostí se používá název vlečná regulace.



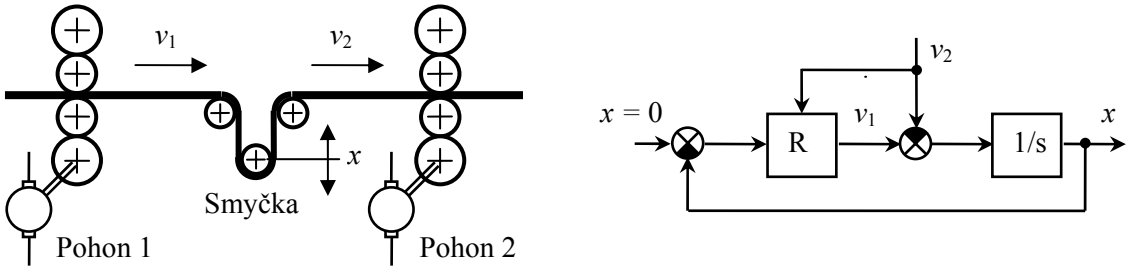
Obrázek 4.7 – Vlečná regulace

❑ Integrační smyčková regulace

Tento způsob uspořádání regulačního obvodu je používán v případech, kdy je zapotřebí synchronizovat otáčky dvou různých zařízení. Příkladem může být pohon navíjecího bubnu přičemž drát nebo pás je podáván svou vlastní rychlosti. Je evidentní, že průměr cívky se při navíjení mění, což vyžaduje přizpůsobení otáček navíjecího bubnu. Jiným příkladem je papírenský stroj, u kterého se předává pás papíru od jedné dvojice válců k jiné dvojici válců, přičemž každá dvojice válců má vlastní pohon. Nedokonalým řešením regulace pohonu by bylo společné zadání otáček oběma regulátorům nebo odvození žádané hodnoty otáček druhého regulátoru od skutečných otáček prvního regulátoru. I sebemenší chyba v měření otáček by vedla k integrování jejich rozdílu a posléze k roztržení pásu papíru nebo naopak k jeho havarijnímu nakupení mezi válci.

Tomuto jevů se čelí vložením smyčky, jejíž délka se reguluje změnou rychlosti pohybu jednoho z pohonů. Na obrázku 4.8 je uspořádání obvodu integrální smyčkové regulace. Vlevo je znázorněn regulovaný objekt s válci, dvěma pohony a vloženou smyčkou. Pohon 2 je řízen nezávisle na pohonu 1. Tento pohon určuje rychlost pohybu pásu v_2. Délka smyčky x je výsledkem integrace (symbolicky 1/s) rozdílu rychlostí v_1 a v_2. Regulátor R určuje otáčky pohonu 1 a tím i rychlost v_1. Rychlost v_2 je měřenou poruchou a představuje pro regulátor R přímou vazbu. Regulační odchylkou je velikost prodloužení nebo zkrácení smyčky x od nulové polohy.

.

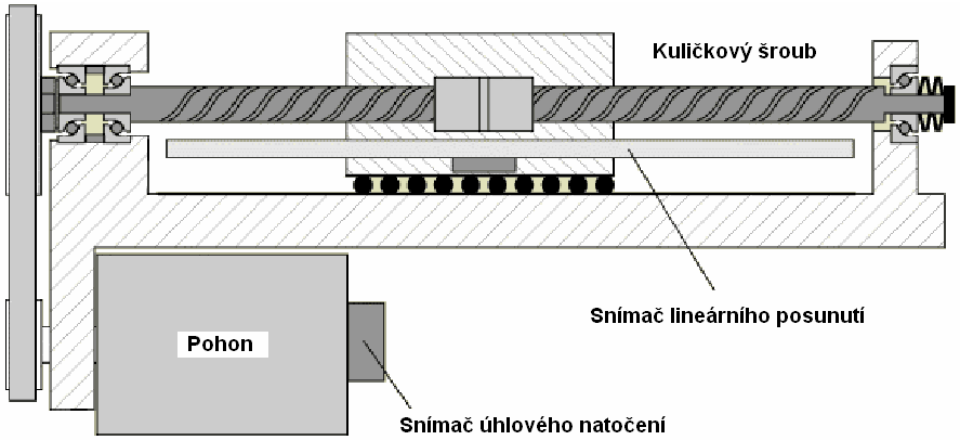


Obrázek 4.8 – Integrační smyčková regulace

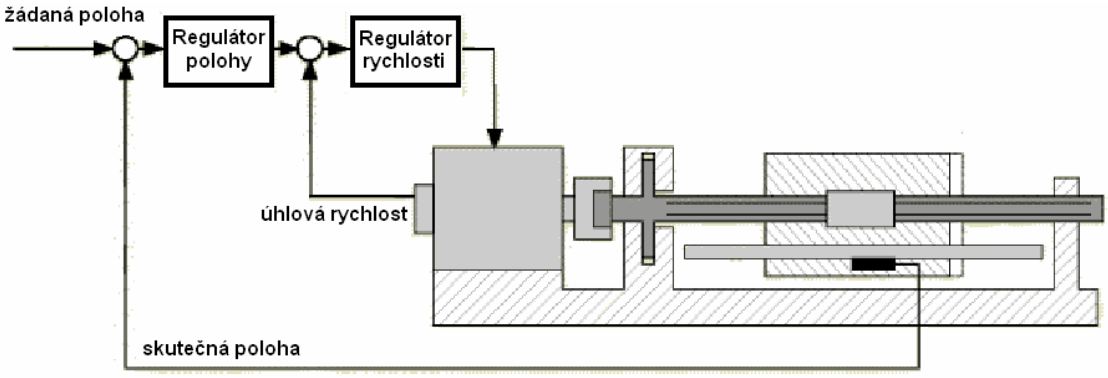
4.3. Řízení polohy

Nejpřesnější systémy řízení polohy mají uplatnění pro řízení posuvů obráběcích strojů. Dalším požadavkem je velký rozsah rychlostí pohybů v závislosti na tom, zda se obráběcí nástroj jen přesouvá nebo je v záběru. Tyto požadavky plní kombinací krokového motoru a kuličkového šroubu (posuvy) nebo harmonické převodovky (otočení). Jak již bylo zmíněno, odměřování

polohy je dvojí: přímé a nepřímé. Příklad tohoto uspořádání je na obrázku 4.9. Snímač úhlového natočení na pohonu odměřuje polohu stolu s obrobkem nepřímo a lineární snímač odměřuje tuto polohu přímo.



Obrázek 4.9 – Typické uspořádání pohonu pro posuvný pohyb obráběcího stroje

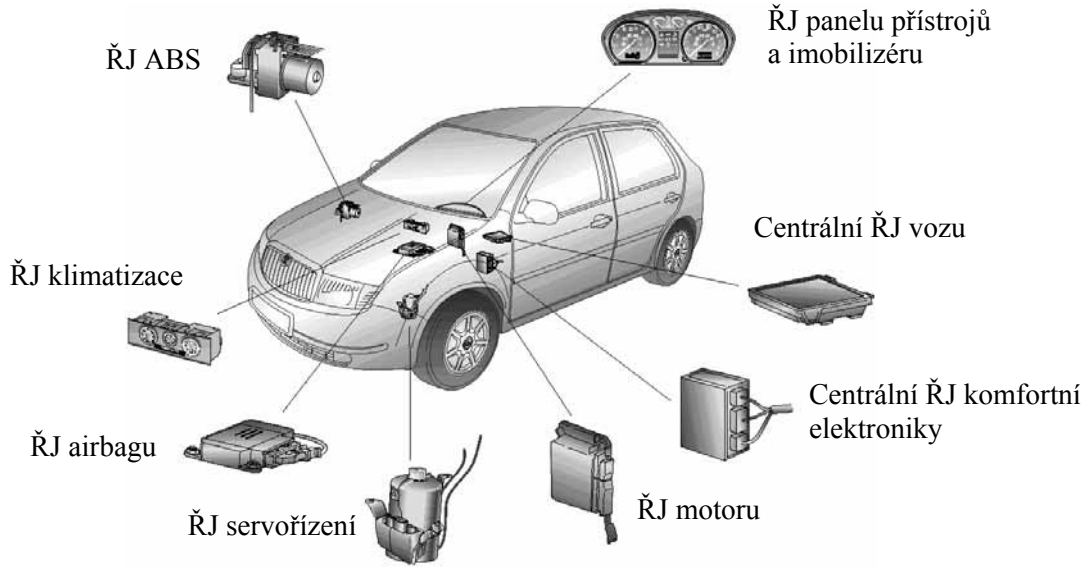


Obrázek 4.10 – Zapojení regulačního obvodu posunu s vnitřní rychlostní zpětnou vazbou

Blokové schéma systému řízení polohy u obráběcího stroje je znázorněno na obrázku 4.10. Obvod obsahuje zpětnou vazbu od rychlosti pohybu k regulátoru rychlosti a zpětnou vazbu od polohy s vlastním polohovým regulátorem. Akční veličina polohového regulátoru je žádanou hodnotou rychlostního regulátoru. Okamžitá rychlost pohybu je odvozena od frekvence impulsního signálu snímajícího úhel natočení poháněcího motoru.

4.4. Soubor řídicích jednotek automobilu a sběrnice CAN

Následující příklady jsou vybrány tak, aby byly blízké profesi strojního inženýra. Například moderní osobní automobil obsahuje řadu řídicích jednotek s mikropočítači, které plní koordinovaně různé funkce. Mikropočítače nepředstavují izolované uzly, ale vzájemně komunikují prostřednictvím sběrnice CAN (Control Network Area), která byla navržena firmou Bosch. Ukázka vybavení automobilů je na obrázku 4.11.



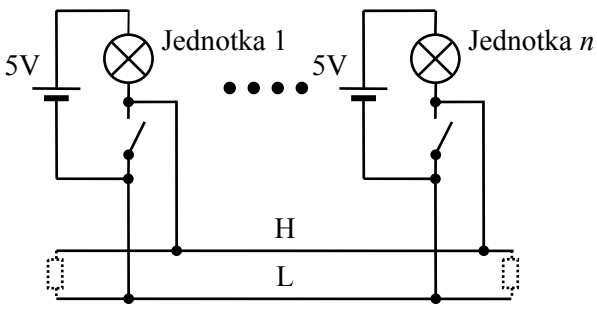
Obrázek 4.11 – Řídicí jednotky (ŘJ) u vozidel ŠKODA

Sběrnice CAN představují dva zkroucené vodiče, které mají označení L a H. Protože jsou po sběrnici posílány vysokofrekvenční impulsy, je vedení zakončeno odporem o velikosti jeho charakteristického odporu, aby nevznikaly odrazy vysokofrekvenčního vlnění a tak nebyly zkreslovány impulsní signály. Princip sběrnice CAN lze demonstrovat na schématu na obrázku 4.12, ve kterém jsou použity jen spínače a žárovky. Pro jednu řídicí jednotku je to obvod s jednou žárovkou, zdrojem a spínačem. Tyto spínače od všech jednotek jsou prostřednictvím sběrnice spojeny paralelně. Ve skutečnosti je spínání bezkontaktní a stav žárovky představuje logickou proměnnou řídicí jednotky, avšak vedení sběrnice je shodné. Jestliže jsou všechny spínače rozepnuty (zakončovací odpory pro jednoduchost zanedbáme), pak je na sběrnici +5V, tj. plné napětí a žádná žárovka nesvítí. Jestliže jedna jednotka svůj spínač sepne, pak se napětí na sběrnici sníží na nulu a hlavně, všechny ostatní jednotky se o tom dovědí, protože jejich žárovky se rozsvítí. Aby na sběrnici nevznikl chaos, jsou stanovena pravidla, tzv. datový protokol, podle kterých se jednotlivé jednotky řídí.

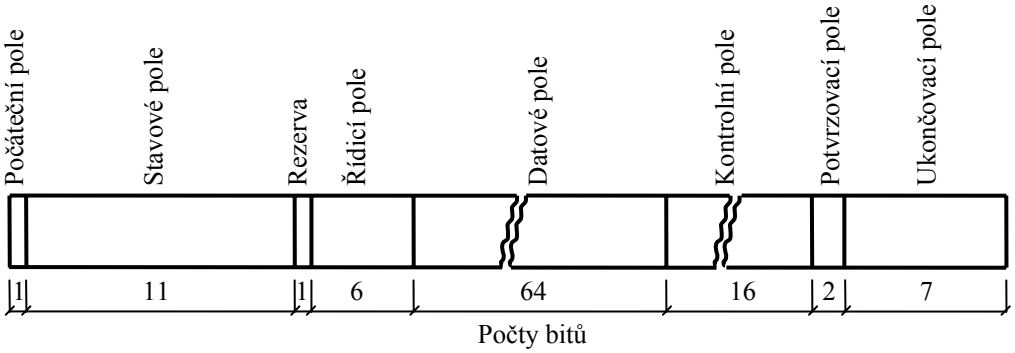
Sepnutí a rozepnutí kontaktu představuje informaci jednoho bitu. Samozřejmě, že je třeba přenést bohatší informaci o více bitech, proto jsou bity sdruženy do zprávy, tzv. datového rámce (Data Frame) s určitým uspořádáním. Jejich délka není stejná a závisí na délce jedné částí datového rámce, která obsahuje tzv. datové pole. Obsah datového rámce je na obrázku 4.13.

Datový rámec se skládá ze sedmi polí:

- počáteční pole (1 bit)
- stavové pole (11 bitů)
- řídicí pole (6 bitů)
- datové pole (maximálně 64 bitů)
- kontrolní pole (16 bitů)
- potvrzovací pole (2 bity)
- ukončovací pole (7 bitů)



Obrázek 4.12 – Princip funkce sběrnice CAN



Obrázek 4.13 – Datový rámec (Data Frame)

Počáteční pole - Start of Frame označuje počátek datového přenosu.

Stavové pole - Arbitration Field obsahuje informaci o prioritě datového přenosu, tj. stanovuje, která jednotka má při vysílání zpráva přednost. Zároveň je ve stavovém poli informace o obsahu zprávy, například, že se jedná o otáčky motoru.

Řídicí pole - Control Field obsahuje jako kód počet informací, které jsou obsaženy v datovém poli.

Datové pole - Data Field přenáší informace důležité pro ostatní jednotky, které zprávu přijmou. Délka zprávy je až 64 bitů a je členěna po bajtech sdružujících 8 bitů.

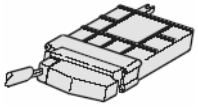
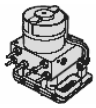
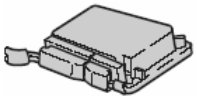
Kontrolní pole - CRC Field (CRC = Cyclical Redundancy Check) slouží ke zjišťování chyb v přenosu. Kontrola se provádí metodou cyklického výpočtu kontrolního kódu.

Potvrzovací pole - ACK Field (ACK = Acknowledgement). V tomto poli potvrzuje příjemce zprávy jejímu odesilateli, že zpráva byla přijata bez chyb. Jestliže se však zjistí chyba, pak je to odesilateli zprávy sděleno a dochází k opakování vysílání zprávy.

Ukončovací pole (End of Frame). V tomto poli kontroluje vysílač svůj datový protokol a potvrdí objektu, který zprávu vyslal, zda je v pořádku. Jestliže není, dojde okamžitě k přerušení a opakovanému zahájení přenosu. Tím je datový přenos protokolu ukončen.

Jestliže chce více jednotek vysílat a sběrnice je volná, je třeba rozhodnout, která z nich má přednost, tj. vyšší prioritu než jiná jednotka. Z důvodu bezpečnosti bude jistě potřebné dát přednost zprávě z jednotky ABS nebo ABS s EDS před zprávou z automatické převodovky. Rozhodnutí o prioritě je na základě srovnání bitů ze stavového pole. Každá jednotka ví, zda pomyslný spínač sepnula (logická nula na sběrnici) a nebo nesepnula, a také ví, v jaké poloze má svůj spínač. Ty jednotky, které spínač samy sepnuly mají vyšší prioritu než jednotka, která spínač nesepnula a takto by umožnila nechat na sběrnici logickou jedničku. Jednotka vysílající bit jednotkový, tj. bez priority, na některém z 11 bitů stavového poli, přičemž na sběrnici je logická nula, přestane okamžitě vysílat a začne pasivně přijímat bity, které vysílají jednotky s vyšší prioritou. Po srovnání všech bitů stavového zbude jednotka s nejvyšší prioritou. Diagram dokumentující výše popsaný postup je v tabulce 4.1.

Tabulka 4.1 – Seznam čidel na motoru

		Start of Frame	Arbitration Field = 11 bit				
			Bit 1	Bit 2	Bit 3		
Řídicí jednotka automatické převodovky		0	1				...
Řídicí jednotka ABS nebo ABS a EDS		0	0	0	1	0	...
Řídicí jednotka motoru Motronic		0	0	1			...
Vodiče datové sběrnice		0	0	0	1	0	...

4.5. Řízení vstřikování a zapalování paliva zážehových motorů

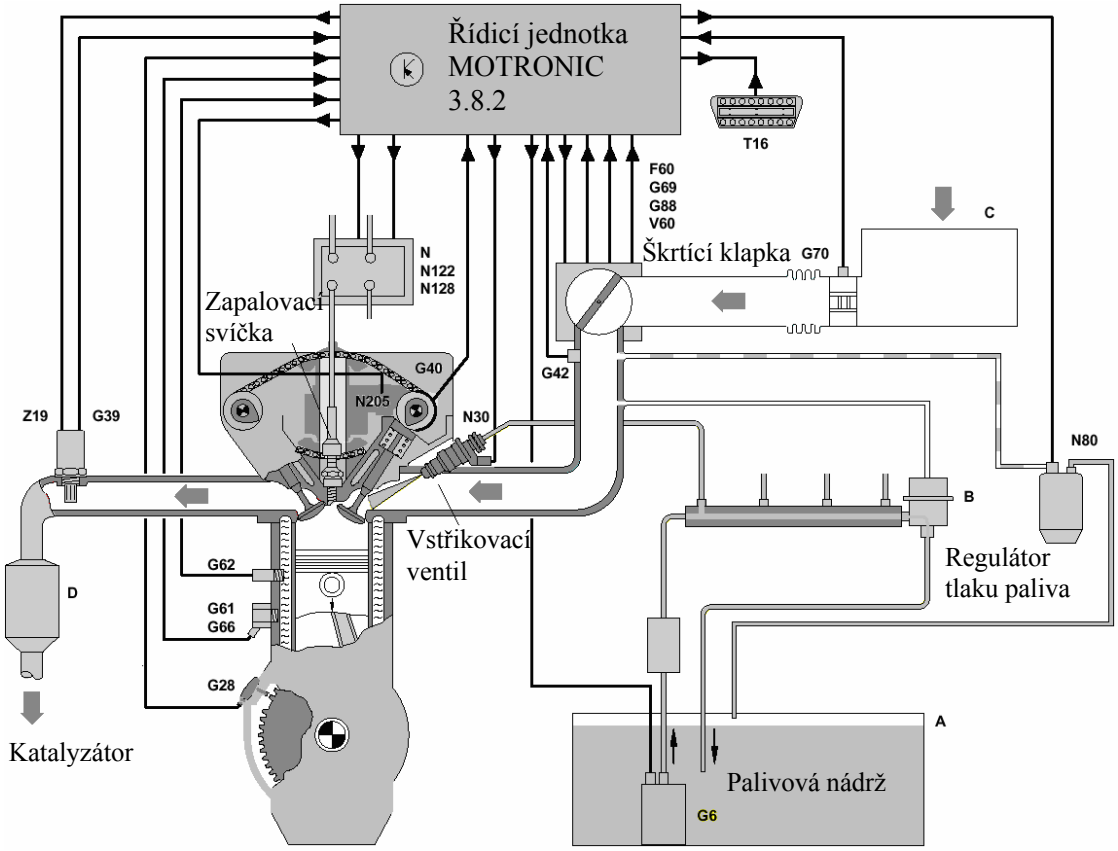
Jako příklad aplikace řídicí jednotky motoru je vybrán benzinový motor vozidla ŠKODA OCTAVIA 1,8 l s označením AGN o výkonu 92 kW. Jedná se o řadový čtyřválec s pěti ventily na válec, jeho dvě vačkové hřídele jsou umístěny v hlavě válce. U tohoto motoru je použita řídicí jednotka Bosch Motronic 3.8.2 se sekvenčním vstřikováním a datovým polem řízeným zapalování s regulací klepání každého válce. Účinnost spalování je řízena podle údajů lambda sondy. Způsob řízení podle datového pole se rozumí nastavování hodnot parametrů podle tabulky v závislosti na jednom nebo více parametrech, obvykle měřených, které určují okamžitý stav motoru (teplota, otáčky). Schéma zapojení je na obrázku 4.14.

Jak každý motorista ví, řidič určuje výkon motoru stupněm sešlápnutí plynového pedálu. Tímto způsobem je uzavřen prostřednictvím rozhodovací funkce řidiče regulační obvod rychlosti vozidla. U starších automobilů byl pedál mechanicky spojen s klapkou v karburátoru. U dále popisovaného systému toto mechanické spojení chybí. Poloha pedálu je přenesena do řídicí jednotky motoru, která škrtící klapku nastaví do požadované polohy pomocí servomotoru samočinně. K přestavování je přirozeně využita zpětná vazba od skutečné polohy škrtící klapky. Poloha klapky určuje průtok vzduchu do motoru. Úměrně průtoku vzduchu je vstřikovačem dávkováno palivo. Množství vstřikovaného paliva je řiditelné dobou otevření vstřikovacích ventilů. Poměr průtoku paliva k průtoku vzduchu je ovlivňován dalšími parametry. Chladný motor například vyžaduje více paliva. Účinnost spalování je kontrolována lambda sondou, což je snímač přebytku nebo kyslíku ve výfukových plynech. Lambda-sonda porovnává koncentraci zbytkového kyslíku ve výfukových plynech s koncentrací kyslíku v referenčním vzduchu (výfukové plyny se porovnávají s okolním vzduchem, protože vnitřek lambda-sondy je otvorem spojen s okolní atmosférou). Lambda-sonda pracuje jako tzv. „dvoubodová“ sonda s reléovou charakteristikou. Ukazuje jen, zda je ve výfukových plynech směs bohatá ($\lambda < 1$), nebo chudá ($\lambda > 1$). Ke své funkci se musí sonda ohřát integrovaným ohřevem na teplotu aspoň 350 ^{0}C. Na rozdíl od dvoubodové lambda sondy lineární sonda ukazuje stupeň přebytku kyslíku spojitě.

V celém systému řízení motoru existuje jediná trvalá zpětná vazba a to od lambda-sondy. Řídicí jednotka však realizuje množství vazeb mezi veličinami, které se jen z částí

dříve dařilo vytvořit mechanickým spojením, jako bylo například ovlivňování předstihu zapálení od podtlaku v sacím potrubí.

Volitelně lze využít funkce pro řízení rychlosti vozidla, kdy další uzavřený regulační obvod přebírá funkci automatického ovládání plynového pedálu podle odchylky mezi požadovanou a skutečnou rychlosti vozidla (tempomat) obvykle jen pro nejvyšší převodový stupeň.



Obrázek 4.14 – Řízení vstřikování a zapalování paliva motoru 1,8 l AGN u vozidel ŠKODA OCTAVIA

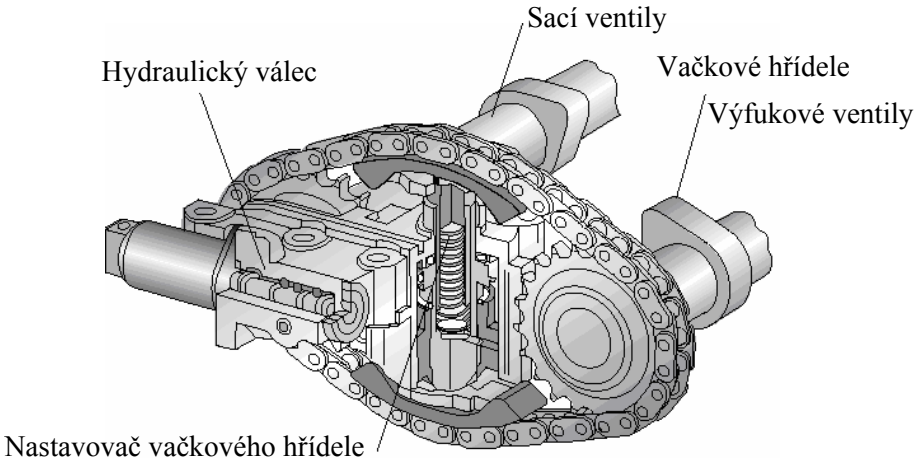
Mezi technické znaky systému sběru informací pro funkci řídicí jednotky patří

- měření polohy klikového hřídele na základě impulsů snímače G28, které jsou odvozeny z 60 rovnoměrně rozložených zubů na jednu otáčku, přičemž dva zuby jsou odfrézovány a tato mezera v řadě impulsů slouží k indikaci (s předstihem) dosažení horní úvratě válců
- rozpoznání fáze motoru v dvojotáčkovém cyklu podle údaje Hallového snímače G40 na hlavě válce motoru pro snímání polohy sacího vačkového hřídele (jeden impuls za otáčku).

Soupis ostatních čidel je uveden v tabulce 4.2. Pamětníci vědí, že jediným snímačem na motoru byl dříve snímač tlaku oleje a na karburátoru někdy pomocný elektrický ventil. Zapalovací soustava (přerušovač, rozdělovač a svíčky) byla dříve také velmi jednoduchá a umožňovala jen podtlakovou regulaci předstihu zapalování. Zmíněná tabulka dokládá pokrok techniky a potřebu interdisciplinární kvalifikace inženýra strojaře v oblasti řídicí techniky.

Tabulka 4.2 – Seznam čidel na motoru

Snímač	Popis funkce	Snímač	Popis funkce
F60	koncový spínač volnoběžných otáček	N	zapalovací cívka 1
G88	potenciometr škrtící klapky pro řízení volnoběhu	N80	elektromagnetický ventil nádobky s aktivním uhlím
G69	potenciometr škrtící klapky	N122	koncový výkonový stupeň I
G6	palivové čerpadlo	N128	zapalovací cívka 2
V60	nastavovač škrtící klapky	N192	koncový výkonový stupeň 2
G39	Lambda sonda	G28	snímač otáček motoru
G40	Hallův snímač otáček	G62	čidlo teploty chladicí kapaliny
G42	čidlo teploty nasávaného vzduchu	G70	snímač množství nasávaného vzduchu
G61	snímač klepání (I)	J338	jednotka ovládání škrticí klapky
G66	snímač klepání (II)	RTP	regulátor tlaku paliva
J220	řídicí jednotka motoru Motronic 3.8.2	N205	elektromagnetický ventil nastavování vačkového hřídele
Z19	Ohřev lambda sondy	T16	připojení diagnostiky
N30 až 33	Vstřikovací ventily		



Obrázek 4.15 – Zařízení ke změně časování ventilů

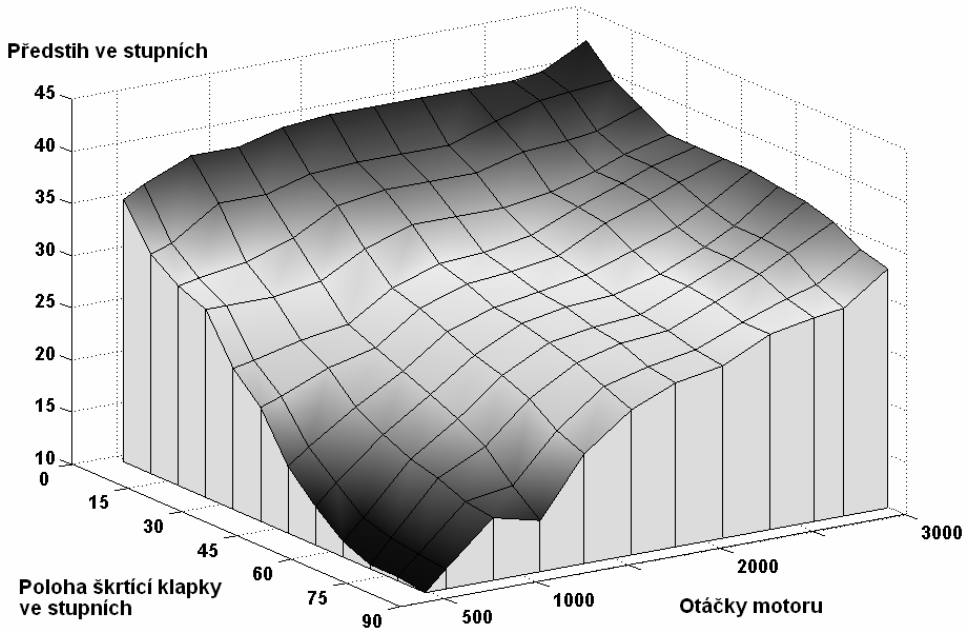
Charakteristika motoru (závislost kroutícího momentu na otáčkách) se ovlivňuje proměnlivým časováním rozvodu. Proto je motor opatřen nastavovacím zařízením (obrázek 4.15) pro sací vačkový hřídel, které je řízeno datovým polem, což umožní žádoucím způsobem ovlivňovat charakteristiku motoru. Vačkový hřídel sacích ventilů a vačkový hřídel

výfukových ventilů leží vedle sebe. Vačkový hřídel výfukových ventilů je poháněn ozubeným řemenem od klikového hřídele. Vačkový hřídel sacích ventilů je poháněn od vačkového hřídele výfukových ventilů pomocí řetězu. Řetěz je napínán nastavovačem vačkového hřídele. Ke změně časování dojde přesunutím bodu obratu řetězu ve svislém směru. Tím se zároveň natočí vačkový hřídel sacích ventilů. Nastavovač (aktuátor) je ovládán elektricky řízeným hydraulickým válcem, který je umístěn v nastavovači vačkového hřídele. Ventil je řízen podle zmíněného datového pole prostřednictvím elektromagnetického ventilu.

Řídicí jednotka je výkonný mikropočítač, který zpracovává údaje z několika čidel, které ovlivňují jak zapalování paliva tak jeho vstřikování. Pro funkci zapalování je v paměti mikropočítače uloženo datové pole určující okamžik zapálení paliva (úhel předstihu před horní úvratí pístu). Základní předstih je určen otáčkami motoru a některým parametrem charakterizujícím průtok vzduchu. Může to být otevření škrtící klapky, nebo sací podtlak a nebo přímo měřený průtok vzduchu. Ukázka datového pole pro určení základního předstihu je ve formě 3D grafu na obrázku 4.16. Velikost předstihu je dále korigována podle teploty motoru a teploty nasávaného vzduchu.

Výčet funkcí řídicí jednotky při řízení sekvenčního vstřikování

- základní nastavení pomocí datového pole
- řízení startu motoru
- obohacování směsi při opakovaném startu, při startu teplého motoru a při zrychlení vozidla
- odpojování vstřiku paliva při deceleraci vozidla
- omezování maximálních otáček
- lambda-regulace (adaptační dílčí systém)



Obrázek 4.16 – Závislost základního předstihu na otáčkách motoru a poloze škrtící klapky

Funkce při řízení zapalování

- základní nastavení pomocí datového pole
- řízení úhlu pro uzavírání sacích a výfukových ventilů
- korekce běhu teplého motoru
- řízení startu
- stabilizace volnoběhu
- regulace klepání každého válce zvlášť (adaptační dílčí systém).

Funkce pro odvětrávání palivové nádrže

- řízeno datovým polem,
- korigováno pomocí lambda-regulace

Vlastní diagnostika

- sledování snímačů, čidel a nastavovacích členů
- ukládání závad do paměti, čtení uložených závad
- diagnóza akčních členů a výstup naměřených hodnot
- nouzová funkce.

Efekt automatického řízení vstřikování paliva a jeho zapálení systémem Motronic 3.8.2 spočívá ve

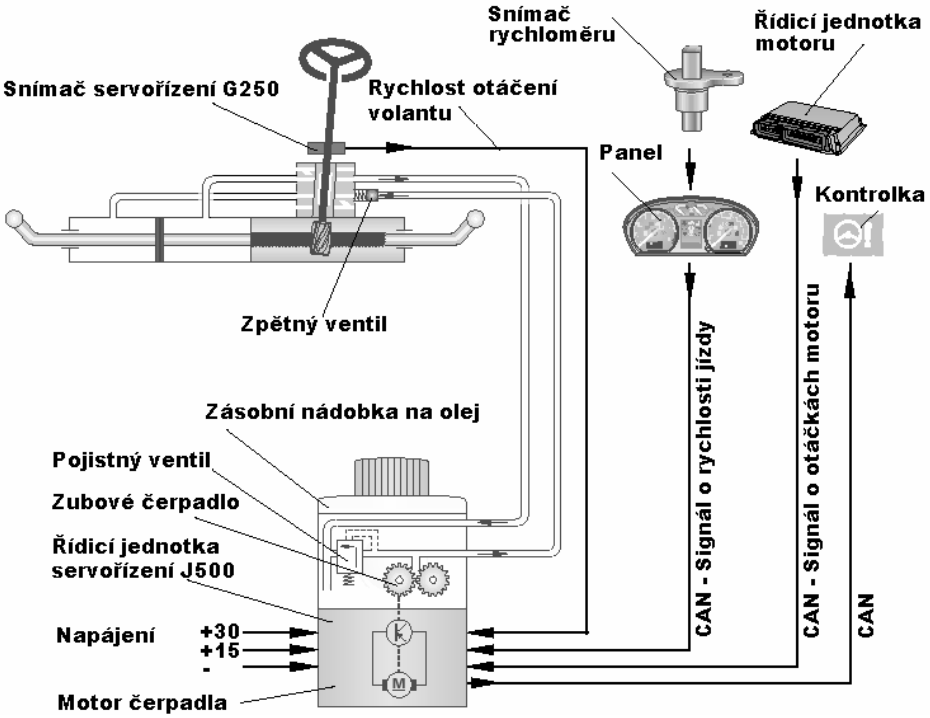
- snížení obsahu škodlivin ve výfukových plynech díky optimalizaci vstřikovaného množství paliva a okamžiku zapálení směsi a lambda-regulaci
- snížení spotřeby paliva
- neměnnosti charakteristiky zapalování v průběhu provozu
- zjednodušení údržby zapalovacího systému, která spočívá pouze ve výměně zapalovacích svíček po 60 000 km.

4.6. Elektrohydraulické servořízení

U starých automobilů se natočení volantu přenášelo na natočení kol přední nápravy automobilu prostřednictvím převodky řízení, která posouvala jedním ramenem lichoběžníku zajišťujícího správný úhel natočení kol při jízdě vozidla zatáčkou. K usnadnění řízení, zvláště automobilů s předním náhonem, byl zkonstruován posilovač řízení (Power Assisted Steering). V případě, kdy je použita hydraulika a elektronika, je systém označován jako EPHS (Electrically Powered Hydraulic Steering). Konstrukce posilovače musí umožnit řízení směru pohybu vozidla také při jeho poruše.

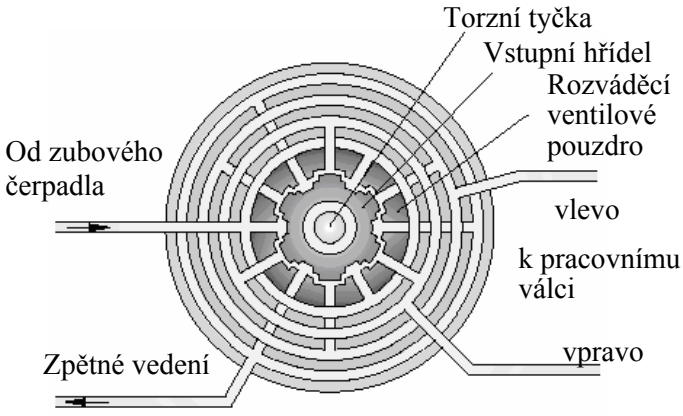
Nejnovější řešení posilovače řízení, jehož komplexní schéma je znázorněno na obrázku 4.17, pracuje se signálem rychlosti otáčení volantem a podle této rychlosti je upravován výkon elektrického motorku, který pohání zubové čerpadlo oleje nezávisle na otáčkách motoru. Výhodou tohoto řešení je to, že posilovací účinek je vysoký, i když otáčky motoru jsou jen volnoběžné. Čím rychleji se volantem otáčí, tím je k dispozici větší tlak oleje. Tato vazba slábne z důvodu bezpečnosti při zvyšování rychlosti vozidla, aby se znesnadnila rychlá změna směru jízdy při vysokých rychlostech.

Akční člen posilovače je přímočarý hydraulický motor, jehož pístnice je napojena na tyč s hřebenovým ozubením. Tlakový olej je do posilovače přiváděn přes rozváděcí ventilové pouzdro, které je znázorněno na obrázcích 4.18 a 4.19. Vstupní hřídel posilovače (od volantu) je s tímto rozváděcím pouzdrem a s pastorkem, který zabírá s hřebenovým ozubením, propojen přes torzní tyčku. V nehybné poloze volantu je tlak oleje na obou stranách pístu shodný, torzní tyčka a rozváděcí ventilové pouzdro jsou v neutrální poloze.

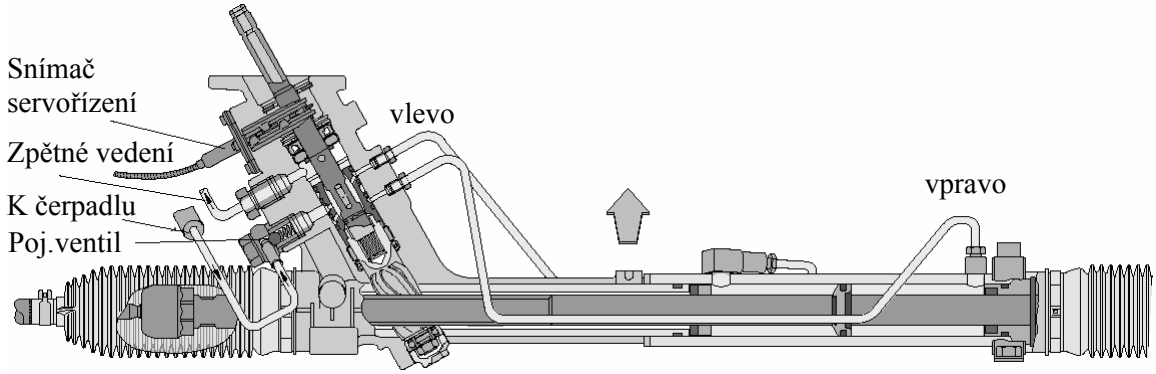


Obrázek 4.17 – Posilovač řízení – funkční schéma

Vychýlení volantu nebo vnější síla, působící na kola řízené nápravy, vyvolá natočení torzní tyčky úměrně velikosti krouticího momentu a také přerozdělení toku oleje mezi hranami rozváděcího ventilového pouzdra a vstupního hřídele tak, aby se vzájemné natočení torzní tyčky a rozváděcího ventilového pouzdra dostalo opět do neutrální polohy při daném natočení volantu. Hrany rozváděcího pouzdra a vstupního hřídele umožňují trvalou cirkulaci oleje.



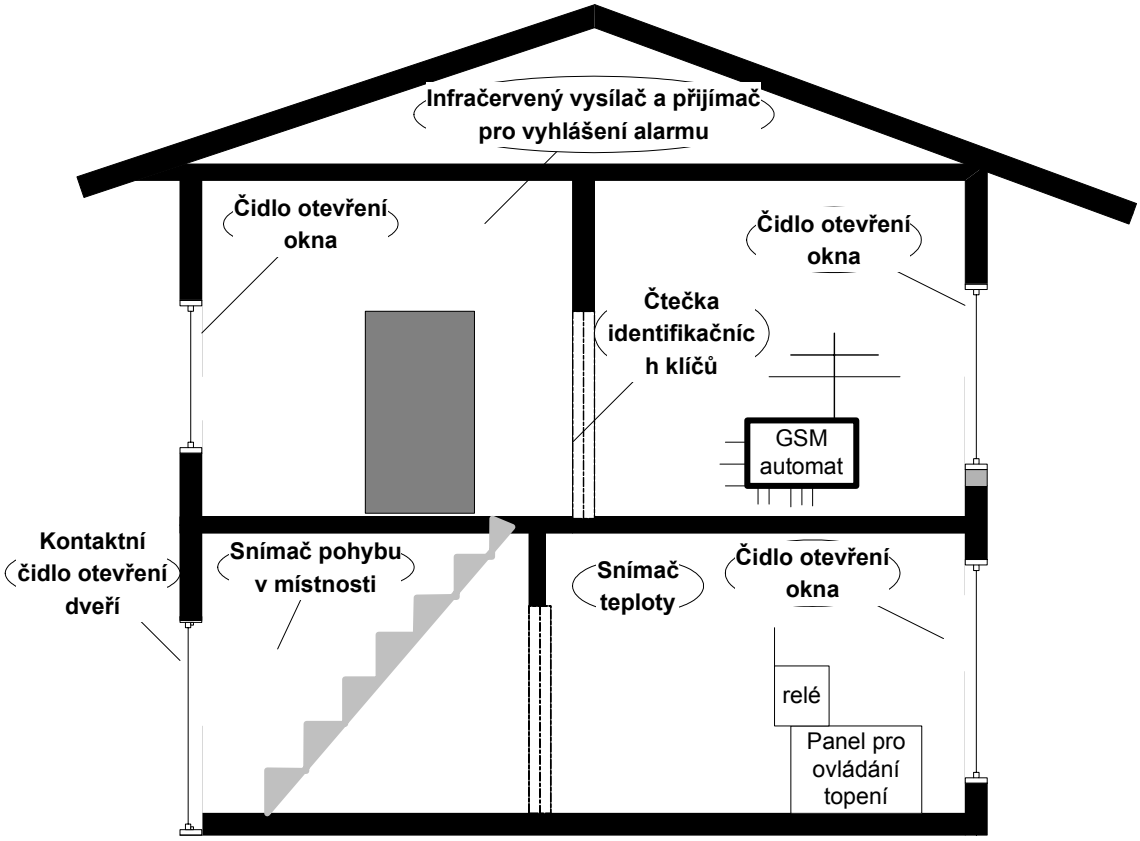
Obrázek 4.18 – Schéma hydraulického řídicího ventilu



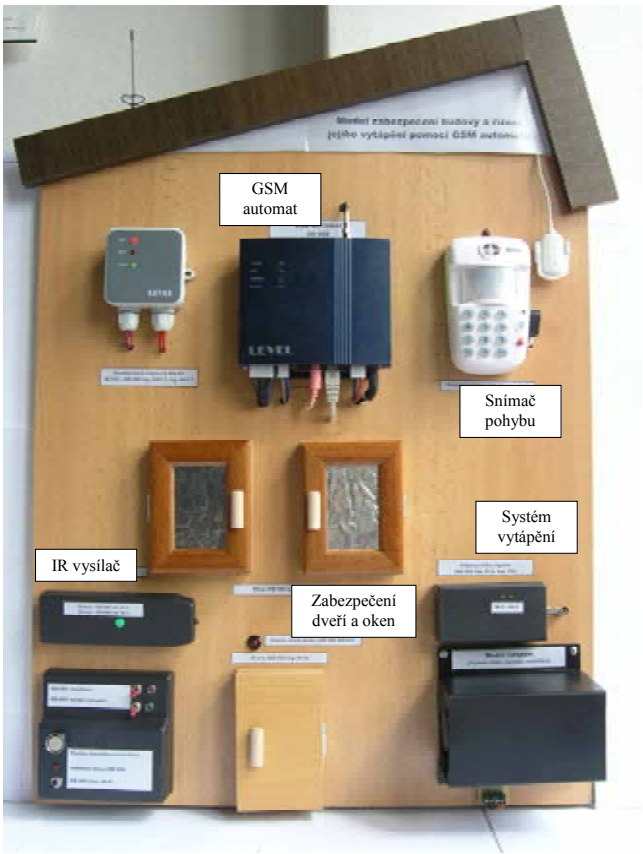
Obrázek 4.19 – Posilovač řízení – konstrukční provedení

4.7. Inteligentní dům

Pod tímto označením si jistě každý představí něco jiného. Opustíme-li však oblast literatury Scifi (Science fiction), označujeme jako „inteligentní dům“ stavbu vybavenou řízením distribuce všech energií, včetně vytápění, osvětlení, klimatizace, obvykle také doplněné o bezpečnostní systémy, případně také záznam příchodů a odchodů osob. Pro realizaci v rodinných domech se v současnosti velmi často doplňují systémy řízení také o možnost vzdáleného dohledu a ovládání využívající bezdrátové komunikační sítě, nejčastěji GSM (Global System for Mobile Communications, globální systém pro mobilní komunikaci). Jako vhodný nástroj může použít kompaktní GSM automat [2], který sdružuje komunikační systém s nástroji logického automatu včetně možnosti měření technologických veličin generování akčních zásahů k řízení těchto procesů.



Obrázek 4.20 – Rozmístění prvků zabezpečení „inteligentního domu“



Ke zjišťování stavu domu, nastavování požadovaných hodnot technologických veličin a naopak pro hlášení o narušení objektu apod. se využívají specializované zprávy SMS (Short Message Service, krátká textová zpráva), s jejich pomocí je například možné dálkově nastavit požadovanou teplotu vytápění.

Na obrázku 4.20 je zobrazen návrh rozmístění jednotlivých prvků systému v rodinném domě [1]. Sdružuje tyto hlavní části:

- systém řízení vytápění s možností dálkového nastavení požadované teploty,
- zabezpečení objektu proti vniknutí okny a dveřmi, doplněný o snímač pohybu ve vstupní hale a čtečku identifikačních klíčů pro zapínání a vypínání zabezpečení,
- infračervený vysílač a přijímač

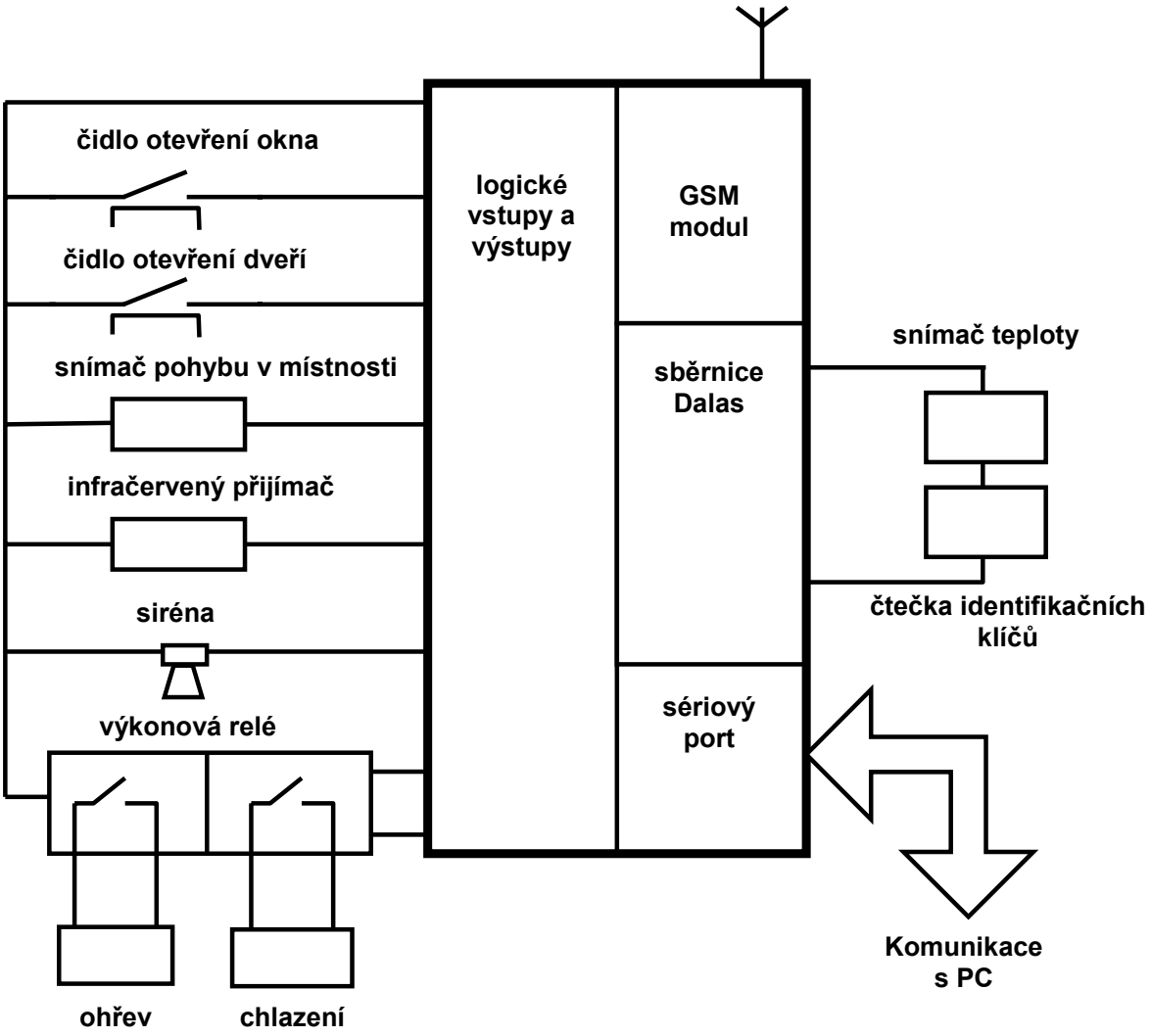
Obrázek 4.21 – Model „inteligentního domu“

pro vyhlášení alarmu, například pro použití handicapovanou osobou žijící v domě k přivolání pomoci.

Funkčnost navrženého systému je možné si ověřit na modelu v laboratořích katedry ATŘ, který obsahuje všechny popsané funkční prvky, viz obrázek 4.21.

Schéma zapojení jednotlivých prvků, napojení jednotlivých snímačů a akčních členů systému je ukázáno na obrázku 4.22.

K programování GSM automatu se používá moderní přístup založený na obsluze událostí jako je například změna hodnoty logického vstupu, příchod řídicí SMS, ale také činnosti odvozené od interního časovače, prováděné v nastavených okamžicích vzorkování. Například reakcí automatu na příchod signálu o otevření okna může být zahájení telefonního volání na určené číslo nebo odeslání SMS určeného textu, aktivace některé skupiny činností nebo aktivace některého výstupu automatu, například spuštění sirény. Skládáním a zřetězením těchto jednoduchých akcí je pak možno vytvořit celý řídicí algoritmus pro zajištění veškerých služeb systému.



Obrázek 4.22 – Schéma zapojení prvků systému

Otázky 4.1.

1. Co znamená kaskádová regulace?
2. Co je charakteristická vlastnost regulované soustavy v případě regulace zásob?
3. Kdy se používá smyčková regulace?
4. Co je akční člen posilovače řízení?
5. Lze při použití GSM automatu dálkově nastavit např. požadovanou teplotu vytápění?

Další zdroje

[1] BEMBENEK, P. 2004. *Řešení bezpečnostního systému pomocí GSM automatu*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2004. 78 s. Diplomová práce, vedoucí: Farana, R.

[2] LEVEL s.r.o. 2006 *Firemní informační systém*. [on-line]. HTML formát [cit. 2006-08-31]. Dostupný z www: <URL: http://www.levelna.cz>.

[3] Školící manuály firmy Škoda Auto a.s.

[4] VOBECKÝ, J. & ZÁHLAVA, V. *Elektronika. Součástky a obvody, principy a příklady.* (2 rozšířené vydání). Praha : Grada Publishing, 2001, 192 str. ISBN 80-7169-884-9.

Klíč k řešení

Odpovědi na otázky.

O 1.2 Odpověď na otázky 1.2.

O 1.1. 1. Co je to logické řízení?

Dvoustavové řízení, zapnuto – vypnuto.

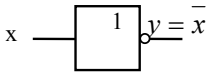
2. Jak je definována logická funkce?

Jako přiřazení dvouhodnotové proměnné y ke kombinacím hodnot nezávislých logických proměnných $x_1, x_2, \ldots x_n$.

3. Co je to NAND a NOR?

Negovaný součin a negovaný součet.

4. Jak vypadá značka negace NOT?



5. Na co se používá Boolova algebra?

K minimalizaci logické funkce.

6. Jak vypadají De Morganovy zákony?

$\overline{a+b} = \bar{a} \cdot \bar{b} \quad \overline{a \cdot b} = \bar{a} + \bar{b}$

7. Můžeme v Karanughově mapě sdružovat 3 políčka?

Ne.

8. Může obsahovat Karnaughova mapa nedefinované hodnoty?

Ano.

9. Muže být logická funkce zadána slovně?

Ano.

10. Pomocí jakých vyjádření můžeme vypsat logickou funkci z pravdivostní tabulky?

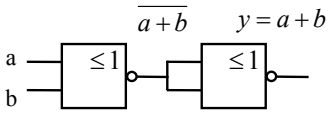
úplná disjunktní normální forma a úplná konjunktivní normální forma

O1.2 1. Jak se zapojuje logický součin pomocí kontaktních prvků?

2. Dá se kombinační logický obvod zapojit pomocí dvoustopého hradla NAND?

Ano.

3. Jak se zapojuje logický součet pomocí hradel NOR?



O1.3 1. Co je to sekvenční logická funkce?

Výstupní proměnné závisí nejen na momentální kombinaci vstupních proměnných, ale také na dosaženém stavu, který bývá určen kombinací vnitřních logických proměnných.

2. Co obsahují sekvenční logické obvody?

Paměťové prvky.

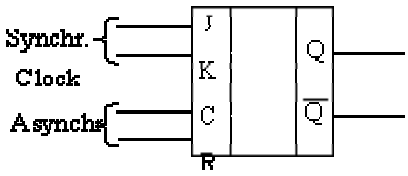
O1.4 1. Kolik mají stavů klopné obvody?

Dva stavy.

2. Kdy se klopí výstup KO typu D?

Jen když je na vstup D přivedena logická jednotka.

3. Jakého obvodu je značka na obrázku?



Klopný obvod J-K.

O1.5 1. Z čeho se skládá čítač?

Z několika klopných obvodů.

O1.6 1. Jak se označuje počáteční krok v sekvenčním diagramu?

Dvojitým orámováním bloku.

2. Jak se liší způsoby větvení AND a OR?

Při větvení AND přechází aktivní krok do všech větví diagramu, kdežto u větvení OR se vykonává posloupnost jen v jedné větvi.

O1.7 1. Co patří mezi stavební prvky logického řízení?

Relé, logické obvody, programovatelné logické automaty.

2. Co jsou to programovatelné logické automaty?

Jsou to programovatelné řídicí systémy specializované na úlohy převážně logického typu.

3. Co je to PLC v modulárním provedení?

Programovatelný logický automat, který se dá spojovat do větších a složitějších celků.

4. Jaké vstupy a výstupy obsahují PLC?

Binární a analogové.

5. Jaké jazyky používáme k programování PLC?

Jazyk mnemokódů, jazyk kontaktních schémat, jazyk logických schémat, jazyk strukturovaného textu.

O2.1 1. Co je to prvek?

Prvek je již dále nedělitelná část systému při dané rozlišovací schopnosti.

2. Co je to vazba?

Přenáší informace z prvku na prvek nebo mezi systémem a okolím systému.

3. Co je to nestacionární systém?

Systém, jehož tvar matematického popisu se v čase mění.

4. Co je to dynamický systém?

Systém, jehož chování se v čase mění.

O2.2 1. Jaká funkce je obraz funkce u Laplaceovy transformace?

Racionálně lomená funkce.

2. Jak zní vlastnost Laplaceovy transformace pro n-tou derivaci?

$$L\left\{f^{(n)}(t)\right\} = s^n F(s) - s^{n-1} f(0) - s^{n-2} f'(0) - \ldots - f^{n-1}(0)$$

3. Jaké typy rovnic se dají pomocí Laplaceovy transformace výhodně řešit?

Lineární diferenciální rovnice

O2.3 1. Definujte statickou charakteristiku.

Závislost výstupní veličiny na vstupní v ustáleném stavu (stavu, kdy hodnoty vstupu i výstupu jsou konstantní).

2. Kterými charakteristikami lze popsat dynamické vlastnosti systémů?

Přechová, impulsní a kmitočtová charakteristika.

3. Jak je definován přenos?

Podíl L obrazu výstupní veličiny k L obrazu vstupní veličiny při nulových počátečních podmínkách.

4. Co je to Diracův impuls?

$\delta(t)$ je vstupní signál, který se jeví jako nekonečně krátký impuls o nekonečně velké amplitudě, jehož plocha je rovna jedné a Laplaceův obraz se rovněž roven jedné.

5. Čím se nahradí komplexní proměnná *s* ve vzorci pro kmitočtový přenos?

$J\omega$

O2.4 1. V jakých hodnotách se počítá s reálným kmitočtem?

Interval $(0,\infty)$

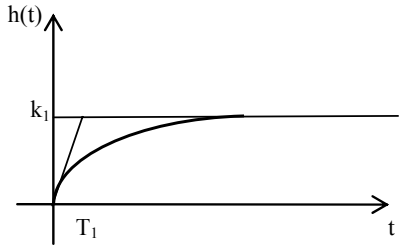
2. Kolik dB odpovídá zesílení 10?

20 dB

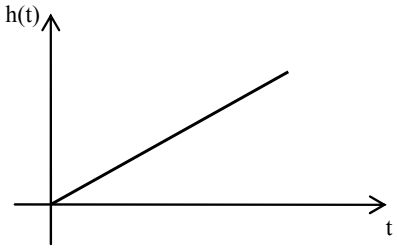
3. Jak se vykreslí LKCH pro systémy v sériovém zapojení?

Výsledné LKCH jsou dány součtem dílčích LKCH.

O.2.5 1. Jak vypadá přechodová charakteristika setrvačného článku s časovou konstantou T_1?



2. Nakreslete přechodovou charakteristiku integračního článku.



3. Uveďte příklad ideálního derivačního systému.

Neexistuje

4. Jaká je ustálená hodnota přechodové charakteristiky pro derivační systémy?

Nulová hodnota.

5. V jaké hodnotě začíná amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika proporcionálního systému?

Na kladné reálné poloose.

6. Lze vytknout proměnnou *s* v čitateli přenosu integračních systémů?

Nelze.

O2.6 1. Z čeho se skládá regulační obvod?

Regulátor a regulovaná soustava, popř. měřicí člen.

2. Co je to regulovaná veličina?

Veličina, jejíž hodnota je výstupem z regulované soustavy a jež se regulací udržuje na požadované hodnotě.

3. Co je to akční veličina?

Je výstupní veličinou regulátoru, která je vstupní veličinou regulované soustavy.

4. Jak se spočítá náhradní přenos paralelně zapojených soustav?

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = G_1(s) + G_2(s)$$

6. Jak se vypočítá odchylkový přenos řízení?

$$G_{ew}(s) = \frac{E(s)}{W(s)} = \frac{1}{1 + G_O(s)}$$

5. Co obsahují číslicové regulační obvody navíc než analogové?

A/Č a Č/A převodníky.

O2.7 1. Co to je stabilita?

Vlastnost systémů definovaná jako schopnost dosáhnout rovnovážného stavu po odeznění vstupních sil, způsobujících nerovnováhu.

2. S čím je svázáno jméno Nyquist?

S kmitočtovým kritériem stability.

3. Která kritéria stability patří mezi algebraická?

Hurwitzovo, Rothovo-Shurovo.

4. Jak určíme charakteristický mnohočlen regulačního obvodu popsaného přenosem otevřené smyčky?

Sečteme jmenovatel ačitatel přenosu.

O2.8 1. Existují regulátory typu PD?

Ano.

2. Co je to pásmo proporcionality?

$$PP = \frac{1}{k_p} 100\%$$

3. Jaké jsou stavitelné parametry PID regulátoru?

Zesílení *kp*, integrační časová konstanta T_I a derivační časová konstanta T_D.

4. Napište zkratky pro regulátory odvozené od typu PID?

P, I, PI, PD, PIDi

5. Existuje regulátor typu D?

Ne.

6. Ustálí se regulovaná veličina v regulačním obvodu s nespojitým regulátorem?

Neustálí.

7. Jak se realizují analogové regulátory?

Pomocí operačních zesilovačů.

O2.9

1. Vznikne trvalá regulační odchylka v regulačním obvodu bez integrátoru a se skokem polohy žádané hodnoty?

Ano.

2. K čemu slouží integrální kritéria?

K vyčíslení regulační plochy.

3. Jak se určí doba regulace?

Doba, kdy se regulovaná veličina dostane do okolí 2δ žádané hodnoty a už ho neopustí

O2.10

1. Jak se jmenuje metoda seřízení regulátoru, která byla odvozena na katedře ATŘ - 352?

Metoda požadovaného modelu.

2. Jaké označení má experimentální postup seřizování regulačních obvodů?

Metody Ziegler-Nichols.

3. Co je to kritické zesílení?

Zesílení regulátoru, které přivede regulační obvod na kmitavou mez stability.

4. Jak vypočteme vzorkovací periodu?

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

O3.1

1. Z čeho se skládá analogový regulační obvod?

Regulátor, regulovaná soustava, měřící člen.

2. Čím se liší analogový regulační obvod od diskrétního?

Navíc musí obsahovat A/Č a Č/A převodníky.

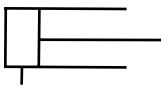
O3.2

1. K čemu se používají rozvaděče?

Ventily umožňující řízení směru průtoku, případně jeho přehrazení.

2. Jaká je značka pro zásobník stlačeného vzduchu?

3. Jaká je značka pro jednočinný pneumatický válec?



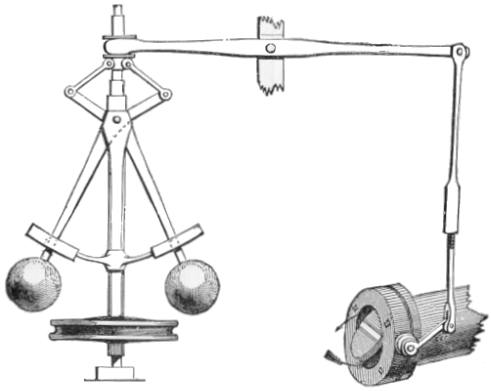
O3.3 1. Jaké zesílení má operační zesilovač? Velké, střední, malé.

Velké.

2. Kde se používá operační zesilovač?

K realizaci analogových PID regulátorů.

3. Jak se jmenuje regulátor na obrázku?



Wattův rozběžník.

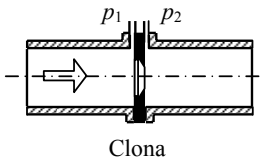
O3.4 1. Základní princip pneumatických regulátorů? Tryska + ?

Tryska+klapka

2. Používají se operační zesilovače u pneumatických regulátorů?

Ano.

O3.5 1. Kde se umístí na potrubí clona pro měření průtoku?



2. Lze umístit na potrubí clona pro měření průtoku do kolena?

Ne.

3. Co se používá nejčastěji pro měření do teploty do 300 °C?

Platinové odporové teploměry Pt 100

4. Při regulaci sypkých hmot a materiálů se používá odrazové desky. Jaký je její princip?

Principem měření je úměra síly vyvozená změnou směru toku materiálu.

O3.6 1. K čemu je kuličkový šroub?

Kuličkové šrouby slouží k převedení rotačního pohybu na přímočarý.

2. K čemu slouží harmonická převodovka?

Jsou zvlášť vhodné pro aplikace vyžadující velké převodové poměry mezi motorem a poháněným zařízením prostřednictvím jednoho převodového stupně.

3. K čemu slouží žaluzie?

K regulaci průtoku vzduchu a plynu.

4. Jaká je podmínka správné funkce klapky?

Vhodná tlaková ztráta při otevřené poloze.

O.3.7 1. Které motory se zapojují do hvězdy a trojúhelníka?

Střídavé třífázové asynchronní motory, stejnosměrné motory, krokové motory.

2. Co je to asynchronní motor?

Má statorové vinutí pro třífázové napájení složené ze tří statorových cívek.

3. K čemu se používá střídač nebo měnič frekvence?

Měnitelnost otáček u asynchronního třífázového motoru.

4. Co je to krokový motor a kde se použije?

Krokové motory jsou motory, u kterých můžeme měnit jeho natočení. Nejsou jen pro otáčivý pohyb, ale také pro lineární posunutí.

5. Jak se liší řízený usměrňovač od střídače?

Řízený usměrňovač mění střídavý proud na stejnosměrný a střídač mění stejnosměrný proud na střídavý.

6. Jakým zdrojem elektrického proudu se napájí stejnosměrný elektrický motor?

Řízeným usměrňovačem, který převádí střídavé napětí na stejnosměrné.

7. Co je to synchronní motor?

Otáčky a frekvence napájecího napětí jsou synchronní nezávisle na zatížení motoru.

8. Které elektrické motory se otáčejí stejně rychle jako točivé magnetické pole, které vybudí statorové cívky?

Synchronní.

O3.8 1. Co je charakteristika čerpadla?

Závislost průtoku pracovní kapaliny čerpadlem na jeho výstupním tlaku.

2. Jak se liší uzavřený a otevřený hydraulické obvody?

Otevřený obvod – olej se shromažďuje v nádobě, odkud se čerpá zpět. Uzavřený – mají uzavřený oběh.

3. Mohou pneumatické pohony pracovat v prostředí s nebezpečím výbuchu?

Ano.

4. Které pohony přenášejí vyšší výkony, pneumatické nebo hydraulické?

Hydraulické.

O3.9 1. Jaký je nejčastěji používaný piezoelektrický materiál?

Keramika PZT.

2. Jaké veličiny tvoří charakteristiku aktuátoru?

Závislost síly a protažení s parametrem elektrické napětí.

3. Uveďte tři příklady aplikace piezoaktuátorů.

Reproduktory, pohybové ústrojí zrcadel laserů, vstřikování paliva, inkoustové tiskárny.

O3.10

1. Co je to IP adresa na internetu?

Skládá se ze čtyř 8 bitových čísel. Musí být jedinečná v celé internetové síti.

2. Co je to LAN?

Počítačová síť, hlavně v budovách.

3. Vyjmenujte vrstvy komunikačního protokolu.

Fyzická, spojová, síťová, transportní, relační, prezentační, aplikační.

4. K čemu se používá rozbočovač-hub?

Zajišťuje větvení signálů.

O3.11

1. Co je na nejnižším stupni hierarchické pyramidy řízení?

Proces, stroj, technika, energie, materiál, technologie.

2. Co je v systému SCADA/HMI alarm?

Typ zprávy, kdy dojde k nějakému překročení hodnot.

3. Co jsou to historické trendy ve SCADA/HMI?

Pomáhají operátorovi v řízení procesu, hlavně při monitorování průběhu minulých a žádaných veličin.

O4.1

1. Co znamená kaskádová regulace?

Regulace, kdy máme více regulačních smyček.

2. Co je charakteristická vlastnost regulované soustavy v případě regulace zásob?

Dopravní zpoždění.

3. Kdy se používá smyčková regulace?

Při synchronizaci otáček dvou různých zařízení.

4. Co je akční člen posilovače řízení?

Přímočarý hydraulický motor.

5. Lze při použití GSM automatu dálkově nastavit např. požadovanou teplotu vytápění?

Ano, pomocí SMS zpráv.

Rejstřík

Akční členy, 205

Algebra blokových schémat, 125, 129

amplitudo fázová kmitočtová charakteris, 92

Booleova algebra, 9

Dávkování sypkých hmo, 211

derivační systém, 110

Derivační systém, 116

dopravní zpoždění, 121

Elektrické motory, 216

elektrické pohony, 212

hradla, 23

Hurwitzovo kriterium stability, 139

hydraulické systémy, 171, 232

Impulsní funkce, 90

integrační systém, 110

Integrační systém, 118

IP-adresa, 242

Karnaughova mapa, 18

Karnaughova mapa (K-mapa), 10

Kaskádová regulace, 259

klopný obvod, 44

Klopný obvod, 41

Kmitočtový přenos, 92

Kontaktní schéma, 22

Krokové motory, 224

Kvalita regulace, 152

Laplaceova transformace, 78

liniové schéma, 22

logaritmické kmitočtové charakteristiky, 93, 99

Logaritmické kmitočtové charakteristiky, 108

Logická funkce, 9

Logické řízení, 8

Logický součet, 11

Logický součin, 12

Matematické modely, 95, 96

Měniče frekvence, 229

NAND, 12

Negace, 11

NOR, 12

Nyquistovo kriterium stability, 144

Obrazový přenos, 87

Piezoelektrické aktuátory, 237

pneumatické systémy, 171

Pneumatické systémy, 232

Počítačové sítě, 240

Polovodičová dioda, 213

programovatelný logický automat, 53

Programovatelný logický automat, 26

proporcionální systém, 110

proporcionální systémy, 113

Přechodová funkce, 88

Převody pohybů, 206

Regulace průtoku sypkých hmot, 260

Regulace teploty, 258

Regulace vlhkosti, 262

Regulace zásoby, 261

Regulační obvod, 73

Regulační obvod, 74

Regulační orgány, 208

regulátor, 148; analogový, 148, 175; číslicový, 149; nespojitý, 150; pneumatický, 180

Routhovo-Schurovo kriterium stability, 141

Řešení diferenciálních rovnic, 82

Řízení polohy, 263

Sekvenční funkční diagram, 47

Sekvenční logický obvod, 38

snímače, 188; konstrukce, 189

Snímače: Dotykové sondy, 203; hladiny, 200; konstrukce, 189; polohy, 200; průtoku plynů a kapalin, 194; síly a krouticího momentu, 197; teploty, 192; tlaku, 199

Stabilita, 137

Statická charakteristika, 86

Stejnosměrný motor, 217

Střídavý asynchronní motor, 220

Synchronní střídavé motory, 224

Syntéza, 155

Syntéza sekvenčního logického řízení, 38

Systém, 70

Tranzistor, 212

Triak, 215

Třídění signálů, 71

Třídění systému, 73

Tyristor, 214

Vizualizace, 246; Alarmy, 250; Trendy, 250

Výlučný (exkluzivní) součet, 12

Zadání logické funkce, 10

Zákony Booleovy algebry, 14

Seznam animací

Obrázek 1.48 – Animace popisující základní logické operace 66
Obrázek 1.49 – Animace popisující převod mezi tabulkou hodnot a K-mapou 66
Obrázek 1.50 – Animace popisující převod mezi tabulkou hodnot a K-mapou 67
Obrázek 1.51 – Animace popisující základní logické obvody 67
Obrázek 2.71 – Animace chování proporcionálních systémů 123
Obrázek 2.72 – Animace chování integračních a derivačních systémů 124
Obrázek 2.73 – Animace chování systému hmota na tlumiči a pružině 124
Obrázek 2.74 – Animace chování kyvadla 124
Obrázek 2.83 – Animace kontroly stability pomocí Hurwitzova kritéria stability 141
Obrázek 2.84 – Animace kontroly stability pomocí Routhova-Schurova kritéria stability 144
Obrázek 2.95 – Animace seřízení RO pomocí metody Ziegler-Nichols 160
Obrázek 3.127 – Animace stejnosměrného motoru 255
Obrázek 3.128 – Animace krokových motorů 255
Obrázek 3.129 – Animace synchronního motoru 256
Obrázek 3.130 – Animace funkce Wattova regulátoru 256
Obrázek 3.131 – Animace pneumatického (vlevo) a hydraulického (vpravo) polohování 256