



Střední průmyslová škola Chomutov

**Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Chomutov,
Školní 50, 430 01 Chomutov, příspěvková organizace**

AUTOMATIZACE 2

Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola, Chomutov, Školní 50, příspěvková organizace
Školní 1060/50, 430 01 Chomutov
Telefon 474 628992 ředitel/fax 474 627497, 724346488 e-mail: prumyslovka@spscv.cz, lacina@spscv.cz
IČO: 47796006 č.ú. 2110740287/0100 KB Chomutov

Obsah:

1. Automatické řízení	5
1.1. Základní pojmy	5
1.2. Vlastnosti členů regulačních obvodů	8
1.2.1. Statické vlastnosti členů	8
1.2.2. Dynamické vlastnosti členů regulačních obvodů	13
1.3. Základní členy regulačních obvodů	17
1.3.1. Proporcionální člen	17
1.3.2. Derivační člen	22
1.3.3. Integrační člen	23
1.4. Regulované systémy	24
1.4.1. Statické regulované systémy 0. řádu	24
1.4.2. Statické regulované systémy 1. řádu	24
1.4.3. Statické regulované systémy 2. řádu	25
1.4.4. Astatické systémy 1. řádu	25
1.4.5. Astatické systémy 2. řádu	25
1.5. Regulátory	26
1.5.1. Skladba regulátoru	26
1.5.2. Rozdělení regulátorů	27
1.5.3. Vlastnosti regulátorů	28
1.6. Algebra blokových schémat	32
1.6.1. Sériové řazení bloků	32
1.6.2. Paralelní řazení bloků	33
1.6.3. Zpětnovazební řazení bloků (antiparalelní)	33
1.6.4. Kombinované řazení bloků	34
2. Regulační technika	36
2.1. Regulační obvody se spojitými regulátory	36
2.1.1. Vlastnosti uzavřeného a otevřeného regulačního obvodu	36
2.1.2. Stabilita regulačního obvodu	38
2.1.3. Kvalita regulačního pochodu	41
2.1.4. Volba typu regulátoru	42
2.1.5. Optimální seřízení (nastavení) regulátoru	43
2.2. Regulační obvody s nespojitými regulátory	46
2.2.1. Nespojité regulátory	46
2.2.2. Regulační obvody s dvoupolohovým regulátorem	47
2.2.3. Regulační obvody s třípolohovými regulátory	49
2.2.4. Regulační obvody s dvoupolohovými regulátory se zpětnou vazbou	49
2.2.5. Seřízení (nastavení) nespojitých regulátorů	50
3. Číslicové řízení	51
3.1. Základní pojmy	51
3.1.1. Historický vývoj číslicové techniky	51
3.1.2. Výhody diskrétního řízení	52
3.1.3. Blokové schéma číslicového regulačního obvodu	53
3.2. Teorie číslicových regulačních obvodů	54
3.2.1. Diferenční rovnice jednodukapacitního systému	54
3.2.2. Matematické „minimum“ pro řešení regulačních obvodů	55
3.2.3. Řešení diferenčních rovnic	57
3.2.4. Diferenční rovnice regulátorů	59
3.2.5. Analýza číslicového regulačního obvodu	60

3.2.6. Přenosy a stabilita číslicového regulačního obvodu	61
3.2.7. Návrh algoritmů řízení	62
3.2.8. Simulace řízení na počítači	64
3.3. Fuzzy logika.....	65
3.3.1. Historie.....	65
3.3.2. Podstata fuzzy logiky	65
3.3.3. Fuzzy řízení.....	66
3.3.4. Jednoduchá fuzzifikace, normalizace	67
3.3.5. Vícenásobná fuzzifikace	68
3.3.6. Fuzzifikace a binární systémy	68
3.3.7. Algebra fuzzy množin.....	69
3.3.8. Defuzzifikace	69
3.3.9. Fuzzy logika a PLC.....	70
4. Robotika.....	71
4.1. Úvod.....	71
4.2. Rozdělení	71
4.3. Kinematika robotů	73
4.4. Hlediska posuzování průmyslových robotů a manipulátorů.....	74
4.5. Konstrukce robotů.....	75
4.5.1. Pojezdové ústrojí.....	75
4.5.2. Konstrukční řešení pohybů	75
4.5.3. Pohony robotů.....	76
4.5.4. Odměrovací zařízení	77
4.5.5. Pracovní hlavice – chapadla.....	77
4.6. Řízení robotů.....	78
5. Komunikace v automatizovaných systémech	80
5.1. Základní pojmy	80
5.2. Datové spoje.....	80
5.2.1. Přenosová média	81
5.2.2. Způsob přenosu signálu kanálem.....	82
5.2.3. Zabezpečení informace	83
5.3. Rozhraní.....	84
5.3.1. Paralelní rozhraní	84
5.3.2. Sériové rozhraní	84
5.4. Počítačové (datové) sítě	86
5.4.1. Topologie sítí	87
5.4.2. Metody přístupu na spojovací vedení	89
5.4.3. Referenční model – OSI (Reference Model for Open System Interconnection).....	89
5.4.4. Technické prostředky sítí.....	91
5.4.5. Síťové operační systémy	92
5.5. Sběrnice PROFIBUS	92
5.6. Standardizace průmyslové sběrnice	94
5.7. Infračervené digitální síť IRDN.....	94
5.8. Přenosové kanály	95
6. Vizualizace technologických procesů.....	97
6.1. Požadavky vizualizačních programových balíků.....	98
6.2. Možnosti vizualizačních programových balíků	98
7. Expertní systémy.....	100
7.1. Úvod.....	100
7.2. Architektura expertních systémů	101

8. Projektování AIRS	103
8.1. Vznik a původ metod projektování	103
8.2. Výhody aplikace metod projektování	104
8.3. Standardizace metod projektování	104
8.4. Situace v ČR	106
8.4.1. Úvodní projekt	106
8.4.2. Prováděcí projekt	107
8.5. Životní cyklus automatizačního projektu	108
8.6. Metoda V-model – základní struktura projektu	108
8.7. Vliv metod projektování AIRS na jakost projektů	109
8.8. Softwarové prostředky pro přípravu a řízení projektů	109

Mysl není jako nádoba, kterou je potřeba naplnit, ale jako oheň, který je třeba zapálit.

Plutarch

Tato publikace je určena výhradně pro potřeby SPŠ a VOŠ Chomutov

1. Automatické řízení

1.1. Základní pojmy

Na začátku každé úlohy zabývající se regulací si musíme nejprve ujasnit nejdůležitější pojmy kterými jsou: *regulovaný systém*, *regulovaná veličina*, *akční veličina*, *poruchová veličina*, *regulační obvod*, *regulace* jejich vlastnosti a vzájemné vztahy, které ovlivňují chování a kvalitu řízení.

Regulace – je proces, jehož úlohou je nastavit určitou fyzikální veličinu např. teplotu, tlak, otáčky, napětí atd. na předepsanou hodnotu a udržovat ji při působení vnějších vlivů – poruch na požadované velikosti. Technicky regulaci provádí regulátor.

Regulovaná veličina – je veličina, která je regulací upravována podle stanovených podmínek. Regulovanou veličinou může být například teplota, otáčky, napětí, výška hladiny atd. Získáváme ji měřením pomocí snímačů v regulovaném systému.

Řídící veličina - (jinak takéž žádaná nebo požadovaná) je hodnota nejčastěji určená uživatelem pomocí vstupního technického vybavení (ovládacího panelu, potenciometrem atp.). Regulace má za úkol působit na regulovaný systém tak, aby regulovaná veličina dosáhla hodnotu řídicí veličiny.

Regulátor – je zařízení, které samočinně provádí regulaci. Vyhodnocuje rozdíl mezi žádanou a aktuální regulovanou veličinou a na výstupu vytváří akční veličinu. Regulátor působí proti změnám v regulačním obvodu a proti zvětšování rozdílu mezi žádanou a regulovanou veličinou.

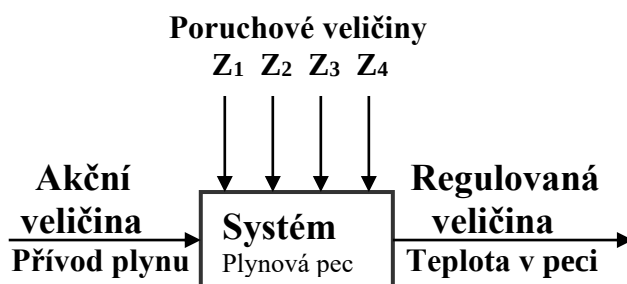
Akční veličina – je veličina, pomocí které ovlivňujeme regulovanou veličinu. Je vytvářena regulátorem na jeho výstupu.

Regulovaný systém - je zařízení na kterém provádíme regulaci, nebo-li zařízení, které regulujeme pomocí regulátoru. V regulovaném systému vzniká regulovaná veličina (je součástí jeho vlastností) a také ji v něm měříme.

Regulační obvod - je obvod složený z regulovaného systému a regulátoru a ve kterém probíhá proces regulace. Obvod je zapojen ve smyčce se zápornou zpětnou vazbou. Záporná zpětná vazba funguje jako stabilizační obvod, protože působí proti působení nežádoucích vnějších vlivů a sleduje hodnotu řídicí veličiny.

Příklad: Chceme-li regulovat teplotu plynové pece, můžeme měnit množství přiváděného plynu (průtok plynu). Teplota je v tomto případě regulovanou veličinou a je ovlivňována akční veličinou, v tomto případě průtokem plynu.

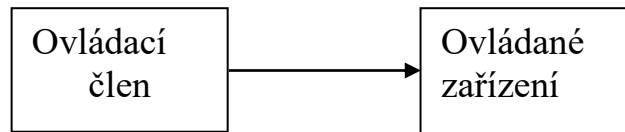
Regulaci potřebujeme tehdy, jestliže regulovaná veličina sama nezůstává na požadované hodnotě, ale působením vnějších poruch, poruchových veličin, má snahu měnit svoji hodnotu. Poruchové veličiny mohou být v tomto případě kolísání tlaku plynu, nestálá výhřevnost plynu, změna teploty okolí a kolísání odběru tepla z pece.



Základní pojmy řízení

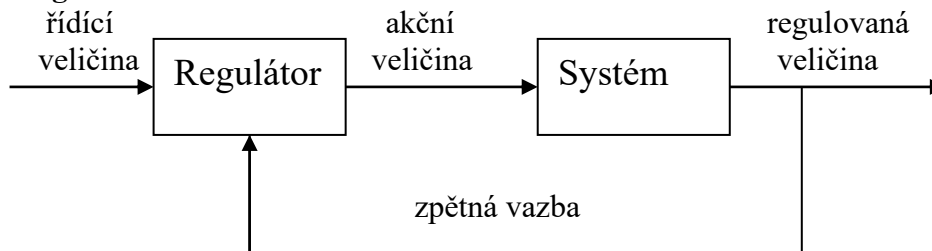
Řízení je působení řídicího členu na člen řízený. Bývá to více či méně složité zařízení, ve kterém se snažíme dosáhnout předem stanoveného stavu. Řízení můžeme rozdělit na:

a) řízení ovládáním



Zařízení vykonávající samočinně daný úkol určitým sledem operací, ale sami nekontrolují svoji činnost – nemají zpětnou vazbu. Použití: jednoduché stroje ovládané člověkem, obráběcí stroje, cyklické automaty.

b) řízení regulací



Zařízení udržuje samočinně požadované vlastnosti daného pochodu v určitých mezích (zařízení musí mít zpětnou vazbu).

c) vyšší formy řízení – kybernetické řízení

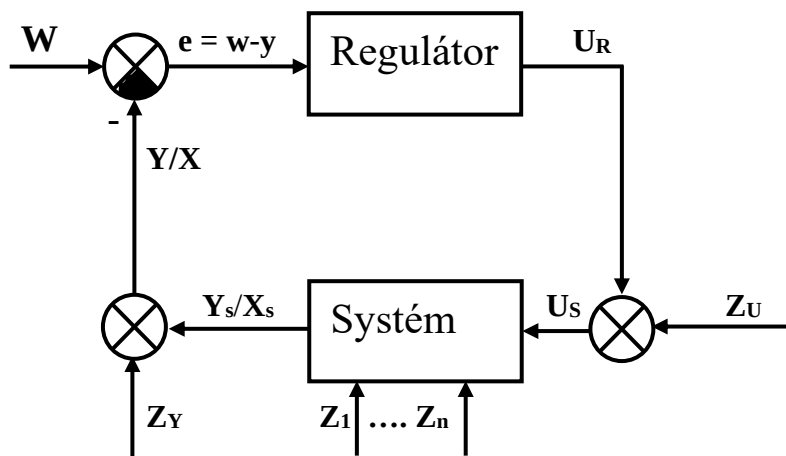
Vyšší typ řízení, do kterého se řadí řízení s fuzzy logikou, s prvky umělé inteligence, optimalizátory, adaptivní regulátory a evoluční řídicí algoritmy. Jedná se o uzavřený celek, kde dochází k samočinnému řízení a kde kybernetické zařízení si samo volí podmínky a způsob tohoto řízení podle předem stanovených kritérií vypracovaných člověkem.

Druhy regulací

Regulace se dělí podle průběhu řídicí veličiny v čase, využití signálů a dalších aspektů na:

- regulace na konstantní hodnotu – nejčastější druh regulace, více než 90 % všech regulací všech druhů fyzikálních veličin (teplota, tlak, hladina, průtok, rychlost ...)
- regulace programová – požadovaná hodnota má předepsaný průběh v čase, časový program (např. průběh teploty při sušení nebo žíhání)
- regulace vlečná – požadovaná hodnota sleduje průběh jiné veličiny, jejíž velikost se mění
- regulace poměrová – podobně jako vlečná regulace sleduje jinou veličinu a k ní vytváří poměr např. dodávka kyslíku pro spalování určitého množství paliva
- regulace extrémální – udržuje 2 veličiny v extrému, tj. v maximu či minimu jejich vzájemného účinku (např. výkon parogenerátoru při dané teplotě a tlaku)
- regulace s pomocnou akční veličinou (rozvětvený regulační obvod pro náročné aplikace)
- regulace s pomocnou regulovanou veličinou (rozvětvený regulační obvod pro náročné aplikace)
- regulace vícerozměrná/stavová (regulace více veličin souběžně)

Blokové schéma regulačního obvodu:



W – *řídící veličina (žádaná/požadovaná)* nastavuje požadovanou hodnotu regulované veličiny

e – *regulační odchylka* je rozdíl mezi řídící a regulovanou veličinou = rozdíl mezi žádanou hodnotou regulované veličiny a skutečnou hodnotou regulované veličiny: $e = w - y$

U – *akční veličina* je výstupní veličina regulátoru a současně vstupní veličina systému

U_R – *akční veličina regulátoru* je výstupní veličina regulátoru

U_S – *akční veličina systému* je výstupní veličina regulátoru s přičtením poruchové veličiny **Z_U**

Z – *poruchová veličina: Z₁ až Z_n* – **skutečné poruchy** (vnější vlivy, které často nelze přesně definovat), které působí na regulovaný systém a jsou hlavním důvodem použití regulace

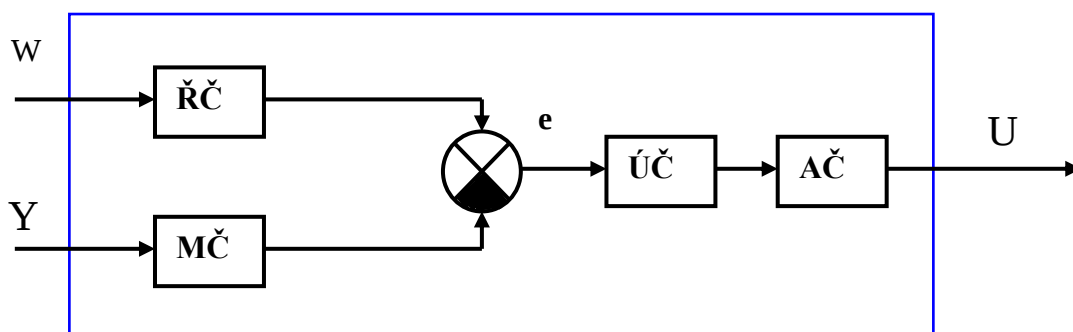
Z_U – *porucha působící v místě akční veličiny* (zastupuje skupinu skutečných poruch) se nejčastěji používá k znázornění skutečných vlivů

Z_Y – *porucha působící v místě regulované veličiny* (zastupuje skupinu skutečných poruch)

Y – *regulovaná veličina (s přičtením poruchové veličiny Z_Y)* je veličina, jejíž hodnota se regulací má udržovat požadované hodnotě dané řídící veličinou (dříve označovaná **X**)

Y_s – *regulovaná veličina systému* je skutečná hodnota regulované veličiny v místě měření snímačem neovlivněná poruchovou veličinou (poruchy v přenosu, rušení a chyby měření) (dříve **X_s**)

Blokové schéma regulátoru:



MČ – *měřící člen* je zařízení pro měření hodnoty regulované veličiny (snímač, senzor)

ŘČ – *řídící člen* je zařízení pro zadání řídící veličiny, tj. žádané/požadované hodnoty (nastavovací prvek: reostat, potenciometr, klávesnice, paměťové zařízení, kulisa atd.)

PČ – *porovnávací člen* vytváří regulační odchylku porovnáním žádané hodnoty s hodnotou regulované veličiny: $e = w - y$

ÚČ – *ústřední člen* zpracovává regulační odchylku **e** a vytváří akční veličinu **U**

AČ – *akční člen* je výkonové zařízení, které působí na regulovaný systém (vytváří akci) pomocí akční veličiny; většinou je složen z pohonu/servopohonu a regulačního orgánu (který bývá konstrukční součástí regulovaného systému)

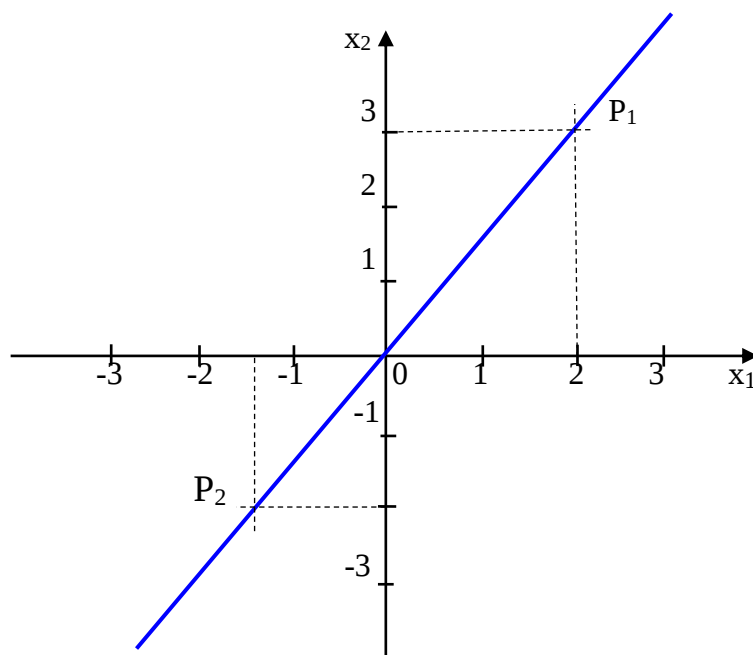
1.2. Vlastnosti členů regulačních obvodů

Vlastnosti členů regulačních obvodů se projevují na kvalitě regulace. Nejvýrazněji se však uplatňují vlastnosti regulovaných systémů a ústředních členů regulátorů. Členy regulačních obvodů hodnotíme podle jejich statických (klidových) a dynamických (pohybových) vlastností.

1.2.1. Statické vlastnosti členů

Jedním z nejdůležitějších způsobů vyjádření a zaznamenání statických vlastností členů regulačních obvodů je statická charakteristika a její matematický popis.

Statická charakteristika je charakteristika, která vyjadřuje závislost výstupního signálu x_2 na vstupním signálu x_1 **v ustáleném stavu**, tj. po ukončení všech přechodových jevů.



Obr. 1. Ideální statická charakteristika lineárního členu

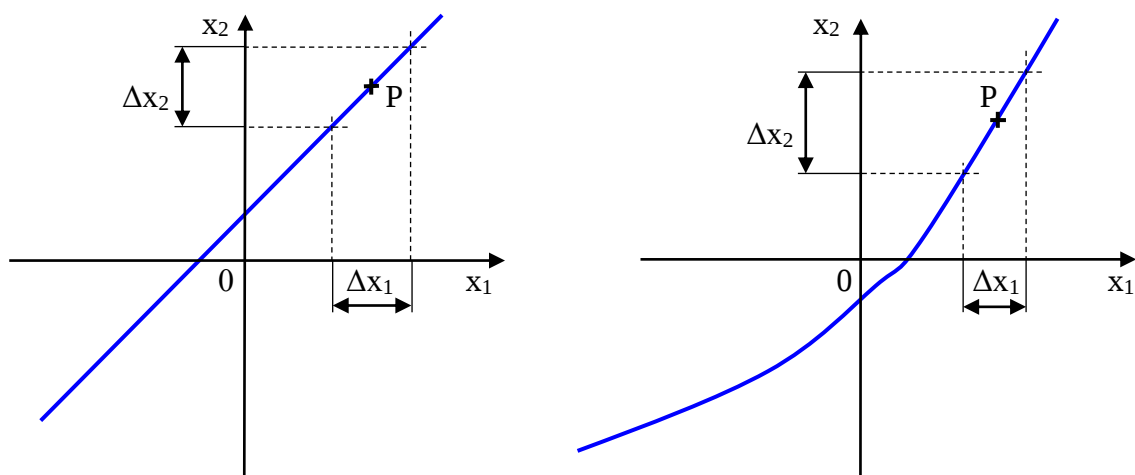
Je-li statická charakteristika členu přímkou, jde o lineární člen. V ostatních případech se jedná o člen nelineární. Z charakteristiky můžeme vyjádřit závislost mezi výstupním a vstupním signálem. Prochází-li lineární statická charakteristika počátkem, můžeme vyjádřit poměr výstupního a vstupního signálu v libovolném bodě. Pokud jsou x_2 i x_1 stejné fyzikální veličiny je tento poměr bezrozměrný a nazývá se **statické zesílení**. Pokud jsou x_2 a x_1 různé fyzikální veličiny má tento poměr fyzikální rozměr:

$$K = \frac{x_2}{x_1}$$

Rovnice popisující lineární charakteristiku má známý tvar:

$$x_2 = K \cdot x_1 + q$$

Neprochází-li statická charakteristika počátkem nebo není-li charakteristika čistě přímková (tzv. kvazilineární člen), určíme statické zesílení z poměru přírůstků. U nelineární charakteristiky volíme pracovní bod v oblasti, kde je průběh charakteristiky téměř lineární (v případě, že požadujeme lineární chování členu).



Obr. 2. Určení zesílení u charakteristiky neprocházející počátkem a u kvazilineárního členu

V pracovním bodě pak můžeme určit zesílení jako: $K = \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1}$

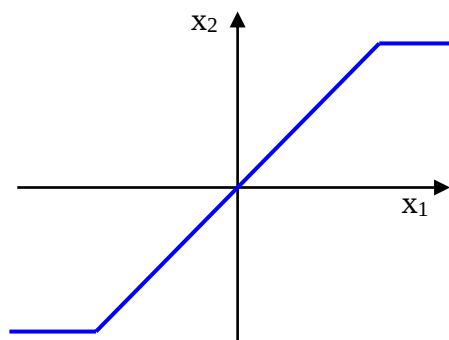
Metoda, při které nahrazujeme část charakteristiky přímkou, se nazývá **linearizací**. Vycházíme zde z přírůstků veličin, které mohou být nahrazeny střídavými signály malé amplitudy. Zesílení určené a základě přírůstků je dynamická veličina tzv. diferenciální zesílení, **dynamické zesílení**.

Tato metoda se využívá např. při určování proudového zesilovacího činitele bipolárních tranzistorů, strmosti elektronek a unipolárních tranzistorů, vstupních a výstupních odporů z příslušných statických charakteristik.

Kromě obecných nelinearit se vyskytují tzv. **typické nelinearity**:

a) Nelinearita typu nasycení

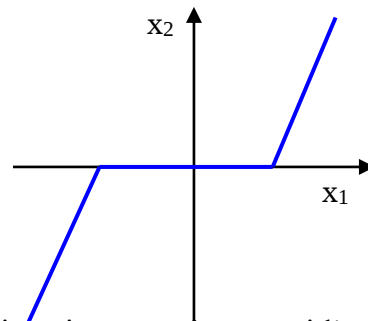
Někdy je tato nelinearita označována jako nelinearita typu *omezení* (obr. 3.). V rozmezí vstupních signálů $-x_{10}$ a $+x_{10}$ se člen chová jako lineární. Při překročení tohoto pásma linearity (proporcionality) se nelinearita projevuje tak, že při dalším zvyšování vstupního signálu x_1 se amplituda výstupního signálu x_2 již nezvětšuje a je omezena na hodnotu x_{20} . Omezení se vyskytuje u většiny zařízení, regulátorů, zesilovačů a záměrně se využívá u tvarovačů průběhu signálu. Např. ventil lze otevřít pouze na 100 % atd.



Obr. 3. Nelinearita typu nasycení

b) Nelinearita typu pásmo necitlivosti

Tato nelinearita (obr. 4.) se vyskytuje všude, kde vzniká tření nebo se vyskytují mechanické vazby. Projevuje se u snímačů s pohyblivým ústrojím, u servomotorů, u zesilovačů, u regulátorů apod. Někdy může mít příznivý vliv (např. stabilita regulátorů) a proto se zavádí úmyslně. Typický výskyt necitlivosti je u kohoutů s opotřebovanými převody.



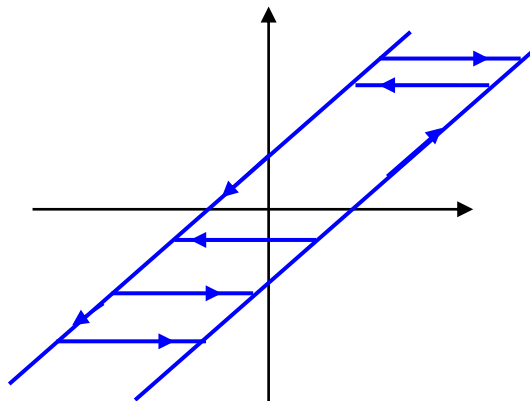
Obr. 4. Nelinearita typu pásmo necitlivosti

c) Nelinearita typu zbytkový signál

S touto nelinearitou se setkáváme u netěsnících ventilů jako s druhem závady. V některých případech se zavádí záměrně pro zaručení minimálního průtoku (proplach potrubí, který zabraňuje sedimentaci) nebo dolní limit regulačního rozsahu (otvor v kuželce ventilu).

d) Nelinearita typu vůle v převodech

Tato nelinearita se vyskytuje u ozubených převodů. Vstupním signálem je úhel natočení primárního kola, výstupním signálem je úhel natočení sekundárního kola. Ze statické charakteristiky (obr. 5.) je zřejmé, že vůle v převodech je zvláštním případem necitlivosti, která se projevuje vždy při změně smyslu vstupní veličiny. Velikost výstupní veličiny není jednoznačně určena velikostí vstupní veličiny a je třeba uvažovat i smysl otáčení ozubeného kola.



Obr. 5. Charakteristika převodu s vůlí

e) Nelinearita typu hystereze

Velikost výstupní veličiny je určena opět dvojznačně a závisí nejen na velikosti vstupní veličiny, ale i na smyslu její změny. Na rozdíl od vůle v převodech zde dochází k omezení (nasycení) velikosti výstupní veličiny.

Nejznámějšími typy této nelinearity jsou hysterezní křivka feromagnetického materiálu a charakteristika relé (verze relé 2polohové a relé 3polohové polarizované).

Obr. 6. Hysterezní křivka feromagnetického materiálu a elektromagnetického relé

„Matematické minimum“ potřebné k řešení regulačních obvodů

Podobně jako v jiných předmětech, tak i v automatizaci nevystačíme pouze s množinou reálných čísel a s „jednoduchou“ matematikou. Budeme pracovat v oboru komplexních čísel a používat nejen derivace a integrály časových funkcí, které popisují časové děje, ale i Laplaceovu transformaci a později i transformaci Z, pomocí kterých lze rovnice s diferenciály řešit.

Komplexní čísla

Pro znázornění vektorů, charakteristik apod. budeme využívat množinu komplexních čísel (Gaussovu rovinu). Základní vztahy v oboru komplexních čísel:

Operace s komplexními čísly, mocniny imaginárního operátoru j , vektory v komplexní rovině
formy zápisu harmonického signálu: vektor v KR, exponenciální tvar, složkový tvar, úhlový tvar

Derivace a integrace

Pro práci s funkčními průběhy závislými na času, pomocí kterých můžeme posuzovat chování zařízení, je nutné použít diferenciální a integrální výpočty.

Derivace časové funkce – matematický a fyzikální význam
grafická konstrukce: rozdíl – difference – derivace

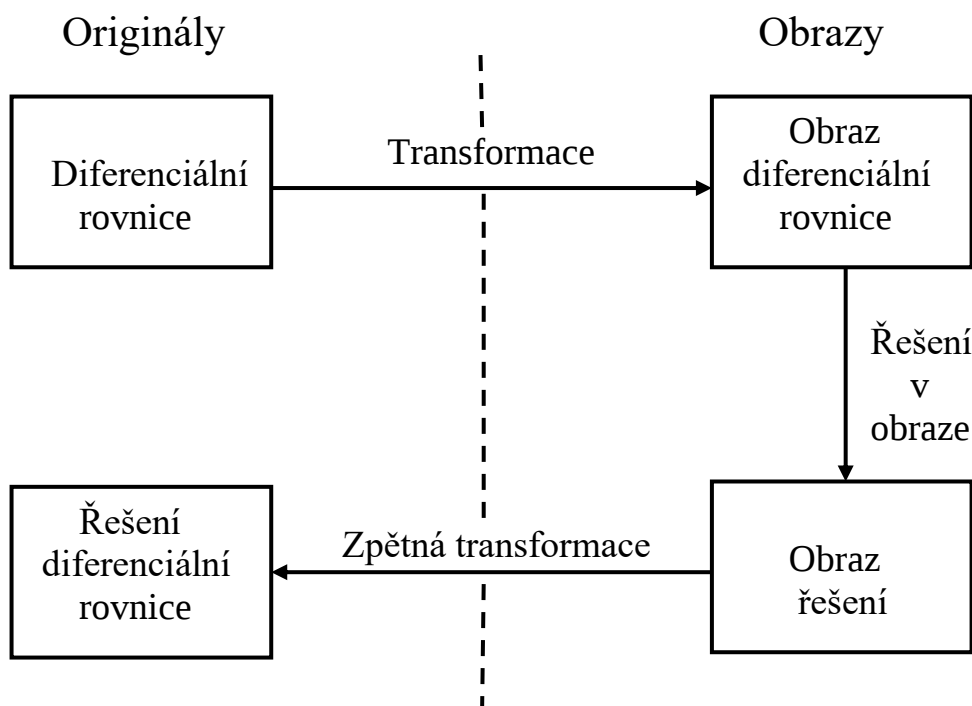
Integrál časové funkce – matematický a fyzikální význam
grafická konstrukce: zrychlení – rychlost – vzdálenost

Laplaceova transformace

Obtížnost matematických operací jako je derivování a integrování vedla k hledání metod, které by ulehčily řešení těchto úloh. Nejpoužívanější metodou je Laplaceova transformace (dále jen L transformace), která usnadňuje řešení obyčejných i parciálních diferenciálních rovnic s konstantními koeficienty. L transformace je pomocný matematický aparát, který umožňuje nahradit obtížné derivování a integrování snadným násobením a dělením operátorem p . Předtím je však nutné nahradit časové funkce transformovanými funkcemi. Ty určíme pomocí tabulek (neboli slovníku) L transformace.

Abychom mohli provést L transformaci, musí časová funkce $f(t)$ splňovat tyto podmínky:

- $f(t)$ musí být jednoznačná a v čase $t < 0$ musí být její velikost nulová ($f(t) = 0$ pro $t < 0$)
- $f(t)$ musí být v každém konečném intervalu kladná



Obr. 6. Blokové schéma řešení diferenciálních rovnic pomocí L transformace

Postup řešení diferenciální rovnice:

Diferenciální rovnici pomocí transformace transformujeme (převědeme) na operátorový obraz diferenciální rovnice. Jednotlivé časové funkce $f(t)$ obsažené v diferenciální rovnici (originály) nahradíme pomocí slovníku (popřípadě pomocí transformačního vztahu) novými funkcemi (obrazy) $f(p)$. Čas t jako nezávislá proměnná veličina originální funkce je při L transformaci nahrazen okamžitou nezávisle proměnnou veličinou – operátorem p . Obraz diferenciální rovnice je obyčejná algebraická rovnice bez derivací a integrálů. Algebraické operace při transformaci (sčítání členů, násobení koeficientem atd.) zůstanou beze změny zachovány.

V dalším kroku řešíme transformovanou algebraickou rovnici – provedeme *řešení v obraze* a získáme *obraz řešení*. Známe-li obraz řešení, snažíme se pomocí podrobnějšího slovníku L transformace nebo pomocí vztahu (předpisu) provést *zpětnou transformaci* obrazu řešení a získat tak *řešení diferenciální rovnice* (původní – originální rovnice), obsahující opět časové funkce.

Operátorové obrazy nejčastěji se vyskytujících časových funkcí:

Obraz časové funkce: $L\{f(t)\} = f(p)$;

Obraz násobení funkce konstantou: $L\{k \cdot f(t)\} = k \cdot f(p)$

Obraz součtu funkcí: $L\{f_1(t) + f_2(t)\} = f_1(p) + f_2(p)$

Obraz derivace funkce: $L\{f'(t)\} = p \cdot f(p)$; **n-tá derivace funkce:** $L\{f^{(n)}(t)\} = p^n \cdot f(p)$

Obraz integrálu funkce začínající v 0: $L\left\{\int_0^t f(t)dt\right\} = \frac{1}{p} \cdot f(p)$

Obraz jednotkového skoku: $L\{1(t)\} = \int_0^\infty 1(t) \cdot e^{-p \cdot t} dt = \left[-\frac{e^{-p \cdot t}}{p} \right]_0^\infty = \frac{1}{p}$

Obraz Diracovy funkce: Diracova funkce $\delta(t)$ (Diracův impuls) je funkce, která se rovná nule mimo bod $t=0$ a která pro $t=0$ nabývá nekonečně velké hodnoty. Pro tuto funkci platí:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1; \quad \delta(t) \text{ se rovná první derivaci jednotkového skoku: } \delta(t) = \frac{d1(t)}{dt} \quad \text{takže} \\ L\{\delta(t)\} = 1$$

Obraz lineární časové funkce $t(t)$: $L\{t(t)\} = \frac{1}{p^2}$, její mocnina t^n : $L\{t^n(t)\} = \frac{n!}{p^{n+1}}$

Obraz klesající exponenciální funkce: $L\{e^{-at}\} = \frac{1}{p+a}$; nebo $L\{e^{at}\} = \frac{1}{p-a}$

Obraz funkce: $L\{t \cdot e^{-at}\} = \frac{1}{(p+a)^2}$

Obraz stoupající exponenciální funkce: $L\left\{\frac{1}{a}(1 - e^{-at})\right\} = \frac{1}{p \cdot (p+a)}$

1.2.2. Dynamické vlastnosti členů regulačních obvodů

Základním vyjádřením dynamických vlastností daného členu je jeho **diferenciální rovnice**. Vstupním signálem členu může být libovolný signál $x_1(t)$. Na výstupu členu je pak výstupní signál $x_2(t)$. Vztah mezi $x_2(t)$ a $x_1(t)$ je určen diferenciální rovnicí. Při zjišťování dynamických vlastností musíme vyloučit vliv nelinearit tím, že dynamické členy linearizujeme.

Příklad:

Obecný tvar diferenciální rovnice 1. řádu (v rovnici je obsažena derivace nejvýše 1. řádu). U členu s derivací je konstanta a_1 , u členu bez derivace (nultý řád derivace) je konstanta a_0 .

$a_1 \cdot \frac{dx_2(t)}{dt} + a_0 \cdot x_2(t) = x_1(t)$. Vyřešení takové diferenciální rovnice klasickým způsobem je velmi náročné. Řešení nám však značně zjednoduší L transformace. Pomocí L transformace převedeme diferenciální rovnici na rovnici algebraickou: $a_1 \cdot p \cdot x_2(p) + a_0 \cdot x_2(p) = x_1(p)$ Získali jsme obraz diferenciální rovnice, který také vyjadřuje dynamické vlastnosti daného členu, a se kterým lze v dalších krocích pracovat lépe než s předchozí diferenciální rovnicí.

Přenos členu

Obrazový přenos

V praxi potřebujeme znát časový průběh výstupního signálu, vyvolaný vstupním signálem známého průběhu. Proto zavádíme tzv. *přenos*, charakterizující přenosové vlastnosti daného členu. Známe-li přenos členu v matematickém tvaru a násobíme-li jím funkci, která vyjadřuje průběh vstupního signálu, získáme funkci vyjadřující průběh výstupního signálu. Nejčastěji pracujeme s obrazy funkcí v L transformaci, a proto nejčastěji používáme *obrazový* neboli *operátorový přenos* $F(p)$. Potom výpočet výstupního signálu pomocí operátorového přenosu bude mít tvar:

$$x_2(p) = x_1(p) \cdot F(p)$$

Obrazový přenos je tedy určen poměrem obrazů výstupního a vstupního signálu. Z předcházejícího příkladu můžeme určit přenos jako: $F(p) = \frac{x_2(p)}{x_1(p)}$

Frekvenční přenos

V teorii řídicí techniky dáváme přednost úhlové frekvenci ω [1/s] před kmitočtem f [Hz]. Dosa-
díme-li v operátorovém přenosu za p všude $j\omega$, dostaneme tzv. *frekvenční přenos*.

$$F(j\omega) = \frac{x_2(j\omega)}{x_1(j\omega)}$$

Vstupní signál sinusového tvaru $x_1(t)$ a výstupní signál sinusového tvaru $x_2(t)$ můžeme symbolicky vyjádřit pomocí fázorů (komplexních čísel) $x_1(j\omega)$ a $x_2(j\omega)$. Frekvenční přenos se pak definuje jako komplexní číslo, které se rovná podílu těchto fázorů.

Frekvenční charakteristiky

Frekvenční charakteristika v komplexní rovině (FCHVKR)

Tato charakteristika je tvořena čarou spojující konce vektorů příslušejících frekvencím, které jsou uvedeny v tabulce frekvenční charakteristiky.

Můžeme jí sestavit například tak, že budeme dosazovat do výrazu pro frekvenční přenos za úhlovou frekvenci libovolné vhodné hodnoty od nuly do nekonečna a výsledné hodnoty znázorníme v rovině komplexních čísel.

Pro libovolnou frekvenci můžeme zakreslit vektor přenosu jako úsečku spojující počátek souřadnic s bodem na charakteristice, který je označen požadovanou frekvencí. Amplitudu přenosu udává délka vektoru, fázi udává úhel mezi vektorem a kladnou částí reálné osy. Na reálné ose můžeme číst reálnou složku přenosu, na imaginární ose čteme imaginární složku přenosu.

Obr. 7. Frekvenční charakteristiky v komplexní rovině

Frekvenční charakteristiky v logaritmických souřadnicích (FCHVLS)

Tyto charakteristiky jsou běžně používány v nízkofrekvenční technice (charakteristiky zesilovačů, mikrofonů atd.). Na vodorovnou osu vynášíme úhlovou frekvenci ve frekvenčních dekáдах. Frekvenční dekáda je dílek stupnice, jehož krajní úhlové frekvence jsou v poměru 10:1. Všechny dekády (dílků stupnice) jsou stejně široké. Rozestupy mezi frekvencemi jsou logaritmické. Je zřejmé, že nulovou i nekonečnou frekvenci nelze v dekáдах na rozdíl od komplexní roviny znázornit. V logaritmických souřadnicích znázorňují frekvenční přenos dvě charakteristiky. Na svislou osu vynášíme v lineárním měřítku amplitudu (absolutní hodnotu) přenosu v decibelech:

$$F_{dB} = 20 \cdot \log|F(j\omega)|$$

Křivku znázorňující frekvenční závislost amplitudy nazýváme *amplitudovou frekvenční charakteristikou*. Na svislou osu, kterou pro přehlednost kreslíme na pravou stranu, vynášíme v lineárním měřítku fázi, nejčastěji v úhlových stupních. Takto získáme *fázovou frekvenční charakteristiku*.

Obr. 8. Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích

Logaritmické frekvenční charakteristiky jsou výhodnější než frekvenční charakteristiky v komplexní rovině pro snadnější a přesnější čtení úhlové frekvence. Kromě toho je možné průběh amplitudových charakteristik s velkou přesností aproximovat lomenou přímkou. Úhlové frekvence lomu jsou určeny převrácenou hodnotou příslušné časové konstanty daného dynamického členu. Při frekvenci lomů je zpravidla maximální rozdíl (chyba) mezi aproximativní a skutečnou charakteristikou 3 dB, charakteristika se zpravidla lomí o 20 dB na dekádu. Dále je mezi aproximativní amplitudovou a fázovou charakteristikou dynamického členu (s výjimkou členů s dopravním zpožděním) následující závislost (tzv. Bodeho funkce):

Je-li amplitudová charakteristika rovnoběžná s osou frekvence (což znamená, že amplituda přenosu je v určitém frekvenčním pásmu frekvenčně nezávislá), pak je fáze přenosu nulová. Klesá-li amplitudová charakteristika o 20 dB na dekádu (tj. -20 dB/dek), je fáze -90° , při -40 dB/dek je fáze -180° atd. Naopak při vzestupu amplitudové charakteristiky o 20 dB na dekádu je fáze v příslušném frekvenčním pásmu $+90^\circ$, při 40 dB/dek je fáze $+180^\circ$ atd.

Velkou předností logaritmických charakteristik je, že výsledná amplitudová i fázová charakteristika sériově zapojených členů je dána grafickým součtem dílčích charakteristik.

Máme-li k dispozici frekvenční charakteristiku v komplexní rovině, můžeme pro zvolené frekvence přecházet absolutní hodnoty (amplitudy) přenosu z délek příslušných vektorů a vypočítat logaritmické míry přenosu v decibelech. Příslušné fáze můžeme změřit úhломěrem nebo vypočítat ze složek přenosu. Získané hodnoty zapsané do tabulky pak vyneseme do logaritmických souřadnic. Body spojíme, abychom získali aproximativní přímkové charakteristiky.

Podobně můžeme opačným postupem sestavit frekvenční charakteristiku v komplexní rovině, máme-li logaritmické charakteristiky.

Přechodová charakteristika

Přechodová charakteristika velmi názorně ukazuje průběh reakce členu na podnět. Zjistíme ji jako průběh výstupního signálu $x_2(t)$ daného členu, je-li vstupním signálem $x_1(t)$ jednotkový skok $1(t)$. (Pozn.: přesná definice jednotkového skoku a související informace viz Matematický dodatek.)

Přechodová charakteristika členu je jeho odezva na jednotkový skok. Známe-li operátorový přenos členu $F(p)$, zjistíme Laplaceův obraz přechodové charakteristiky členu vynásobením jeho přenosu obrazem jednotkového skoku: $x_2(p) = L\{1(t)\} \cdot F(p)$. Zpětnou transformací pak získáme

funkci, která popisuje průběh přechodové charakteristiky: $x_2(t) = L^{-1}\left\{\frac{1}{p} \cdot F(p)\right\}$.

Obr. 9. Přechodové charakteristiky a jejich měření

Matematický dodatek:

Mezi základní signály, které se v automatizaci používají patří jednotkový impuls, jednotkový skok, skok rychlosti a skok zrychlení. Tyto signály se používají ve specifických případech pro získání dynamického chování členů, protože některé členy nemohou reagovat na jednotkový skok vstupního signálu (z důvodu životnosti a bezpečnosti). V komplikovaných případech se získává dynamika chování členu složitými statistickými metodami v průběhu jejich provozu s vyhodnocováním šumových signálů.

Matematicky je jednotkový impuls derivací jednotkového skoku, nazývá se Diracův impuls a označuje se $\delta(t)$. Podobně je odvozen skok rychlosti jako integrál jednotkového skoku a označuje se $v(t)$. Skok zrychlení je definován jako integrál rychlosti a označuje se $a(t)$.

Jednotkový skok $1(t)$ je definován hodnotou 0 pro $t < 0$ a hodnotou 1 pro $t \geq 0$.

Za jednotkový skok se považuje také poměrné vyjádření změny vstupního signálu z klidové na pracovní hodnotu (např. z 0 na 230 V tj. z vypnutého do zapnutého stavu apod.).

Diracův impuls $\delta(t)$ je definován hodnotou 0 pro $t > 0$ a hodnotou ∞ pro $t = 0$. Tento impuls není možné technicky realizovat a nahrazuje se impulsem, který lze technicky vytvořit a jehož plocha = 1. Doba trvání impulsu T musí být vůči reakci členu zanedbatelně krátká a výška impulsu = $1/T$.

Měření přechodových charakteristik členů s pomalými přechodovými ději (tj. s dlouhými časovými konstantami) je snadné. V pravidelných časových intervalech odečítáme z měřících přístrojů velikost výstupního signálu x_2 . Začátek přechodového děje je dán připojením jednotkového skoku na vstup členu. Pro velmi dlouhá měření (trvající dny až měsíce) se využívají různé zapisovače na

papírový pás, nebo digitální záznamníky (datalogery) se záznamem na paměťová média, případně multimetry se sběrem dat a přenosem dat do počítače.

Přechodové charakteristiky členů s krátkými časovými konstantami zjišťujeme osciloskopy s jednorázovým průběhem (osciloperturbograf se záznamem na papír, osciloskop s dosvitovou obrazovkou, osciloskopy s paměťovou obrazovkou, digitální osciloskopy se záznamem na paměťové médium). Tímto způsobem můžeme například snímat např. přechodové charakteristiky elektromotorů, ventilů, čerpadel atd.

K zjišťování dynamických vlastností velmi rychlých obvodů (např. elektronických zesilovačů) lze použít běžný osciloskop, který je synchronizován obdélníkovým signálem $x_1(t)$ s vhodnou opakovací frekvencí přivedeným na vstup měřeného členu. Pro získání trvalého záznamu naměřeného průběhu jsou vhodné digitální osciloskopy se záznamem dat na paměťové médium.

1.3. Základní členy regulačních obvodů

1.3.1. Proporcionální člen

Název tohoto členu vznikl z proporcionální (úměrnosti) závislosti mezi výstupním a vstupním signálem členu. Rozlišujeme ideální proporcionální člen (bez zpoždění), setrvačný člen (proporcionální člen se zpožděním 1. řádu) a kmitavý člen (proporcionální člen se zpožděním 2. řádu).

1.3.1.1. Ideální proporcionální člen – člen 0. řádu

Ve skutečnosti dokonalý proporcionální člen neexistuje, neboť se vždy uplatňují vlivy setrvačnosti, parazitních kapacit, indukčností apod. To znamená, že každý proporcionální člen se chová jako člen se zpožděním minimálně 1. řádu, ale v oboru časů mnohem delších, než je časová konstanta T a v oboru frekvencí nižších, než je frekvence lomu $\omega=1/T$ můžeme takovýto člen považovat za ideální proporcionální. Tím se zjednoduší výpočty regulačních obvodů. Vlastnosti ideálního proporcionálního členu můžeme vyjádřit několika způsoby.

a) Diferenciální rovnice: $a_0 \cdot x_2(t) = x_1(t)$

U tohoto členu se jedná o algebraickou rovnici, neboť nejvyšší derivace je zde 0. řádu a její obraz v L transformaci je: $a_0 \cdot x_2(p) = x_1(p)$

b) Operátorový (obrazový) přenos: $F(p) = K$ kde $K = \frac{1}{a_0}$

c) Frekvenční přenos: $F(j\omega) = K$

d) Frekvenční charakteristika v komplexní rovině

U ideálního proporcionálního členu je zredukována na bod vyneseny na reálné ose ve vzdálenosti K od počátku.

e) Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích

Amplitudová charakteristika je dána výrazem $F_{dB} = 20 \cdot \log(K)$ a její průběh nezávisí na frekvenci. Fázový posun je nulový.

f) Přechodová charakteristika: teoretický průběh je dán vztahem $x_2(t) = K \cdot 1(t)$

Odezvou ideálního proporcionálního členu na jednotkový skok je skok s výškou K . (Ve skutečnosti se jedná o exponenciální průběh, ovšem se zanedbatelně krátkou časovou konstantou T .)

Obr. 10. Charakteristiky a příklady ideálního proporcionálního členu

1.3.1.2. Setrvačný člen – proporcionální člen se zpožděním 1. řádu

Charakteristika setrvačného členu je nejčastější, která se vyskytuje v technice i v přírodě. Její typický tvar má obecně známý průběh, jímž je exponenciální závislost (exponenciální funkce je řešením diferenciální rovnice 1. řádu). V elektrotechnice je známá z přechodových jevů nabíjení (rostoucí exponenciála) nebo vybíjení (klesající exponenciála) kondenzátoru.

a) **Diferenciální rovnice:** $a_1 \cdot \frac{dx_2(t)}{dt} + a_0 \cdot x_2(t) = x_1(t)$

její obraz v L transformaci je: $a_1 \cdot p \cdot x_2(p) + a_0 \cdot x_2(p) = x_1(p)$

b) **Operátorový (obrazový) přenos:** $F(p) = \frac{K}{T \cdot p + 1}$

kde zesílení $K = \frac{1}{a_0}$ a časová konstanta $T = \frac{a_1}{a_0}$

c) **Frekvenční přenos:** $F(j\omega) = \frac{K}{j\omega \cdot T + 1}$

d) **Frekvenční charakteristika v komplexní rovině**

U všech setrvačných systémů je to půlkružnice s průměrem K pod kladnou reálnou osou. Charakteristika prochází pouze jedním kvadrantem, protože diferenciální rovnice je 1. řádu. Bod charakteristiky odpovídající nulové frekvenci ($\omega = 0$) leží na reálné ose ve vzdálenosti K od počátku. V počátku souřadnic leží bod odpovídající nekonečné frekvenci ($\omega = \infty$). Přesně pod středem kružnice je na frekvenční charakteristice frekvence lomu, jejíž hodnota je určena převrácenou hodnotou časové konstanty $\omega = \frac{1}{T}$

Obr. 11. Frekvenční charakteristiky setrvačného členu v komplexní rovině

Z charakteristiky je vidět, že pro $\omega = 0$ je $\varphi = 0$,
pro $\omega = 1/T$ je $\varphi = -45^\circ$,
pro $\omega = \infty$ je $\varphi = -90^\circ$.

e) **Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích**

Amplitudu přenosu určíme pomocí Pythagorovy věty: $|F(j\omega)| = \frac{K}{|j\omega \cdot T + 1|} = \frac{K}{\sqrt{\omega^2 \cdot T^2 + 1}}$

logaritmická míra přenosu je: $F_{dB} = 20 \cdot \log|F(j\omega)|$.

Body amplitudové charakteristiky pak můžeme vypočítat pro požadované frekvence, výsledek F_{dB} zapsat do tabulky a vynést do logaritmických souřadnic. Mnohem jednodušší způsob umožňuje konstrukce asymptot neboli náhrada charakteristiky lomenou přímkou (aproximace). Do frekvence lomu je to přímka v úrovni $20 \cdot \log(K)$, rovnoběžná s osou frekvencí. Nad frekvencí lomu $1/T$ je to přímka se sklonem -20 dB/dek.

Obr. 12. Univerzální normovaná frekvenční amplitudová a fázová charakteristika setrvačného členu

f) **Přechodová charakteristika**

Její průběh je dán vztahem: $x_2(t) = K \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}})$. Dosadíme-li konstanty K , T a několik vhodných časů t , získáme tabulku pro sestavení přechodové charakteristiky daného setrvačného členu. Vynásíme-li místo času t relativní čas t/T , můžeme vynést normovanou charakteristiku setrvačného členu s časovou konstantou T .

Představiteli setrvačných členů 1. řádu jsou ty obvody nebo technická zařízení, která obsahují jednu energetickou kapacitu, tj. součástku schopnou v sobě akumulovat energii. Mohou to být RC členy ($K = 1$, $T = R \cdot C$) nebo členy LR ($K = 1$, $T = L/R$). Mechanické setrvačné členy jsou nejčastěji reprezentovány elektromotory, u kterých vstupním signálem je vstupní napětí a výstupní veličinou otáčky nezátíženého motoru. Velmi často jsou to tepelně setrvačné členy, jejichž vstupní veličinou je příkon a výstupní veličinou je teplota (nejčastěji různé pícky). Do skupiny setrvačných členů patří i nádrže tekutin s volným odtokem ve kterých je výška hladiny úměrná přítoku a odtok závisí na výšce hladiny.

1.3.1.3. Kmitavý člen – proporcionální člen se zpožděním 2. řádu

Představiteli těchto členů jsou obvody nebo zařízení, která obsahují dvě energetické kapacity.

a) Diferenciální rovnice 2. řádu: $a_2 \cdot \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{dx_2(t)}{dt} + a_0 \cdot x_2(t) = x_1(t)$

a její L obraz: $a_2 \cdot p^2 \cdot x_2(p) + a_1 \cdot p \cdot x_2(p) + a_0 \cdot x_2(p) = x_1(p)$

b) Operátorový (obrazový) přenos:
$$F(p) = \frac{x_2(p)}{x_1(p)} = \frac{1}{a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0} = \frac{\frac{1}{a_0}}{\frac{a_2}{a_0} p^2 + \frac{a_1}{a_0} p + 1}$$

jestliže vyjádříme: $\frac{a_2}{a_0} = T^2$, $\frac{a_1}{a_0} = 2 \cdot \xi \cdot T$, $\frac{1}{a_0} = K$

kde: T je časová konstanta, ξ je poměrné tlumení, K je zesílení

můžeme operátorový přenos vyjádřit ve tvaru:
$$F(p) = \frac{K}{T^2 \cdot p^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot p + 1}$$

Pro poměrné tlumení lze odvodit rovnici $\xi = \frac{a_1}{2 \cdot T \cdot a_0} = \frac{a_1}{2 \cdot a_0 \cdot \sqrt{\frac{a_2}{a_0}}} = \frac{a_1}{2 \cdot \sqrt{a_0 \cdot a_2}}$

Poměrné tlumení ξ může nabývat těchto hodnot:

$\xi > 1$ - člen nekmitá – je **přetlumen**

$\xi = 1$ - člen nekmitá – je na **mezi aperiodicity**

$\xi < 1$ - člen kmitá tlumeně

$\xi = 0$ - člen **kmitá netlumeně** (teoretický stav)

pro $\xi < 1$ platí $a_1 < 2 \cdot \sqrt{a_0 \cdot a_2}$ tlumené kmitání,

pro $\xi = 1$ platí $a_1 = 2 \cdot \sqrt{a_0 \cdot a_2}$ na mezi periodicity bez kmitání,

pro $\xi > 1$ platí $a_1 > 2 \cdot \sqrt{a_0 \cdot a_2}$ bez kmitání.

c) **Frekvenční přenos** – obdobně jako operátorový vytvoříme i frekvenční přenos $F(j\omega)$

d) **Frekvenční charakteristika v komplexní rovině**

Průběh frekvenční charakteristiky závisí na hodnotě zesílení K , časové hodnoty T a na velikosti poměrného tlumení ξ . Protože je kmitavý člen vyjádřen diferenciální rovnicí 2. řádu, prochází frekvenční charakteristika dvěma kvadranty komplexní roviny.

Obr. 14. Frekvenční charakteristiky kmitavého členu v komplexní rovině

e) Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích

Průběh charakteristiky závisí na tlumení. Operátorový přenos můžeme zapsat ve tvaru:

$$F(p) = \frac{K}{(T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_2 \cdot p + 1)}.$$
 Frekvence lomů charakteristiky získáme jako kořeny jmenovatele operátorového přenosu: $p_1 = -\frac{1}{T_1}$ a $p_2 = -\frac{1}{T_2}$. Frekvenční přenos pak analogicky:

$$F(j\omega) = \frac{K}{(j\omega \cdot T_1 + 1) \cdot (j\omega \cdot T_2 + 1)}.$$
 Odtud je zřejmé, že si můžeme člen 2. řádu představit i jako sériové spojení dvou členů 1. řádu.

Obr. 15. Frekvenční charakteristiky kmitavého členu v logaritmických souřadnicích

f) Přejchodová charakteristika

Obr. 16. Přejchodové charakteristiky pro různé hodnoty tlumení

Nejrychlejší ustálení nastane, je-li kmitavý člen na mezi periodicity, tj. když $\zeta = 1$.

1.3.1.4. Proporcionální členy vyšších řádů

Jsou to takové obvody nebo zařízení, které obsahují více než dvě energetické kapacity. Může u nich docházet k překmitům podobně jako u členů 2. řádu. Vyjádření jejich vlastností je složitější.

a) Diferenciální rovnice: $a_n \cdot \frac{d^{(n)}x_2(t)}{dt^n} + \dots + a_1 \cdot \frac{dx_2(t)}{dt} + a_0 \cdot x_2(t) = x_1(t)$

Její řád souhlasí s řádem členu. Pro člen n -tého řádu platí:

b) Operátorový (obrazový) přenos: $F(p) = \frac{K}{a_n \cdot p^n + \dots + a_1 \cdot p + a_0}$

c) Frekvenční přenos – obdobně jako operátorový vytvoříme i frekvenční přenos $F(j\omega)$

d) Frekvenční charakteristika v komplexní rovině

Frekvenční charakteristika prochází tolika kvadranty, kolikátého řádu je člen neboli kolikátého řádu je jeho diferenciální rovnice. Začíná v bodě $(K; 0j)$ pro $\omega=0$ a končí v počátku $(\omega \rightarrow \infty)$.

Obr. 17. Frekvenční charakteristiky členů vyšších řádů v komplexní rovině

e) Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích

Amplitudová charakteristika těchto členů má tolik zlomů, kolikátého řádu je člen. Fáze se nad každou frekvencí lomu mění o -90° .

f) Přechodová charakteristika

Obr. 18. Přechodové charakteristiky členů vyšších řádů

Inflexním bodem vedeme tečnu a získáme dva průsečíky. Průsečík s výchozí ustálenou hodnotou, který určuje dobu průtahu T_u určující zpoždění odezvy a průsečík s koncovou ustálenou hodnotou, která určuje dobu náběhu T_n a celkovou dobu přechodu T_p ($T_p = T_u + T_n$). Tyto konstanty charakterizují členy regulačních obvodů a používají se například při identifikaci systému a optimalizaci regulačních obvodů. V regulačních obvodech jsou setrvačné členy vyšších řádů nežádoucí, neboť ztěžují regulaci. Nejčastěji se vyskytují v tepelné technice.

1.3.1.5. Členy s dopravním zpožděním

U těchto členů se výstupní veličina začne měnit v závislosti na vstupní veličině teprve po uplynutí tzv. dopravního zpoždění τ . To se vyskytuje hlavně při regulaci průtoku kapalin nebo při dopravování sypkých hmot. Dopravní zpoždění velmi znesnadňuje regulaci, podobně jako členy vyšších řádů.

a) Diferenciální rovnice: $a_1 \cdot \frac{dx_2(t)}{dt} + a_0 \cdot x_2(t) = x_1(t - \tau)$

Obsahuje-li kterýkoli dynamický člen dopravní zpoždění τ , je účinek stejný, jako by se o hodnotu τ zpožďovala vstupní časová funkce $x_1(t)$. Na pravou stranu diferenciální rovnice proto napíšeme výraz $x_1(t - \tau)$. V L transformaci obraz časové funkce posunutý doprava (zpožděný) o konstantní čas τ získáme, násobíme-li obraz vstupní funkce výrazem $e^{-p\tau}$. Obraz uvedené diferenciální rovnice má pak tvar: $a_1 \cdot p \cdot x_2(p) + a_0 \cdot x_2(p) = x_1(p) \cdot e^{-p\tau}$

b) Operátorový (obrazový) přenos setrvačného členu s dopr. zp.: $F(p) = \frac{K}{T \cdot p + 1} \cdot e^{-p\tau}$

c) Frekvenční přenos setrvačného členu s dopr. zp.: $F(j\omega) = \frac{K}{j\omega \cdot T + 1} \cdot e^{-j\omega\tau}$

d) Frekvenční charakteristika v komplexní rovině a přechodová charakteristika

Frekvenční charakteristika má podobu spirály, neboť vlivem zpoždění se fázový úhel φ zvyšuje o hodnotu $\omega\tau$.

Obr.19. Frekvenční a přechodová charakteristika setrvačného členu s dopravním zpožděním

1.3.2. Derivační člen

1.3.2.1. Ideální derivační člen

Tento člen derivuje vstupní signál $x_1(t)$. Nebo také: výstupní signál $x_2(t)$ je úměrný derivaci vstupního signálu $x_1(t)$.

a) **Diferenciální rovnice:** $a_0 \cdot x_2(t) = \frac{dx_1(t)}{dt}$; po L transformaci: $a_0 \cdot x_2(p) = p \cdot x_1(p)$

b) **Operátorový přenos:** $F(p) = T_d \cdot p$, kde $T_d = \frac{1}{a_0}$ je derivační časová konstant

c) **Frekvenční přenos:** $F(j\omega) = T_d \cdot j\omega$

d) **Frekvenční charakteristika ideálního derivačního členu v komplexní rovině.**

Z frekvenčního přenosu vyplývá, že charakteristika bude začínat v počátku ($|F(j\omega)| = 0$ pro $\omega = 0$). Protože hodnoty přenosu nabývají s rostoucí frekvencí pouze imaginárních hodnot, leží celá charakteristika na kladné imaginární ose a jde do nekonečna.

Obr. 20. Frekvenční charakteristika ideálního derivačního členu v komplexní rovině

e) **Frekvenční charakteristika v logaritmických souřadnicích**

Amplituda přenosu: $|F(j\omega)| = T_d \cdot \omega$. Logaritmická míra přenosu: $F_{dB} = 20 \cdot \log(T_d \cdot \omega)$

Obr. 21. Logaritmické frekvenční charakteristiky ideálního derivačního členu

Přenos je nulový pro $\omega = 0$, proto amplituda přenosu $F_{dB} = -\infty$. Amplitudová charakteristika v celém frekvenčním rozsahu roste se sklonem 20 dB/dek. Osu 0 dB protíná při úhlové frekvenci rovné převrácené hodnotě T_d . Fázová charakteristika je v celém rozsahu konstantní a rovna 90° .

f) **Přechodová charakteristika ideálního derivačního členu:** $x_2(p) = T_d \cdot p \cdot \frac{1}{p} = T_d$

Odezvou tohoto členu na jednotkový skok je Diracův impuls zvětšený T_d krát.

Obr. 22. Přechodová charakteristika ideálního derivačního členu

1.3.2.2. Derivační člen se zpožděním 1. řádu

Skutečný (reálný) derivační člen je však vždy zatížen větší či menší setrvačností. Můžeme si ho tedy představit jako člen složený z ideálního derivačního členu v sérii se setrvačným členem. Přenos tohoto členu určíme tedy jako součin obou dílčích přenosů.

$$F(p) = T_d \cdot p \cdot \frac{1}{T \cdot p + 1}$$

Odtud snadno získáme frekvenční přenos $F(j\omega)$ a dosazováním za ω i všechny frekvenční charakteristiky. L obraz přechodové charakteristiky je pak dán vztahem:

$$x_2(p) = T_d \cdot p \cdot \frac{1}{T \cdot p + 1} \cdot \frac{1}{p} = \frac{T_d}{T \cdot p + 1} \text{ a v časové oblasti (po zpětné transformaci): } x_2(t) = \frac{T_d}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

Obr. 23. Přechodová a frekvenční charakteristika skutečného derivačního členu

1.3.3. Integrační člen

Vlastnosti integračního členu jsou opačné než vlastnosti derivačního členu. Jeho výstupní signál $x_2(t)$ je úměrný integrálu vstupního signálu $x_1(t)$.

1.3.3.1. Ideální integrační člen

a) **Diferenciální rovnice:** $a_1 \cdot \frac{dx_2(t)}{dt} = x_1(t)$, nebo $T_I \cdot x_2'(t) = x_1(t)$, nebo $x_2(t) = k_{-1} \int x_1(t) dt$

Rovnici můžeme vyjádřit několika způsoby. Buď s koeficienty a_1 , $a_0 = 0$, nebo s integrační časovou konstantou T_I , nebo v „integrálním“ tvaru, kde osamostatníme signál $x_2(t)$.

Po L transformaci: $a_1 \cdot p \cdot x_2(p) = x_1(p)$

b) **Operátorový přenos:** $F(p) = \frac{1}{a_1 \cdot p} = \frac{k_{-1}}{p}$; samozřejmě platí: $k_{-1} = \frac{1}{T_I} = \frac{1}{a_1}$

Konstanta k_{-1} bývá někdy nazývána „rychlostní konstanta“ a značena k_v .

Frekvenční přenos a frekvenční charakteristiky určíme stejně jako v předchozích kapitolách.

c) **Frekvenční charakteristiky**

Obr. 24. Frekvenční charakteristiky ideálního integračního členu

d) **Přechodová charakteristika:** $x_2(t) = k_{-1} \cdot t(t)$

Odezvou na jednotkový skok je lineární funkce, jejíž hodnota je zvětšena k_{-1} krát:

$$x_2(p) = \frac{k_{-1}}{p} \cdot \frac{1}{p} = k_{-1} \cdot \frac{1}{p^2}$$

Obr. 25. Přechodová charakteristika ideálního integračního členu

1.3.3.2. Integrační člen se zpožděním 1. řádu

Jednotlivé vlastnosti odvodíme podobně jako u derivačního členu. Přenos ideálního integračního členu vynásobíme přenosem setrvačného členu. Levá strana diferenciální rovnice se rozšíří o derivaci prvního řádu s časovou konstantou (zpožděním) T_1 .

a) **Diferenciální rovnice:** $T_1 \cdot x_2'(t) + x_2(t) = \int x_1(t) dt$

b) **Operátorový přenos:** $F(p) = \frac{1}{1 + T_1 \cdot p} \cdot \frac{k_{-1}}{p} = \frac{\frac{k_{-1}}{p}}{1 + T_1 \cdot p}$

c) Frekvenční a přechodové charakteristiky

Obr. 26. Frekvenční a přechodové charakteristiky integračního členu se zpožděním 1. řádu

Z tvaru diferenciální rovnice a charakteristik je zřejmá příbuznost integračního členu se setrvačným členem. Setrvačný člen může nahradit integrační člen (mají podobnou charakteristiku) v časech t nejméně třikrát kratších, než je časová konstanta daného setrvačného členu.

1.4. Regulované systémy

Regulovaný systém je zařízení nebo jeho část, na kterém se provádí regulace a v němž se ovlivňuje regulovaná veličina. Vstupním signálem systému je akční veličina u , výstupním signálem je regulovaná veličina y . Dalšími vstupními veličinami jsou poruchy z , jejichž účinek na regulovaný systém má být regulací odstraněn. Většina systémů má tu vlastnost, že se po skokové změně akční veličiny regulovaná veličina sama ustálí. Tyto systémy nazýváme *statické* na rozdíl od *astatických*, u nichž se po skokové změně akční veličiny regulovaná veličina trvale mění.

Regulované systémy, jako jedny ze členů regulačních obvodů, budou mít i podobné vlastnosti, které byly uvedeny v předchozí kapitole. Koeficienty v diferenciální rovnici regulovaného systému a v operátorovém přenosu systému budeme značit s .

1.4.1. Statické regulované systémy 0. řádu

a) Diferenciální rovnice: $s_0 \cdot y(t) = u_s(t)$

b) Operátorový (operátorový) přenos: $F(p) = \frac{1}{s_0}$

c) Frekvenční přenos: $F(j\omega) = \frac{1}{s_0}$

d) Kmitočtová a přechodová charakteristika

Obr. 27. Kmitočtová a přechodová charakteristika regulované systémy 0. řádu

1.4.2. Statické regulované systémy 1. řádu

a) Diferenciální rovnice: $s_1 \cdot y'(t) + s_0 \cdot y(t) = u_s(t)$

b) Operátorový (operátorový) přenos: $F(p) = \frac{1}{s_1 \cdot p + s_0}$

c) Frekvenční přenos: $F(j\omega) = \frac{1}{s_1 \cdot j\omega + s_0}$

d) Kmitočtová a přechodová charakteristika

Obr. 28. Frekvenční a přechodové charakteristiky statických regulovaných systémů 1. řádu

Obr. 29. Příklady regulovaných systémů 1. řádu

1.4.3. Statické regulované systémy 2. řádu

a) **Diferenciální rovnice:** $s_2 \cdot y''(t) + s_1 \cdot y'(t) + s_0 \cdot y(t) = u_s(t)$

b) **Operátorový (obrazový) přenos:** $F(p) = \frac{1}{s_2 \cdot p^2 + s_1 \cdot p + s_0}$

c) **Frekvenční přenos:** $F(j\omega) = \frac{1}{s_2 \cdot (j\omega)^2 + s_1 \cdot j\omega + s_0}$

d) **Frekvenční a přechodová charakteristika**

Obr. 30. Frekvenční a přechodová charakteristika statické regulované systémy 2. řádu

Obr. 31. Příklady regulovaných systémů 2. řádu

1.4.4. Astatické systémy 1. řádu

Astatické systémy se od statických liší tím, že nemají samoregulační schopnost. V jejich diferenciální rovnici a v přenosu chybí činitel s_0 . Je zřejmé, že astatický systém 0. řádu neexistuje. Typickým zástupcem této skupiny systémů je nádrž s nuceným odtokem (konstantní odtok určený např. čerpadlem – může být i roven 0) ve které je pohyb výšky hladiny úměrný velikosti přítoku. Podobný je i vztah mezi rychlostí pohybu a ujetou vzdáleností, nebo počtem otáček kol. Také sem patří systémy, kde směr pohybu závisí na úhlu natočení směrových kol (pozemní mobilní prostředky).

a) **Diferenciální rovnice:** $s_1 \cdot y'(t) = u_s(t)$

b) **Přenos:** $F(p) = \frac{1}{s_1 \cdot p}$

c) **Frekvenční přenos:** $F(j\omega) = \frac{1}{s_1 \cdot j\omega}$

d) **Frekvenční a přechodové charakteristiky**

Obr. 32. Frekvenční a přechodové charakteristiky astatické systémy 1. řádu a jejich příklady

1.4.5. Astatické systémy 2. řádu

Tyto systémy mají další setrvačnost, která se projeví zpožděním reakce. To je typické pro dopravní systémy na vodě a ve vzduchu. Natočení kormidla trajektu se projeví až po určité době závislé na kinetické energii lodě a pokud je kormidlo trvale natočeno začne loď trvale měnit směr pohybu, tj. pluje v kruhu. Podobně reagují letadla, neboť vzduch klade poměrně malý odpor vůči jejich pohybu, a proto se projeví více jejich setrvačnost v původním směru pohybu.

a) **Diferenciální rovnice:** $s_2 \cdot y''(t) + s_1 \cdot y'(t) = u_s(t)$

b) Přenos: $F(p) = \frac{1}{s_2 \cdot p^2 + s_1 \cdot p}$

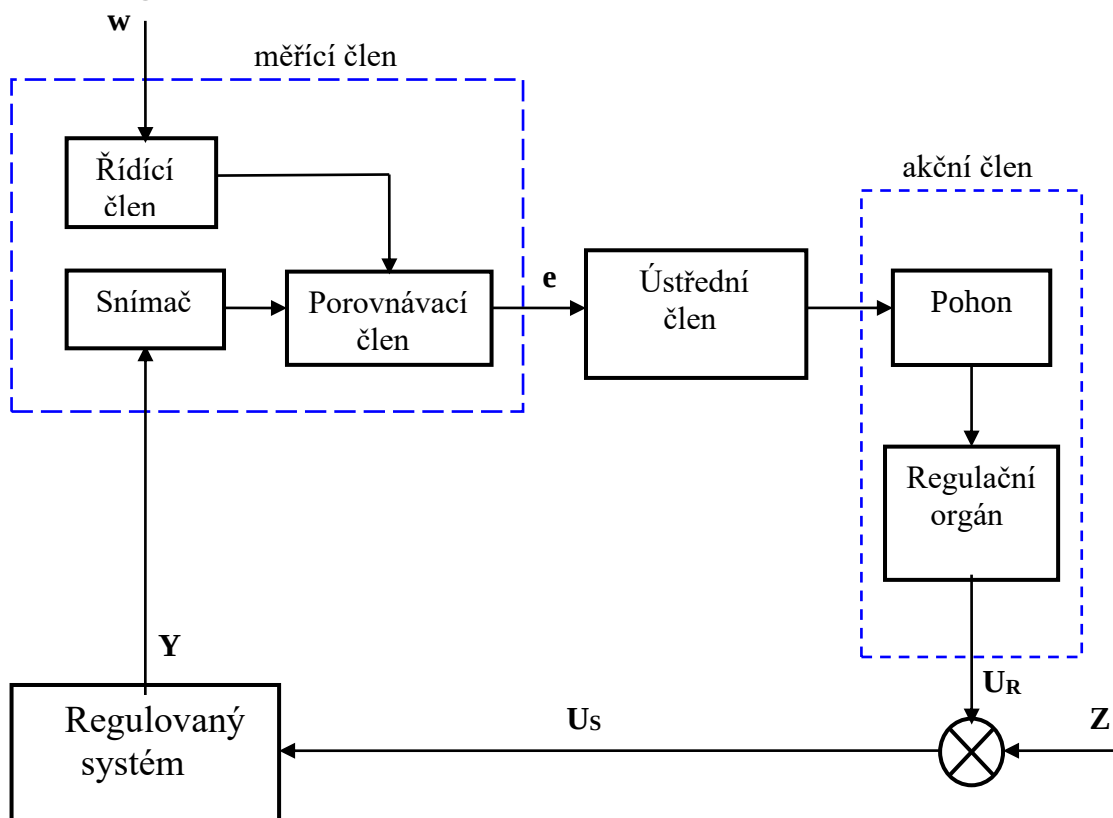
c) Frekvenční přenos: $F(j\omega) = \frac{1}{s_2 \cdot (j\omega)^2 + s_1 \cdot j\omega}$

d) Frekvenční a přechodové charakteristiky

Obr. 33. Frekvenční charakteristika astatického systému 2. řádu a její příklad

1.5. Regulátory

1.5.1. Skladba regulátoru



Regulátor se většinou skládá ze tří funkčních částí, které mohou být více či méně od sebe funkčně i konstrukčně odděleny. Jsou to *měřicí člen*, *ústřední člen* a *akční člen*.

Snímač měřicího členu zjišťuje průběh regulované veličiny a mění jej na signál, vhodný ke zpracování v dalších členech regulátoru. Konstrukce snímače je dána druhem a velikostí regulované veličiny a druhem regulátoru. Výstupní signál snímače, úměrný okamžité hodnotě regulované veličiny, se v porovnávacím členu srovnává se žádanou hodnotou, nastavenou řídicím členem. Výstup porovnávacího členu, který je úměrný regulační odchylce, se zavádí do ústředního členu. To je hlavní část regulátoru, proto se často nazývá regulátor v užším slova smyslu. Skládá se zpravidla z několika funkčních celků, které provádějí vlastní řídicí funkce regulátoru. Jeho výstupní signál ovládá akční člen. Ten se skládá z pohonu a regulačního orgánu a řídí tok energie do regulovaného systému.

1.5.2. Rozdělení regulátorů

Regulátory můžeme dělit podle jejich činnosti na několik skupin:

1. Dělení regulátorů podle druhu energie, s níž pracují

a) Mechanické regulátory:

- obsahují pouze mechanické členy (páky, převody, roztěžníky, drátovody, transmise, ventily ...)
- nejsou příliš přesné ani rychlé, jsou rozměrné a jejich výhodou je jednoduchost, nízká cena, vysoká spolehlivost a životnost a snadná oprava

b) Pneumatické regulátory:

- jsou vhodné v provozech, kde je realizován rozvod tlakového vzduchu, ve výbušném prostředí (prašné provozy, výbušné plyny ...) a biologicky exponovaných provozech
- vzhledem k velké poddajnosti vzduchu mají měkkou charakteristiku (často výhodná vlastnost)
- využívají ventilů, membrán, clonek, trysek, vlnovců, vzduchových válců atd.
- jsou provozně nenáročné, přesnost a rychlost vyhovují pro méně náročné aplikace

c) Hydraulické regulátory:

- využívají k napájení hydraulickou kapalinu (olej)
- vzhledem k nestlačitelnosti kapalin mohou dosahovat velkou sílu a rychlost
- hydraulický rozvod je realizován tlakovými hadicemi, různými ventily apod. je zde kladen velký důraz na těsnost
- hmotnost kapaliny a pohyblivých částí zhoršuje dynamické vlastnosti, přesnost regulace je většinou uspokojivá
- předností je spolehlivost a snadné provádění oprav, proto se používají v těžkých provozech

d) Elektrické regulátory

- používají k napájení elektrickou energii
- dříve se v regulačních obvodech využívali různé elektrické stroje (transformátory, přesytky, dynama, točivé a magnetické zesilovače, různá soustrojí např. Ward-Leonard)
- dnes se používají elektronické regulátory, pouze akční členy jsou elektromechanické (relé, stykače, elektromagnety, servopohony, motory s měniči atd.)
- největší výhodou elektronických regulátorů je vysoká kvalita regulace (vysoká přesnost a rychlost), malé rozměry a malá hmotnost, vysoká energetická účinnost, čistý a bezhlučný provoz s minimální údržbou, dostupnost součástek a relativně nízká cena.
- nevýhodou je větší složitost, která komplikuje opravy, citlivost na elektromagnetické pole, někdy tyto regulátory samy produkují rušivé signály – nutnost důkladného odrušení
- s rostoucí spolehlivostí a dostupností integrovaných obvodů vzrostla i spolehlivost těchto systémů.

2. Dělení regulátorů podle způsobu napájení

a) Přímé (direktivní) regulátory

Odebírají energii pro svou činnost z regulovaného systému. Jde o jednoduché, nejčastěji mechanické regulátory bez velkých nároků na kvalitu regulace (Wattův regulátor otáček u parních strojů, plovákový regulátor hladiny).

Zvláštní skupinu tvoří systémy s přepadem. Tento princip se používá při regulaci výšky hladiny, u tlakového hrnce, ale i u paralelních stabilizátorů napětí (stabilizační dioda).

Nevýhodou těchto regulátorů je ztráta části energie, a proto i nízká účinnost. Výhodou je neobyčejná jednoduchost a velká spolehlivost. Tento způsob se používá s výhodou k jištění horních mezí hodnot různých veličin.

b) Nepřímé (indirektivní) regulátory

Odebírají energii pro svou činnost ze zvláštního napájecího zdroje (elektrického zdroje stejnosměrného napětí, rozvodu tlakového vzduchu, tlakového oleje atd.). Vyznačují se větší složitostí a tomu odpovídající vyšší kvalitou regulace. Podle přenosových vlastností (podle způsobu zpracování regulační odchylky e) je dělíme na proporcionální (P), integrační (I), derivační (D) a jejich kombinace PI, PD a PID.

3. Dělení regulátorů podle průběhu přenášeného signálu

a) Spojité regulátory

Pracují se spojitými signály, a proto jejich hlavními stavebními prvky jsou operační zesilovače. Kvalita regulace je vysoká, jejich návrh je poměrně snadný. Pro velké výkony je však nevýhodná jejich menší energetická účinnost.

b) Nespojité (impulsové) regulátory

Pracují s nespojitými signály. Můžeme je dále rozdělit na regulátory nespojité v čase (diskrétní) a nespojité v amplitudě (dvou a vícepolohové). Díky spínacímu režimu aktivních prvků dosahují velmi vysoké účinnosti. Mohou být velmi jednoduché (při nižší kvalitě regulace) nebo složitější, je-li třeba dosahovat stejné kvality, jakou dosahují spojitý regulátory (tzv. kvazispojitý regulátory).

Nevýhodou nespojitých regulátorů je vznik rušení jako důsledek širokého frekvenčního spektra, způsobeného vyššími harmonickými signály, vznikajícími při spínání.

1.5.3. Vlastnosti regulátorů

a) Proporcionální regulátor „P“

Proporcionální regulátor pouze zesiluje regulační odchylku e , přičemž zesílení je v širokém frekvenčním rozsahu konstantní. Teprve při vysokých frekvencích, které nejsou pro daný systém podstatné, jeho přenos vlivem setrvačnosti klesá. Jedná se tedy o proporcionální člen s konstantním reálným přenosem mnohem větším než jedna. Tento regulátor snadno vytvoříme stejnosměrným invertujícím zesilovačem.

Diferenciální rovnice: $u_R(t) = k_0 \cdot e(t)$

Operátorový přenos: $F(p) = k_0$

Obr. 34. Základní zapojení proporcionálního regulátoru

Výstupní napětí U_2 se potom rovná: $U_2 = -\frac{R_0}{R_1} \cdot U_1 = K \cdot U_1$

Jestliže zdroj vstupního signálu nemá nulový odpor R_G , musíme jeho velikost přičíst k R_1 .

Potom: $K = -\frac{R_0}{R_1 + R_G}$

Skutečné regulátory nemají přenos ideálně konstantní, tedy nezávislý na frekvenci. Proporcionální regulátor je velmi levný, jednoduchý a stabilní. Je však nevýhodný tím, že pracuje s trvalou regulační odchylkou. Tu nelze u proporcionálního regulátoru odstranit, můžeme však ovlivnit její velikost změnou zesílení (změnou pásma proporcionality – viz dále). Zvětšením zesílení se sice zmenšuje trvalá regulační odchylka, ale zmenšuje se i stabilita obvodu.

Proporcionální regulátory nejsou vhodné pro regulované systémy bez setrvačnosti, neboť již při malém zesílení je regulační obvod náchylný k vysokofrekvenčnímu kmitání. Tento nedostatek odstraňujeme zavedením setrvačnosti do systému. Dále jsou tyto regulátory nevhodné pro systémy vyšších řádů s dobou průtahu T_u převyšující desetinu doby náběhu T_n ($T_u > 0,1 \cdot T_n$) a pro systémy s dopravním zpožděním.

b) Integrační regulátor „I“

Regulátor **I** jako jediný umožňuje úplné odstranění regulační odchylky e , neboť ta je regulátorem integrována. To znamená, že i ty nejmenší odchylky díky integraci narostou s časem a jsou po určité době „vynulovány“. Integrační regulátor lze též realizovat pomocí stejnosměrného invertujícího zesilovače.

Obr. 35. Základní zapojení integračního regulátoru

I zde můžeme vyjádřit přenos jako poměr zpětnovazební impedance a vstupního odporu.

Diferenciální rovnice: $u_R(t) = k_{-1} \cdot \int e(t) dt$

Operátorový přenos: $F(p) = -\frac{\frac{1}{p \cdot C}}{R} = -\frac{1}{p \cdot C \cdot R} = \frac{k_{-1}}{p}$

Činnost tohoto integračního regulátoru je velmi uspokojivá. Parazitní setrvačnosti se uplatňují až při vyšších frekvencích, kdy je přenos regulátoru **I** již stejně velmi malý. Amplitudová frekvenční logaritmická charakteristika má v oblasti nízkých frekvencí sklon -20 dB/dek a protíná úroveň 0 dB při frekvenci $\omega = 1/RC$. Fázovou frekvenční charakteristikou je přímka v úrovni -90° .

Přechodová charakteristika je přímka z počátku, jejíž strmost je nepřímo úměrná časové konstantě RC .

Integrační regulátor je i v kombinacích s jinými typy regulátorem, který umožňuje (za určitou dobu) zcela odstranit regulační odchylku. Nevýhodou je pokles zesílení se zvyšující se frekvencí, takže regulátor pomalu odstraňuje poruchy. Regulátor **I** je velmi vhodný pro statické regulované systémy bez setrvačnosti, jeho zesílení může být velmi vysoké bez nebezpečí rozkmitání. Je nejvhodnější, ze všech ostatních typů pro regulaci statických systémů s dopravním zpožděním. U těchto systémů nejvíce hrozí rozkmitání regulačního obvodu, a proto musíme nastavit menší zesílení regulátoru. Je méně vhodný pro regulaci systémů vyšších řádů, u nich se lépe uplatní regulátor **PI**.

Nelze jej použít u astatických systémů, neboť by takovýto regulační obvod byl nestabilní.

c) Derivační regulátor „D“

Ideální regulátor **D** nelze realizovat. Způsobují to parazitní setrvačnosti, které potlačují přenos při vysokých frekvencích. Ideální přenos určuje opět poměr odporu ve zpětné vazbě a impedance ve vstupu.

Diferenciální rovnice: $u_R(t) = k_1 \cdot e'(t)$

Operátorový přenos: $F(p) = -\frac{R}{\frac{1}{p \cdot C}} = -p \cdot C \cdot R = -p \cdot T_D = k_1 \cdot p$

kde $T_D = k_1 = R \cdot C$ je derivační časová konstanta.

Obr. 36. Základní zapojení a charakteristiky derivačního regulátoru

Pokud bychom chtěli vyjádřit přenos skutečného derivačního členu, musíme výraz vynásobit přenosem parazitního setrvačného členu s časovou konstantou T .

Z charakteristik vyplývá, že derivační regulátor má při konstantním vstupu (stejnoseměrný signál) nulový přenos. Samotný derivační regulátor nezesiluje regulační odchylku, a musí být, proto vždy kombinován s proporcionálním regulátorem. V této kombinaci derivační regulátor zrychluje regulaci a zvyšuje stabilitu, což má velký význam pro odstranění krátkodobých a četných poruch.

Kombinace základních typů regulátorů

Tyto kombinace realizujeme v podstatě třemi způsoby:

- *Paralelním řazením* regulátorů výchozích typů – dosahuje se tak nejlepších výsledků, je však nutný velký počet zesilovačů.
- *Použitím korekčních členů* – využívají zpravidla pouze jeden zesilovač, kvalita je však nižší.
- *Zpětnovazebním zapojením* – využívají zpravidla pouze jeden zesilovač, kvalita je vyhovující.

d) Proporcionálně integrační regulátor „PI“

V elektronické verzi vznikne paralelním spojením regulátoru **P** a **I**.

Diferenciální rovnice: $u_R(t) = k_0 \cdot e(t) + k_{-1} \cdot \int e(t) dt$

Operátorový přenos: $F(p) = k_0 + \frac{k_{-1}}{p} = k_0 + \frac{1}{T_i \cdot p}$

Obr. 37. Různé způsoby realizace regulátoru PI

Obr. 38. Charakteristiky regulátoru PI

Přechodová charakteristika vznikne součtem obou dílčích přechodových charakteristik.

Proporcionálně integrační regulátory mají oproti integračnímu regulátoru větší přenos na vyšších frekvencích, takže rychleji odstraňují nárazové poruchy. Jsou nejrozšířenějšími kombinovanými regulátory, neboť mají téměř univerzální použití a nejsou příliš složité. Úplně odstraňují regulační odchylku, zpravidla vyhovujícím způsobem odstraňují poruchy vstupující do regulovaného systému a ve většině případů zlepšují stabilitu regulačního obvodu.

Nejvíce se používají při regulaci kmitavých systémů druhého i vyšších řádů. Čím je řád systému vyšší, tím více musíme zmenšovat zesílení k_0 , popřípadě zmenšovat konstantu k_{-1} . Pro statické systémy s dopravním zpožděním je lepší než regulátor I.

e) Proporcionálně derivační regulátor „PD“

Vznikne například paralelním spojením regulátoru **P** a **D**.

Diferenciální rovnice: $u_R(t) = k_0 \cdot e(t) + k_1 \cdot e'(t)$

Operátorový přenos: $F(p) = k_0 + k_1 \cdot p = k_0 + T_d \cdot p$

Obr. 39. Různé způsoby realizace proporcionálně derivačního regulátoru

Obr. 40. Charakteristiky proporcionálně derivačního regulátoru

Jsou vhodné všude tam, kde vyhovuje regulátor **P**. Proporcionálně derivační regulátory mají proti proporcionálním větší přenos na vyšších frekvencích. Používají se při četných poruchách, protože velmi rychle potlačují tlumené kmity vznikající v regulovaných systémech vyšších řádů. Neodstraňují zcela regulační odchylku, pouze ji zmenšují.

f) Proporcionálně integračně derivační regulátor „PID“

Regulátor PID vznikne například paralelním spojením regulátorů **P**, **I**, a **D**.

Diferenciální rovnice: $u_R(t) = k_0 \cdot e(t) + k_{-1} \int e(t) dt + k_1 \cdot e'(t)$

Operátorový přenos: $F(p) = k_0 + \frac{k_{-1}}{p} + k_1 \cdot p = k_0 + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d \cdot p$

Obr. 41. Různé způsoby provedení proporcionálně integračně derivačního regulátoru

Obr. 42. Charakteristiky PID regulátoru

Pro větší složitost se používají v případech, kdy chceme úplně odstranit trvalou regulační odchylku a zároveň rychle kompenzovat poruchy nebo vlastní kmity systému.

Jsou vhodné všude tam, kde vyhovují regulátory **PI**. Oproti nim jsou rychlejší, takže tlumí rychlé překmity regulované veličiny.

Nastavení optimálních hodnot koeficientů vyžaduje u tohoto regulátoru hlubší znalosti a zkušenosti, proto není vhodný pro situace, kde není mnoho času na optimalizaci a technik není dostatečně znalý problematiky. Jeho použití může mít i kontraproduktivní dopad, tj. dosažená kvalita může být nižší než použití jednoduššího typu regulátoru s jednodušším nastavením.

1.6. Algebra blokových schémat

Z předešlých kapitol je zřejmé, že jedním z důležitých prostředků pro popis členů regulačních obvodů je obrazový přenos $F(p)$. Z něj můžeme určit charakteristiky, rovnice a chování daného obvodu. U složitějších obvodů můžeme přenos určit měřením vstupních a výstupních veličin. Existují ovšem metody, pomocí nichž můžeme určit přenos složitějších obvodů výpočtem, známe-li dílčí přenosy jednotlivých částí obvodů. K tomu je potřeba znát určitá pravidla, pomocí nichž určíme přenos většího celku skládajícího se z různě zapojených dynamických členů známých přenosů. Tato pravidla jsou určena tzv. *algebrou blokových schémat* neboli *blokovou algebrou*. Jednotlivé dynamické členy jsou zastoupeny bloky, které jsou určeny známými přenosy. Kromě bloků se v blokových schématech používají součtové a rozdílové členy.

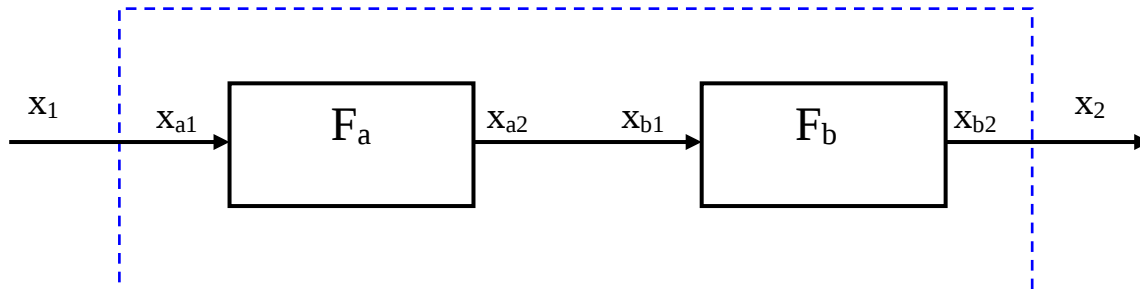
V blokové algebře platí komutativní zákon (nezáleží na pořadí bloků, popř. jejich přenosů při výpočtech) a princip superpozice (obecný vstupní signál můžeme rozložit na jeho složky a po jejich průchodu dynamickým členem složky opět sečíst, aniž by se výsledný signál lišil od signálu vyvolaného průchodem téhož nerozloženého signálu).

Zavedení blokové algebry je možné, pokud jsou splněny následující podmínky:

- všechny členy jsou lineární,
- člen připojený vstupem k výstupu předcházejícího členu nesmí ovlivňovat přenos předcházejícího členu,
- signály v blokovém schématu postupují výhradně ve směru šipek.

Poznámka: při odvozování se příslušné přenosy, vstupní a výstupní funkce uvádí bez jejich proměnné v závorce. Výrazy se tak stanou více přehlednými. Samozřejmě při ostatních zápisech se na to nesmí zapomenout. Bude se tedy používat F místo $F(p)$, x_1 místo $x_1(p)$ atd.

1.6.1. Sériové řazení bloků



Obr. 43. Sériové řazení bloků

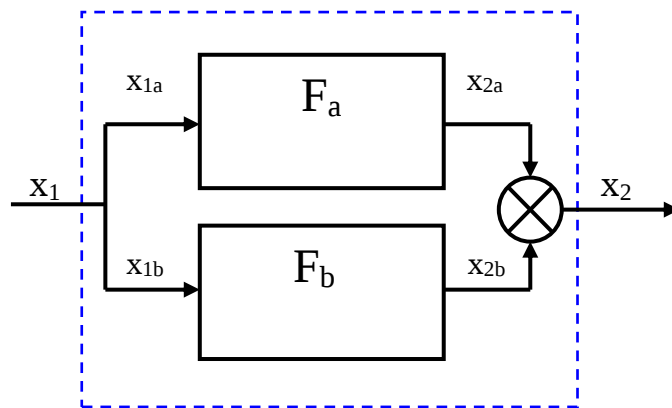
Přenosy jednotlivých bloků jsou: $F_a = \frac{x_{a2}}{x_{a1}}$, $F_b = \frac{x_{b2}}{x_{b1}}$

Z obrázku je patrné, že platí: $x_1 = x_{a1}$; $x_{a2} = x_{b1}$; $x_{b2} = x_2$

Potom: $F = \frac{x_2}{x_1} = \frac{x_{b2} \cdot x_{a2}}{x_{b1} \cdot x_{a1}} = F_a \cdot F_b$ a z toho obecně $F = \prod_i F_i$

U sériově řazených členů je tedy výsledný přenos dán součinem dílčích přenosů. Platí to samozřejmě obecně pro jakýkoli počet sériově řazených členů.

1.6.2. Paralelní řazení bloků



Obr. 44. Paralelní řazení bloků

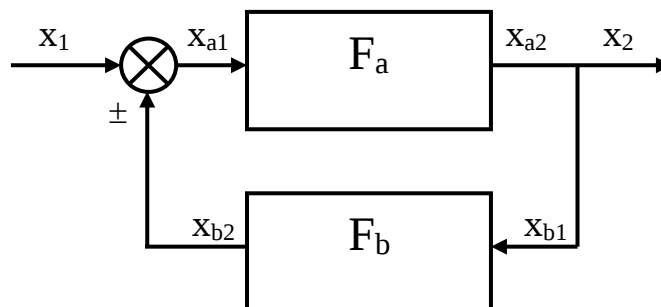
Přenosy jednotlivých bloků jsou: $F_a = \frac{X_{a2}}{X_{a1}}$, $F_b = \frac{X_{b2}}{X_{b1}}$

Z obrázku je patrné, že platí: $x_1 = x_{a1} = x_{b1}$; $x_2 = x_{a2} + x_{b2}$

Potom: $F = \frac{x_2}{x_1} = \frac{x_{a2} + x_{b2}}{x_1} = \frac{x_{a2}}{x_{a1}} + \frac{x_{b2}}{x_{b1}} = F_a + F_b$ a z toho obecně $F = \sum_i F_i$

Při paralelním řazení tak platí, že celkový přenos obvodu se rovná součtu jejich dílčích přenosů.

1.6.3. Zpětnovazební řazení bloků (antiparalelní)



Obr. 45. Zpětnovazební řazení bloků

Přenosy jednotlivých bloků jsou: $F_a = \frac{X_{a2}}{X_{a1}}$, $F_b = \frac{X_{b2}}{X_{b1}}$

Z obrázku je patrné, že platí: $x_1 = x_{a1} \pm x_{b2}$; $x_2 = x_{a2} = x_{b1}$

Potom: $F = \frac{x_2}{x_1} = \frac{x_{a2}}{x_{a1} \mp x_{b2}} = \frac{\frac{x_{a2}}{x_{a1}}}{1 \mp \frac{x_{b2} \cdot x_{a2}}{x_{a1} \cdot x_{b1}}} = \frac{F_a}{1 \mp F_a \cdot F_b}$

Blokem F_a se signál přenáší zleva doprava, tzn. přímo od vstupu k výstupu. Proto se tato část obvodu nazývá „přímá větev“. Blokem F_b se signál přenáší zprava doleva, tedy zpětně od výstupu ke vstupu obvodu. Tato část se nazývá „zpětnovazební větev“. Oběma bloky se signál přenáší v kruhu (ve smyčce) Tato část obvodu se nazývá „uzavřená smyčka“.

1.6.4. Kombinované řazení bloků

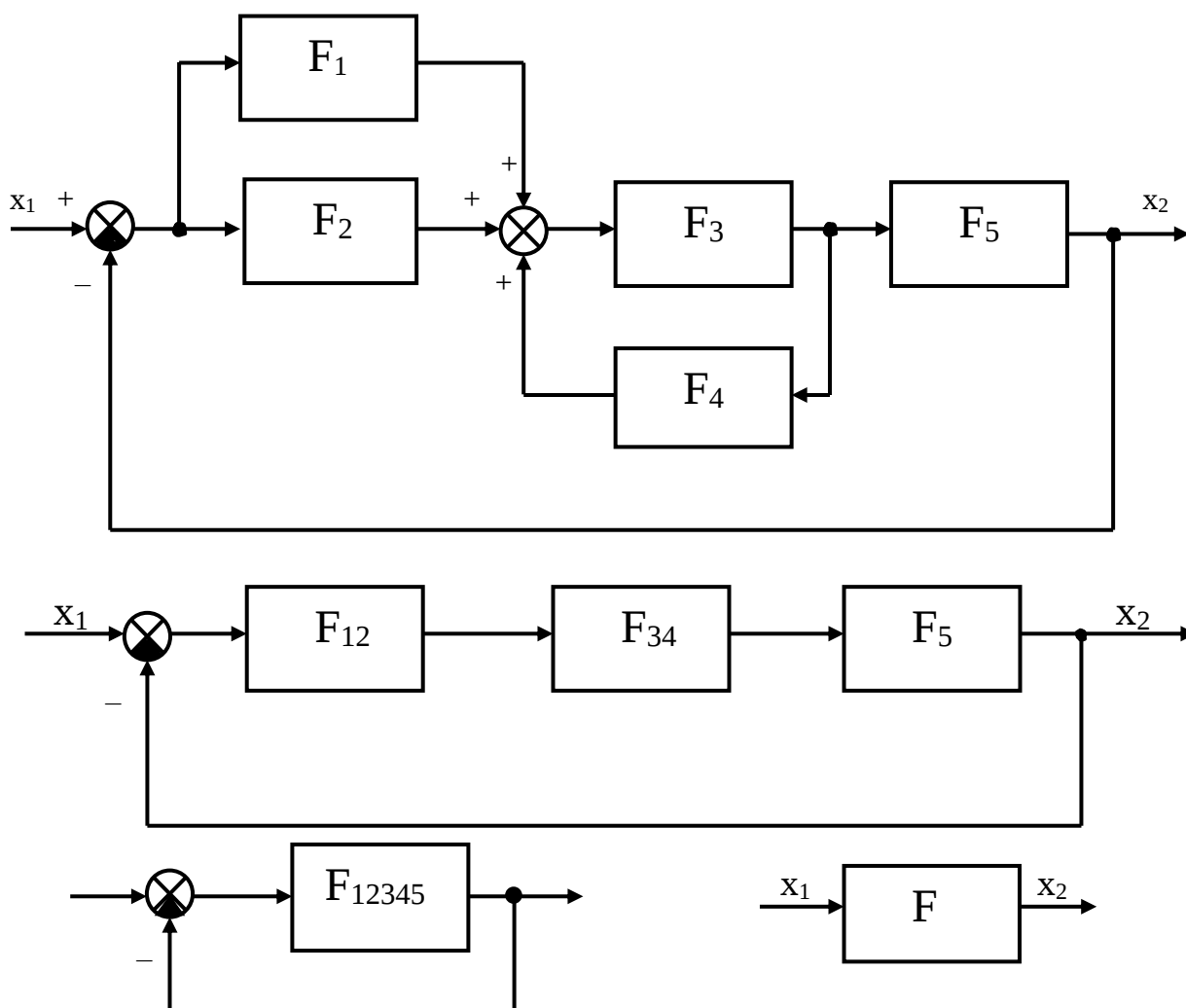
Při výpočtu celkového přenosu složitých obvodů složených z kombinací předešlých základních zapojení tyto obvody postupně zjednodušujeme, až získáme jediný blok. Zjednodušovat začínáme zevnitř obvodu a bloky které vznikly složením jiných, označujeme příslušnými „složenými“ indexy.

Na následujícím příkladu si ukážeme postup při zjednodušování obvodu. Vidíme, že bloky F_1 a F_2 jsou spojeny paralelně, bloky F_3 a F_4 jsou v antiparalelním (zpětnovazebním zapojení), do série k předchozím blokům je zapojen blok F_5 a celý obvod obsahuje zápornou zpětnou vazbu.

Po úpravě nám vzniknou bloky F_{12} , F_{34} a F_5 zapojené v sérii. Po další úpravě vznikne blok F_{12345} se zápornou zpětnou vazbou, z kterého určíme výsledný přenos F .

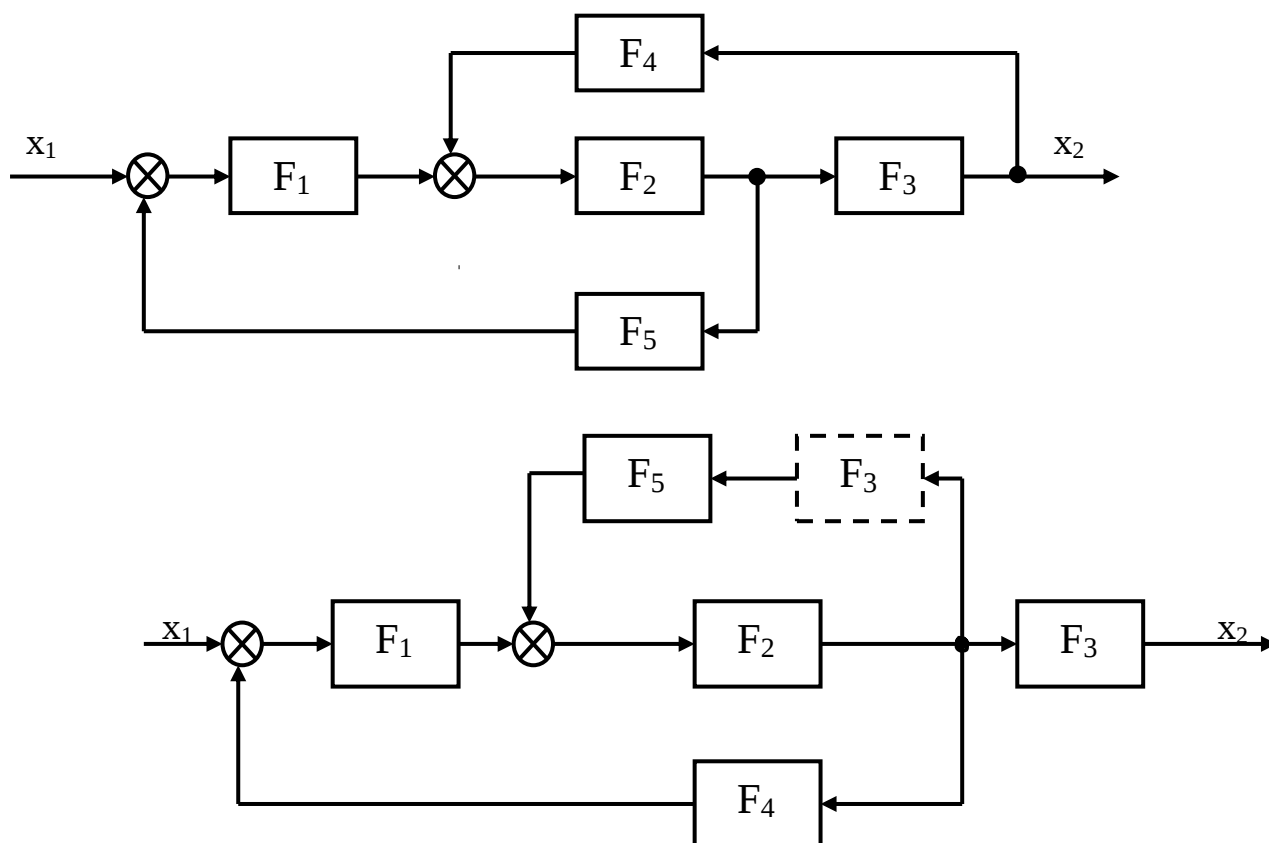
Pro následující obvod pak platí vztahy:

$$F_{12} = F_1 + F_2, \quad F_{34} = \frac{F_3}{1 - F_3 \cdot F_4}, \quad F_{12345} = F_{12} \cdot F_{34} \cdot F_5, \quad F = \frac{F_{12345}}{1 + F_{12345}}$$



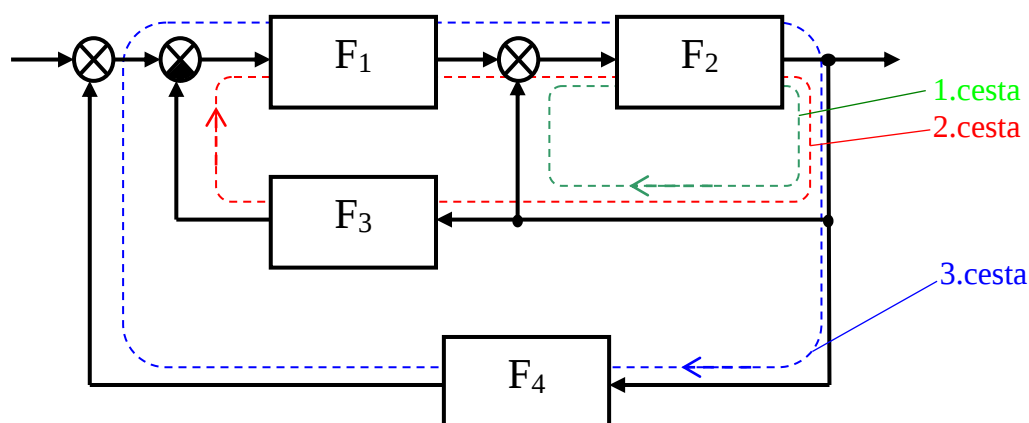
Obr. 46. Příklad zjednodušování kombinovaných obvodů

Jestliže se v obvodu kříží zpětné vazby, musíme toto křížení odstranit zařazením takových myšlených členů, které zajišťují, že se přenos nezmění. Na následujícím obrázku (obr. 47.) je vidět, že se křížení zpětných vazeb odstranilo zařazením myšleného přenosu (bloku) F_3 . Potom již můžeme obvod zjednodušit podle předcházejících pravidel.



Obr. 47. Příklad úpravy obvodu při „křížených“ zpětných vazbách

Další způsob, jak zjednodušit složitější obvody, je na následujícím obrázku (obr. 48.). Postupujeme podle jednoduchého pravidla: do čitatele výsledného přenosu zapíšeme přenos přímé cesty a do jmenovatele k jedničce připočteme (při kladné vazbě odečteme) přenosy všech zpětnovazebních cest.



Obr. 48. Rychlé určení výsledného přenosu

Výsledný přenos se může rovnou psát:
$$F = \frac{F_1 \cdot F_2}{1 - F_2 + F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 - F_1 \cdot F_2 \cdot F_4}$$

2. Regulační technika

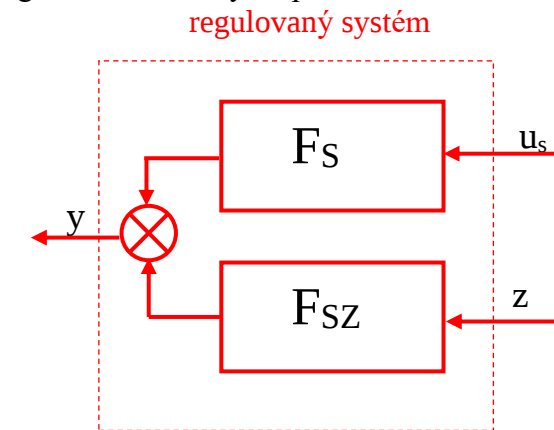
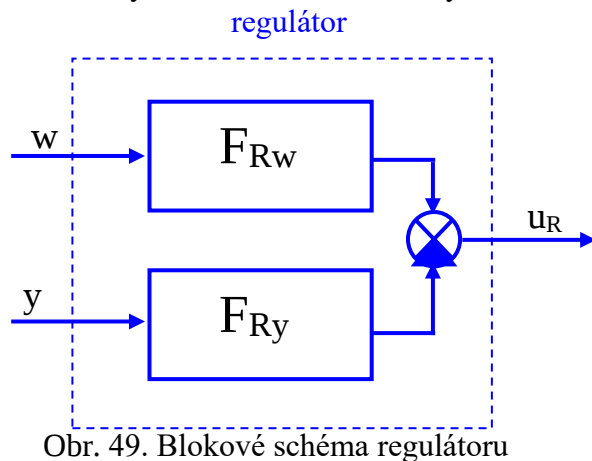
2.1. Regulační obvody se spojitými regulátory

2.1.1. Vlastnosti uzavřeného a otevřeného regulačního obvodu

Z předchozích kapitol víme, že regulační obvod je tvořen regulovaným systémem a regulátorem, a že časový průběh regulované veličiny po změně rovnovážného stavu se nazývá regulační pochod. Průběh regulačního pochodu je závislý na tom, jaký signál způsobil změnu rovnovážného stavu. Vzhledem k tomu, že do regulačního obvodu vstupují z vnějšku dva signály, řídicí veličina a porucha, musíme je obě při vyšetřování uvažovat.

Pro regulátor jsou vstupními signály regulovaná a řídicí veličina, výstupem je akční veličina. Pro sestavení rovnic regulátoru je proto rozdělujeme na dva bloky, přičemž jedním vyjadřujeme závislost akční veličiny na regulované, druhým závislost akční veličiny na řídicí veličině. Dostaneme tak dva přenosy.

Podobně i blok regulovaného systému rozdělíme na dva. Jedním vyjadřujeme závislost regulované veličiny na veličině akční, druhým závislost regulované veličiny na poruše.



Přenosy regulátoru:

$$F_{Ry} = \frac{u_R}{y} \quad \text{při } w = \text{konst.}$$

$$F_{Rw} = \frac{u_R}{w} \quad \text{při } y = \text{konst.}$$

Rovnice regulátoru:

$$u_R = F_{Rw} \cdot w - F_{Ry} \cdot y$$

Přenosy regulovaného systému:

$$F_S = \frac{y}{u_s}$$

$$F_{Sz} = \frac{y}{z}$$

Rovnice regulovaného systému:

$$y = F_S \cdot u_s + F_{Sz} \cdot z$$

$$\text{takže } u_s = (y - F_{Sz} \cdot z) / F_S$$

Sestavíme schéma celého uzavřeného obvodu. Musíme vzít v úvahu, že se signál po průchodu regulátorem vrací do systému s opačným znaménkem, aby působil proti změnám v systému.

Platí: $u_R = u_S$

Což je podmínka uzavření regulačního obvodu. Regulační obvod vznikl spojením regulovaného systému s regulátorem, a proto i rovnici obvodu vytvoříme spojením rovnice systému a regulátoru. Potom výsledná rovnice regulačního obvodu bude:

$$(F_{Ry} \cdot F_S + 1) \cdot y = F_{Rw} \cdot F_S \cdot w + F_{Sz} \cdot z$$

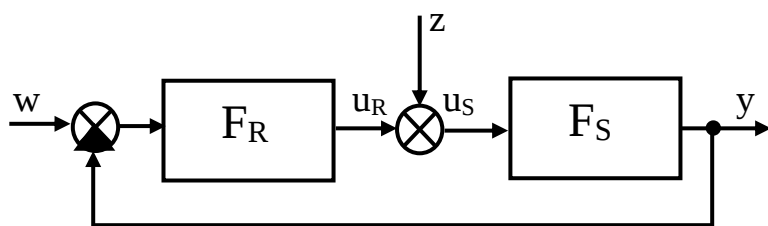
Rovnici můžeme dále zjednodušit s ohledem na to, že se řídicí veličina porovnává s regulovanou veličinou, což je při vhodném uspořádání regulátoru běžné. Potom platí:

$$F_{Ry} = F_{Rw} = F_R$$

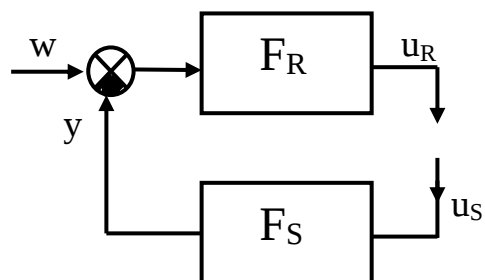
Rovnice uzavřeného regulačního obvodu pak bude:

$$(1 - F_0) \cdot y = -F_0 \cdot w + F_{Sz} \cdot z$$

kde $F_0 = -F_R \cdot F_S$ je přenos regulátoru a systému v sérii nebo také přenos otevřeného (rozpojeného) regulačního obvodu. Budeme-li předpokládat, že poruchová veličina vstupuje do regulačního obvodu v místě akční veličiny (což je nejčastěji), dostaneme: $(1 - F_0) \cdot y = -F_0 \cdot w + F_S \cdot z$



Obr. 51. Blokové schéma regulačního obvodu se vstupem poruchy v místě akční veličiny



Obr. 52. Blokové schéma rozpojeného regulačního obvodu

Přenosy systémů a regulátorů mají obecný tvar:

$$F_S = \frac{1}{s_0 + s_1 \cdot p + s_2 \cdot p^2 + \dots + s_n \cdot p^n}$$

$$F_R = \frac{k_0 + \frac{k_{-1}}{p} + k_1 \cdot p}{1 + T_1 \cdot p + T_2^2 \cdot p^2 + \dots + T_n^n \cdot p^n}$$

Dosažením do rovnice regulačního obvodu pak dostaneme:

$$\left[\dots + T_1 s_1 p^2 + (T_1 s_0 + s_1 + k_1) p + (k_0 + s_0) + \frac{k_{-1}}{p} \right] \cdot y = \left(k_0 + \frac{k_{-1}}{p} + k_1 p \right) \cdot w + (1 + T_1 p + T_2^2 p^2 + \dots) \cdot z$$

Odtud dosazením za: $p^2 \cdot y(p) \Rightarrow y''(t)$, $p \cdot y(p) \Rightarrow y'(t)$ a $\frac{y(p)}{p} \Rightarrow \int y(t)dt$ atd. můžeme přejít k diferenciální rovnici regulačního pochodu:

$$\begin{aligned} & \dots + T_1 \cdot s_1 \cdot y''(t) + (T_1 \cdot s_0 + s_1 + k_1) \cdot y'(t) + (k_0 + s_0) \cdot y(t) + k_{-1} \int y(t)dt = \\ & = k_0 \cdot w(t) + k_{-1} \int w(t)dt + k_1 \cdot w'(t) + z(t) + T_1 \cdot z'(t) + T_2 \cdot z''(t) + \dots \end{aligned}$$

Z této rovnice vycházíme při vyšetřování stability regulačního obvodu. Při vyšetřování stability často vycházíme z otevřeného (rozpojeného) regulačního obvodu, u kterého pak dostáváme podstatně jednodušší vztahy. Pro přenos otevřeného regulačního obvodu platí:

$$\frac{u_R}{-u_S} = -F_R \cdot F_S = F_0$$

2.1.2. Stabilita regulačního obvodu

Regulační obvod je uzavřený dynamický obvod se zpětnou vazbou. Protože regulátor pracuje zpravidla jako zesilovač, který zesiluje regulační odchylku, převádí ji na odpovídající změnu akční veličiny, a ta zasahuje opět do regulovaného systému, je patrné, že při nevhodné velikosti zesílení regulátoru a při nevhodném fázovém posunutí může dojít k rozkmitání regulačního obvodu. Je-li obvod poruchou nebo řízením vyveden z rovnovážného stavu a nedojde k novému ustálení.

Je tedy zřejmé, že stabilita nejdůležitější podmínkou správné činnosti regulačních obvodů. Regulační obvod je stabilní, jestliže se při libovolné změně vstupní veličiny po odeznění přechodového děje výstupní veličina ustálí na nové hodnotě. Po ustálení vstupní poruchy se ustálí i regulovaná veličina. Tímto způsobem je definována stabilita i u dalších obvodů (např. zesilovače).

Nestabilní regulační obvody nejčastěji kmitají (oscilují) nebo se překlápějí do jednoho nebo druhého mezního stavu. Odtud je zřejmé, že neplní regulační funkci a vlivem oscilací nebo překlápění může dojít k poškození regulovaného systému. Proto je třeba vyšetřování stability věnovat náležitou pozornost.

Stabilita regulačního obvodu závisí výhradně na přenosových vlastnostech jeho členů, zvláště v obvodu uzavřené zpětnovazební smyčky. Nejvíce se projevují přenosy systému a regulátoru.

K vyšetřování stability slouží tzv. kritéria stability.

Kritéria stability

Stabilita je základní podmínkou správné činnosti regulačních obvodů.

Jakýkoliv člen nebo systém je stabilní tehdy, když po změně kterékoliv vstupní veličiny a po odstranění vzruchu se výstupní veličina vrátí do původního stavu. V regulačním obvodu mohou být jednotlivé členy stabilní i nestabilní. Požadujeme však vždy, aby uzavřený regulační obvod byl ve všech případech stabilní. Zjišťujeme, zda jsou dodrženy určité podmínky stability, zvaná kritéria stability. Některá z nich řeší otázku stability algebraickými metodami, jiná metodami grafickými.

Nejnámějšími algebraickými kritérii stability je Hurwitzovo a Routh-Schureovo kritérium. Obě kritéria vycházejí z tzv. charakteristické rovnice. Jejich nevýhodou je, že poskytují pouze informaci o tom, zda obvod je stabilní či ne. Nejsou vhodná pro obvody s dopravním zpožděním. Jejich výhodou je, že jsou vhodná pro zpracování na počítači. Samozřejmě, že jsou již vytvořeny příslušné programy na řešení stability regulačních obvodů.

Mezi grafická kritéria patří Michajlovo-Leonhardovo, Nyquistovo a Küpfmüllerovo kritérium.

a) Hurwitzovo kritérium stability

Používá se tehdy, můžeme-li zjistit diferenciální rovnici uzavřeného regulačního obvodu. Rovnice má obecný tvar:

$$\begin{aligned} & \dots + T_1 \cdot s_1 \cdot y''(t) + (T_1 \cdot s_0 + s_1 + k_1) \cdot y'(t) + (k_0 + s_0) \cdot y(t) + k_{-1} \int y(t) dt = \\ & = k_0 \cdot w(t) + k_{-1} \int w(t) dt + k_1 \cdot w'(t) + z(t) + T_1 \cdot z'(t) + T_2 \cdot z''(t) + \dots \end{aligned}$$

Pravou stranu rovnice tvoří veličiny, které působí na regulační obvod a jejichž změna je příčinou regulačního pochodu. Jsou to řízení a porucha. Tyto veličiny však nerozhodují o stabilitě obvodu, neboť nestabilní obvod bude kmitat i tehdy, budou-li řízení a poruchy rovny nule. Stabilita tedy závisí pouze na veličinách levé strany rovnice. Předpokládáme-li, že budící veličiny w a z jsou nulové, je pro stabilitu rozhodující rovnice:

$$\dots + T_1 \cdot s_1 \cdot y''(t) + (T_1 \cdot s_0 + s_1 + k_1) \cdot y'(t) + (k_0 + s_0) \cdot y(t) + k_{-1} \int y(t) dt = 0$$

popřípadě po zderivování:

$$\dots + T_1 \cdot s_1 \cdot y'''(t) + (T_1 \cdot s_0 + s_1 + k_1) \cdot y''(t) + (k_0 + s_0) \cdot y'(t) + k_{-1} \cdot y(t) = 0$$

Označíme-li jednotlivé konstanty $a_n, \dots, a_3, a_2, a_1, a_0$ bude obecný tvar rovnice pro vyšetřování stability:

$$\dots + a_3 \cdot y'''(t) + a_2 \cdot y''(t) + a_1 \cdot y'(t) + a_0 \cdot y(t) = 0$$

Tato rovnice se nazývá charakteristická, její levá strana se nazývá charakteristický polynom.

Definice Hurwitzova kritéria:

Aby byl regulační obvod stabilní, musí být všechny čitatele a_n až a_0 kladné a nenulové, všechny subdeterminanty (minory) Δ_{n-1} až Δ_1 hlavního determinantu Δ_n kladné.

Hlavní determinant má tvar:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_2 & a_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_4 & a_2 & a_0 \end{vmatrix}$$

Příklad:

Regulační obvod je tvořen statickým regulovaným systémem se zpožděním druhého řádu a regulátorem PI se zpožděním prvního řádu. Potom rovnice systému, regulátoru a charakteristická rovnice regulačního obvodu budou ve tvaru.

Systém: $s_2 \cdot y'' + s_1 \cdot y' + s_0 \cdot y = u$ **Regulátor:** $T_1 \cdot u' + u = k_0 \cdot (w - y) + k_{-1} \cdot \int (w - y) dt$ pro $w = 0$

$$s_2 \cdot y''' + s_1 \cdot y'' + s_0 \cdot y' = u' \qquad T_1 \cdot u' + u = -(k_0 \cdot y + k_{-1} \int y dt)$$

Rovnice regulačního obvodu vycházíme z podmínky $u_s = u_R$:

$$T_1 \cdot s_2 \cdot y^{(IV)} + (T_1 \cdot s_1 + s_2) \cdot y''' + (T_1 \cdot s_0 + s_1) \cdot y'' + (s_0 + k_0) \cdot y' + k_{-1} \cdot y = 0$$

Odtud:

$$a_4 \cdot y^{(IV)} + a_3 \cdot y''' + a_2 \cdot y'' + a_1 \cdot y' + a_0 \cdot y = 0$$

Potom má hlavní determinant tvar:

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 & 0 \\ a_4 & a_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_4 & a_2 & a_0 \end{vmatrix}$$

Podmínky stability jsou:

- koeficienty $a_4, a_3, a_2, a_1, a_0 > 0$
- subdeterminanty:

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 & 0 \\ a_4 & a_2 & 0 \\ 0 & a_3 & a_1 \end{vmatrix} > 0 \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_3 & a_1 \\ a_2 & a_0 \end{vmatrix} > 0 \quad \Delta_1 = |a_3| > 0$$

b) Michajlovo kritérium stability

Vychází z rovnice regulačního obvodu ve tvaru: $a_n \cdot y^{(n)} + \dots + a_3 \cdot y''' + a_2 \cdot y'' + a_1 \cdot y' + a_0 \cdot y = 0$.

Do rovnice se za regulovanou veličinu dosadí harmonické kmity $y = y_0 \cdot e^{j\omega t}$, které by v obvodu vznikly na mezi stability. Postupným dosazením dostaneme rovnici:

$$[a_n \cdot (j\omega)^n + \dots + a_3 \cdot (j\omega)^3 + a_2 \cdot (j\omega)^2 + a_1 \cdot (j\omega) + a_0] \cdot y_0 \cdot e^{j\omega t} = 0$$

Výraz v závorce představuje Michalovu křivku tzv. Michajlův hodograf. Rozdělením tohoto výrazu na reálnou a imaginární část a volbou vhodných ω lze Michajlův hodograf zakreslit v komplexní rovině.

Definice Michajlova kriteria:

Regulační obvod bude stabilní, nebude-li Michajlův hodograf vycházet z počátku a při změně kmitočtu od 0 do ∞ musí proti směru hodinových ručiček projít tolika kvadranty, kolikátého stupně je její rovnice.

Obr. 53. Příklady Michajlových hodografů stabilních a nestabilních obvodů

c) Nyquistovo kritérium stability

Toto kritérium vzniklo v roce 1932 pro zesilovače se zpětnou vazbou. Teprve později s rozvojem kybernetiky se toto kritérium začalo používat i v teorii regulace. Používá se nejčastěji, protože má největší praktický význam. Pomocí něj nejen ověřujeme stabilitu, ale používáme ho i při návrhu regulačního obvodu, neboť dává informaci o tom, jak daleko se obvod nachází od meze stability. Hodí se i pro obvody s dopravním zpožděním a umožňuje zjistit stabilitu na základě změřených frekvenčních charakteristik otevřené smyčky. Nazývá se proto *frekvenční kritérium*.

U tohoto kritéria stačí, známe-li kmitočtovou charakteristiku otevřeného regulačního obvodu.

Definice Nyquistovo kriteria:

Aby byl regulační obvod z uzavřeném stavu stabilní, musí bod v komplexní rovině $(-1, j0)$ ležet vlevo od kmitočtové charakteristiky rozpojeného regulačního obvodu, díváme-li se po charakteristice ve směru rostoucího kmitočtu.

Obr. 54. Příklady kmitočtových charakteristik stabilních a nestabilních regulačních obvodů

d) Kúpfmüllerovo kritérium stability

Používá se tehdy, můžeme-li měřením nebo výpočtem zjistit přechodovou charakteristiku rozpojeného regulačního obvodu. Je velmi jednoduché a výhodné tam, kde nežadáme velkou přesnost. Z přechodové charakteristiky rozpojeného obvodu změříme dobu průtahu T_u , dobu přechodu T_p a zesílení obvodu z_0 .

Definice Kúpfmúllerova kritéria:

Aby byl uzavřený regulační obvod stabilní, musí zesílení z_0 ležet ve stabilní oblasti diagramu.

Zjednodušeně lze říci, že obvod bude stabilní, bude-li platit $z_0 < \frac{T_p}{T_u}$

Obr. 55. Diagram pro vyšetření stability pomocí Kúpfmúllerova kritéria stability

2.1.3. Kvalita regulačního pochodu

Kvalita neboli jakost regulačního pochodu je současně určena dvěma vlastnostmi: přesností a rychlostí regulace a také stabilitou regulace.

a) Přesnost regulace

Přesnost regulace zjišťujeme v ustáleném stavu (po ustálení přechodových dějů). Přesnost udáváme v absolutní hodnotě nebo jako relativní hodnotu trvalé odchylky v procentech.

b) Rychlost přechodového děje

Rychlost přechodového děje neboli dynamické vlastnosti regulačního obvodu posuzujeme podle přechodové charakteristiky. Vstupní jednotkový skok přivedeme jako řídicí veličinu w nebo jako poruchovou veličinu z . Regulační pochody můžeme rozdělit podle průběhů na:

1. Ideální s nekonečně kvalitním regulátorem
2. Kmitavý s přeregulováním (s překmity regulované veličiny)
3. Kmitavý bez přeregulování
4. Nekmitavý (aperiodický, monotónní)
5. S nulovou kvalitou (bez regulace)

Obr. 56. Odezva regulačního obvodu na skok řídicí veličiny

Obr. 57. Odezva regulačního obvodu na skok poruchové veličiny

U kmitavého děje jsou měřítkem kvality *maximální hodnota nežádoucího překmitu* Δx_{max} v procentech a *doba odezvy* t_0 , která je určena dobou potřebnou k dosažení žádané hodnoty regulované veličiny (100 %). Dále je udávána *doba regulace* t_R . Je to doba potřebná k dosažení 95% žádané hodnoty regulované veličiny. Kromě toho se uvádí počet překmitů a za dobu regulace t_R .

Kvalitu regulačního pochodu nejčastěji určujeme pomocí integrálních kritérií. Pro regulační pochody bez přeregulování používáme **jednoduché integrální kritérium**. Pro pochody s přeregulováním použijeme **kvadratické integrální kritérium** nebo **kritérium absolutních ploch**. Kvalitu v obou případech hodnotíme na základě plochy mezi ideální a skutečnou přechodovou charakteristikou. Kvalita regulačního pochodu je tím větší, čím je plocha menší. Velikost plochy pak vypočítáme jako rozdíl ploch mezi ideální a skutečnou přechodovou charakteristikou regulačního

ho obvodu:

$$S = w \cdot t_R - \int_0^{t_R} y(t) dt = \int_0^{t_R} e(t) dt$$

kde w je *žádaná hodnota* regulované veličiny a t_R je *doba regulace*. Pomocí tohoto kritéria můžeme vyjádřit plochu S v procentech, jestliže do jmenovatele dosadíme plochu pod ideální přechodovou charakteristikou s hodnotou $w \cdot t_R$, tedy:

$$S_{\%} = \frac{S}{w \cdot t_R} \cdot 100\%$$

Pro posouzení kvality regulačního děje s překmity regulované veličiny použijeme kvadratické integrální kritérium. V tomto případě vyjadřujeme součet druhých mocnin ploch mezi skutečnou a ideální přechodovou charakteristikou. Tento součet určuje kvalitu regulačního děje:

$$S^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_n^2$$

Plochy rovněž vyjadřujeme v čase od $t=0$ do $t=t_R$. Výpočet pomocí integrálů je zde složitější, neboť je třeba znát okamžiky, kdy $y(t)=w$.

Obr. 58. Přechodová charakteristika regulačního obvodu s kmitavým dějem

Obr. 59. Určení kvality regulace integrálním způsobem

2.1.4. Volba typu regulátoru

Typ regulátoru má značný vliv na kvalitu regulačního pochodu. Regulátory se širokými možnostmi nastavení jednotlivých konstant (charakteristických veličin) sice umožní realizaci kvalitního regulačního pochodu, jsou však relativně drahé a složité a vyžadují kvalifikovanou obsluhu a údržbu. V některých případech ani použití drahých regulátorů nevede ke zlepšení kvality regulačního pochodu. Jednoduché, a tedy i levné regulátory se snadno seřizují, ale mají tu nevýhodu, že nejsou často schopny zvládnout danou regulační úlohu. Proto je volba vhodného typu regulátoru poměrně složitá.

Pro volbu typu regulátoru jsou rozhodující především požadavky na kvalitu regulačního pochodu. Musíme například vědět, zda můžeme připustit trvalou regulační odchylku. V případě, že nemůžeme trvalou odchylku připustit, volíme typ regulátoru obsahující integrační složku. Dalším hlediskem je rychlost regulace a samozřejmě nutnou podmínkou je stabilita regulačního obvodu.

Regulovaný systém	Volba typu regulátoru podle druhu regulovaného systému				
	P	I	PI	PD	PID
statický bezkapacitní	není stabilní	vhodný	nákladný	nákladný	nákladný
statický jednodukapacitní	vhodný	použitelný	nákladný	nákladný	nákladný
statický dvoukapacitní	vhodný	použitelný s omezením	vhodný	vhodný	vhodný
statický s dopravním zpožděním	není stabilní	použitelný s omezením	použitelný s omezením	vhodný	vhodný
astatický jednodukapacitní	vhodný	není stabilní	vhodný za předpokladu, že nelze použít regulátor P		
astatický dvoukapacitní	použitelný s omezením	není stabilní	vhodný za předpokladu, že nelze použít regulátor P		

Regulovaná veličina	Volba druhu regulátoru podle regulované veličiny				
	P	I	PI	PD	PID
Tlak	použitelný	vhodný	vhodný *	nevhodný	nevhodný
Teplota	vhodný	nevhodný	vhodný *	vhodný *	vhodný *
Průtok	nevhodný	vhodný	nevhodný	nevhodný	nevhodný
Výška hladiny	vhodný	nevhodný	vhodný	nevhodný	nevhodný
Otáčky	vhodný	vhodný	vhodný *	vhodný *	vhodný

* vhodný pro větší nároky

2.1.5. Optimální seřízení (nastavení) regulátoru.

Seřízení regulátoru spočívá ve vhodném nastavení jeho konstant (charakteristických veličin) pp , T_i , T_d tak, aby získaný regulační pochod probíhal co nejpríznivěji. V praxi se můžeme setkat s různými metodami nastavení těchto konstant. V zásadě je můžeme rozdělit do dvou skupin, podle toho, zda pro nastavení konstant využíváme získané zkušenosti nebo zda konstanty regulátoru stanovíme na základě výpočtu.

Nastavení konstant regulátoru na základě zkušenosti

Tato metoda vychází ze zkušeností získaných při seřizování regulátorů v regulačních obvodech podobných zařízení, jejichž regulátor má být seřízen. Pro seřizování pomocí této metody můžeme ve většině běžných případů využít doporučené hodnoty.

Regulovaná veličina	pp (%)	T_i (min)	T_d (min)
Tlak	20 až 150	0,1 až 3	0,01 až 0,1
Teplota	5 až 50	1 až 20	0,1 až 3
Průtok	20 až 150	0,1 až 1	0,01 až 0,1
Výška hladiny	80 až 170	0,5 až 6	0,01 až 0,1

Praktický postup při nastavení parametrů regulátoru je uveden v následující tabulce, která vychází ze zkušeností s nastavením regulátorů. Pro každý typ regulátoru je zde uvedené doporučení, které konstanty je potřeba změnit k dosažení kvalitního regulačního pochodu. Doporučení vychází z analýzy dosaženého tvaru regulačního pochodu probíhajícího z klidového stavu.

Tabulka s doporučenými úpravami koeficientů regulátorů:

Seřízení regulátoru	R e g u l á t o r			
	P	PI	PD	PID
správně				
chybně				
chybně				

Nastavení konstant regulátoru na základě výpočtu

a) charakteristické veličiny regulovaného systému jsou neznámé

V tomto případě můžeme použít například **Ziegler-Nicholovu metodu**. Z-N metoda vychází ze dvou veličin, a to z kritického pásma proporcionality (pp_{kr}) a z kritické periody kmitů (T_{kr}). Tyto veličiny zjistíme následujícím postupem:

1. Konstanty sdruženho regulátoru nastavíme tak, aby regulátor pracoval jako čistě proporcionální (tj. $T_i \rightarrow \infty$ a $T_d = 0$).
2. Na regulátoru nastavíme libovolné (spíše větší) pásmo proporcionality.
3. V regulačním obvodu vyvoláme regulační pochod (nejlépe nepatrnou změnou žádané hodnoty) a sledujeme jeho průběh.
4. Pásmo proporcionality měníme (pomalu zmenšujeme) a regulační pochod vyvoláváme do té doby, dokud nezískáme regulační pochod na hranici stability. Pásmo proporcionality, při kterém tento pochod nastal, je kritické pásmo proporcionality a perioda průběhu regulačního pochodu je kritická perioda (pp_{kr} a T_{kr}).
5. Konstanty pro nastavení regulátoru vypočítáme pomocí tabulky:

Regulátor	pp (%)	T_i (min)	T_d (min)
P	2,0 pp_{kr}	∞	0
PI	2,2 pp_{kr}	0,85 T_{kr}	0

PD	1,06 pp _{kr}	∞	0,12 T _{kr}
PID	1,7 pp _{kr}	0,50 T _{kr}	0,12 T _{kr}

V případě použití samotného I regulátoru je Z-N metoda upravena a mez stability se hledá zrychlováním integrace. Takže se postupně zmenšuje T_i (případně zvětšuje k₋₁) až do okamžiku, kdy se v regulačním obvodu objeví kmity. Optimální nastavení I regulátoru je potom dáno výpočtem $T_i = 2 \cdot T_{kr}$ (případně $k_{-1} = 0,5 \cdot k_{-1kr}$).

b) charakteristické veličiny systému jsou známy

Konstanty pro nastavení regulátoru se potom vypočítají pomocí vztahů uvedených v následující tabulce. Tabulka platí pro poměr $\frac{T_u}{T_n} < 1$. Je-li systém astatický, platí $T_n = 1$.

Regulátor	pp (%)	T _i (min)	T _d (min)
P	$\frac{T_u}{T_n} \cdot K_s$	---	---
PI	$1,1 \cdot \frac{T_u}{T_n} \cdot K_s$	3,5 T _u	---
PID	$0,8 \cdot \frac{T_u}{T_n} \cdot K_s$	2 T _u	0,5 T _u

Obr. 60. Tabulka pro výpočet konstant regulátoru podle charakteristických veličin systému

Tato metoda dává v praxi velmi dobré výsledky. Navíc můžeme zvolit, zda regulační pochod má mít průběh periodický nebo aperiodický. Metoda respektuje způsob vyvolání regulačního pochodu. Jedinou nevýhodou je, že musíme přesně znát charakteristické veličiny regulovaného systému. Většinou tyto veličiny neumíme přesně vypočítat, a proto je zjišťujeme měřením na systému v provozu.

2.2. Regulační obvody s nespojitými regulátory

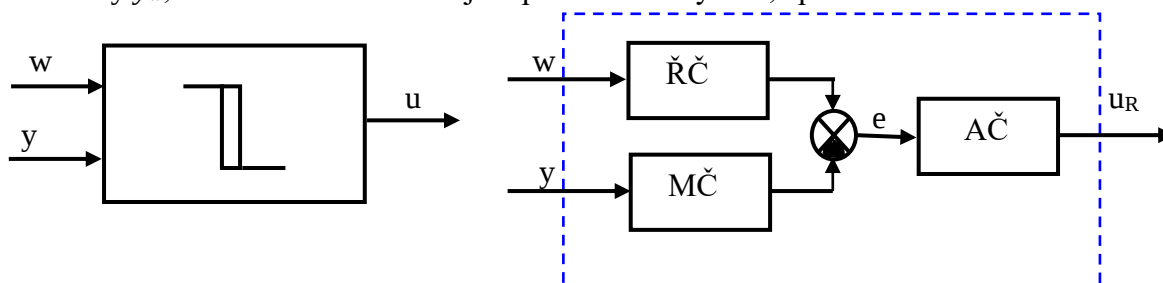
2.2.1. Nespojité regulátory

Nespojitý regulátor je charakteristický tím, že jeho výstupní signál (akční veličina) nezávisí spojitě na vstupním signálu (regulované veličině). Akční veličina se tedy nemění spojitě, ale může nabývat pouze omezeného počtu hodnot., přičemž změna z jedné hodnoty na druhou probíhá skokem. Pro akční člen nespojitého regulátoru to znamená, že může zaujmout pouze dvě nebo více pevných poloh. Podle počtu těchto poloh rozdělujeme tyto regulátory na dvupolohové, třípolohové a vícepolohové.

Nespojité regulátory patří pro svou jednoduchou konstrukci a cenovou dostupnost mezi nejrozšířenější regulátory.

Dvupolohový regulátor

Nejjednodušším dvupolohovým regulátorem je dvupolohový regulátor. Poklesne-li skutečná hodnota regulované veličiny y pod dolní mez žádané hodnoty y_w , nabude akční veličina určité pevné hodnoty u_{max} , zpravidla maximální. Překročí-li skutečná hodnota regulované veličiny horní mez žádané hodnoty y_w , nabude akční veličina jiné pevné hodnoty u_{min} , zpravidla nulové.



Obr. 61. Blokové schéma dvupolohového regulátoru

Činnost regulátoru je názorně vidět na jeho statické charakteristice. Kromě žádané hodnoty řídicí veličiny y_w zde ještě rozlišujeme hysterezy h což je rozdíl mezi horní a dolní mezí y_w které se označují také y_d a y_h . Velikost hystereze h má vliv na přesnost regulace a na četnost spínání.

Zmenšení hystereze sice zvyšuje přesnost regulace, ale zároveň zvyšuje i frekvenci spínání a tím snižuje životnost regulátoru. Ze statické charakteristiky dále vyplývá, že hodnoty regulované veličiny x_d a x_h , při kterých dochází k sepnutí nebo rozepnutí kontaktů regulátoru, se neshodují s žádanou hodnotou x_w . Regulovaná veličina tedy kmitá v pásmu hystereze se šířkou h .

Obr. 62. Statické charakteristiky dvupolohového regulátoru

Třípolohový regulátor

Jeho akční člen může zaujmout tři pevné polohy, a proto na tomto regulátoru můžeme v porovnání s dvupolohovým regulátorem nastavit ještě jednu hodnotu akční veličiny. Tu je třeba vhodně zvolit (nemusí být vždy 50%), protože tím lze zlepšit kvalitu regulačního pochodu v porovnání s pochodem řízeným dvupolohovým regulátorem.

Obr. 63. Statická charakteristika třípolohového regulátoru

Dvoupolohový regulátor se zpětnou vazbou

Jestliže ani jeden z uvedených regulátorů nezajistí dostatečně kvalitní regulační pochod můžeme použít dokonalejší regulátory jakými jsou například dvoupolohové regulátory se zpětnou vazbou. V praxi se používají dva druhy zpětných vazeb, které se v podstatě liší svými dynamickými vlastnostmi.

Zpoždující zpětná vazba způsobí ustálení jejího výstupního signálu na nové hodnotě dané jejím zesílením. Výstupní signál z pružné zpětné vazby se po určité době ustálí na původní hodnotě.

Obr. 64. Blokové schéma dvoupolohového regulátoru se zpětnou vazbou a přechodové charakteristiky zpoždující a pružné zpětné vazby

Impulsový regulátor

Je charakteristický tím, že na jeho výstupu jsou impulsy, jejichž střída i frekvence jsou závislé na regulační odchylce. Jestliže se regulační odchylka zmenšuje, zmenšuje se i střída a frekvence impulsů. Při zvětšující se regulační odchylce je to naopak. Střída impulsů je dále závislá na nastavení zpoždující zpětné vazby. Tyto regulátory vyhovují tam kde akční člen reaguje proporcionálně na střidu vstupního signálu (polohové servopohony) nebo integruje přírůstky (rychlostní servopohony).

2.2.2. Regulační obvody s dvoupolohovým regulátorem

a) Regulační obvod tvořený jednokapacitním statickým regulovaným systémem a dvoupolohovým regulátorem

Obr. 65. Příklad regulačního obvodu a průběh regulované a akční veličiny

Regulovaná veličina se po zapnutí začne zvětšovat podle přechodové charakteristiky statického jednokapacitního systému (podle křivky ohřevu). Toto zvětšování pokračuje až do doby, kdy skutečná hodnota regulované veličiny dosáhne hodnoty y_h (horní hranice hystereze). V tom okamžiku „spadne“ (vypne) akční veličina u_R na hodnotu 0. Regulovaná veličina se od této doby začne zmenšovat a to opět podle přechodové charakteristiky (podle křivky chlazení). Jakmile se hodnota regulované veličiny zmenší na hodnotu y_d (dolní hranice hystereze) regulátor sepne ($u_R = u_{\max}$) a regulovaná veličina se opět začne zvětšovat. Tento cyklus se neustále opakuje a tak skutečná hodnota regulované veličiny neustále kmitá mezi hodnotami y_d a y_h . Abychom mohli posoudit kvalitu regulace zavedeme následující charakteristické veličiny regulačního pochodu.

Šířka pásma kmitání Y_k – rozsah ve kterém regulovaná veličina periodicky kmitá.

Perioda kmitů T – doba trvání kmitů u nespojitého regulátoru.

Frekvence četnosti spínání f_{sp} – počet zapnutí nebo vypnutí regulátoru za jednotku času.

V našem případě regulace jednokapacitního systému udržuje dvoupolohový regulátor regulovanou veličinu v mezích y_d a y_h . Šířka pásma kmitání je tedy shodná s hysterezí h a lze ji volbou hystereze regulátoru ovlivnit. Charakteristické veličiny regulačního pochodu můžeme vypočítat pro případ, kdy akční veličina má alespoň dvojnásobnou hodnotu, než jaká by byla nutná pro udržení regulované veličiny na žádané hodnotě při trvalém zapnutí akční veličiny. Obvod tedy pracuje s nadbytkem výkonu 100%. Pro odvození využijeme vztahy pro podobnost trojúhelníků.

$$\text{Platí: } \frac{\frac{1}{2} \cdot T}{h} = \frac{T_n}{y_w} \quad \text{odtud: } T = 2 \frac{h}{y_w} T_n \quad \text{a potom } f_{sp} = \frac{1}{2} \frac{y_w}{h} \frac{1}{T_n}$$

Z těchto vztahů je zřejmé, že při zmenšování hystereze h nebo při zkracování doby náběhu T_n se frekvence spínání f_{sp} zvyšuje, a to nepříznivě ovlivňuje životnost regulátoru. Proto jestliže není nutná příliš velká přesnost udržování regulované veličiny na žádané hodnotě a není na závadu její větší kolísání, volíme raději větší hysterezi.

b) Regulační obvod tvořený dvoukapacitním statickým regulovaným systémem a dvoupolohovým regulátorem

Regulace dvoukapacitního (popřípadě vícekapacitního) regulovaného systému se liší od regulace jednodukapacitního systému. Regulovaná veličina nekmitá pouze v pásmu hystereze, ale pásmo kmitání bývá širší než pásmo hystereze. Znamená to tedy, že regulovaná veličina po zapnutí (popřípadě vypnutí) akční veličiny, ještě nějakou dobu klesá (popřípadě roste). Je to způsobeno zpožděním v systému, které je dáno velikostí doby průtahu T_u . Teprve po uplynutí této doby se změní její průběh.

Je tedy zřejmé, že na šířku pásma kmitání a tím i na kvalitu regulačního pochodu má vliv regulovaný systém a především jeho doba průtahu. Hystereze regulátoru se naopak příliš neuplatní, neboť ke kmitání regulované veličiny dojde i při nulové hysterezi.

Obr. 66. Průběh regulované a akční veličiny při regulaci dvoukapacitního (popř. vícekapacitního) systému s dvoupolohovým regulátorem

Pro případ 100% nadbytku výkonu můžeme opět odvodit příslušné vztahy pro výpočet šířky pásma kmitání regulované veličiny X_k a periody T . Jestliže vyjdeme z podobnosti trojúhelníků, pak:

$$\frac{T_u}{y_u} = \frac{T_n}{y_w}; \quad y_u = y_w \frac{T_u}{T_n}; \quad y_k = h + 2 \cdot y_u = h + 2 \cdot y_w \frac{T_u}{T_n} = h + y_{\max} \frac{T_u}{T_n}$$

Průběhy uvedené na předchozím obrázku jsou teoretické, neboť ve skutečnosti nejsou v průběhu regulované veličiny ostré hrany a přechody jsou zaoblené. Proto je skutečná šířka pásma kmitání regulované veličiny menší, než bychom spočítali z uvedených vztahů.

Další charakteristickou veličinou regulačního pochodu je *doba rozběhu* T_r . Je to doba potřebná k tomu, aby po zapnutí regulačního obvodu skutečná hodnota regulované veličiny poprvé dosáhla žádané hodnoty. Tuto dobu lze ovlivnit volbou rozsahu akční veličiny. Čím je nadbytek výkonu větší, tím je kratší doba rozběhu, ale současně se zvětšuje šířka pásma kmitání Y_k regulované veličiny.

Obr. 67. Průběhy regulované a akční veličiny pro různé hodnoty rozsahu akční veličiny

c) Způsoby zvyšování kvality regulačního pochodu

Zlepšení kvality regulačního pochodu znamená především zmenšení jeho šířky pásma kmitání Y_k . Z předchozích vztahů vyplývá, že toho můžeme dosáhnout několika způsoby:

- zmenšení hystereze – této možnosti využíváme pouze u jednodukapacitních regulovaných systémů. Je třeba si uvědomit, že zmenšením hystereze se zvyšuje frekvence spínání a životnost regulátoru (akčního členu) se zkracuje.
- zkrácení doby průtahu – toto opatření patří k nejvýznamnějším možnostem zmenšení šířky pásma kmitání regulované veličiny. Regulační obvod musí být navržen tak, aby přenos informace o změnách regulované veličiny na akční člen byl rychlý. Toho lze dosáhnout vhodným uspořádáním regulačního obvodu (měřicí člen by měl být umístěn co nejbližší k akčnímu členu,

pokud tomu nebrání provozní podmínky) a použitím přístrojů s velmi dobrými dynamickými vlastnostmi (malé setrvačnosti, rychlé ustálení).

- prodloužení doby náběhu – má smysl pouze v těch případech, kdy se s prodloužením doby náběhu neprodlouží současně i doba průtahu. Prodloužení doby náběhu dosáhneme zvětšením kapacity regulovaného systému (přidáním dodatečné tepelné, objemové, hmotnostní kapacity).
- zmenšení rozsahu akční veličiny – je nevýhodné tím, že zmenšováním rozsahu akční veličiny se sice zmenšuje šířka pásma kmitání regulované veličiny, ale současně se prodlužuje doba rozběhu. Většinou požadujeme krátkou dobu rozběhu, což vyžaduje co největší rozsah akční veličiny. Oba tyto požadavky jsou protichůdné a nelze je splnit jednoduchým dvoupolohovým regulátorem.

2.2.3. Regulační obvody s třípolohovými regulátory

Ke splnění obou předchozích protichůdných požadavků je možno použít třípolohový regulátor. U něj je možno nastavit celkem tři hodnoty akční veličiny. Při vhodně zvolených hodnotách lze značně zkvalitnit regulační pochod.

Tento způsob se z výhodou využívá u elektrických pecí, kde se používá poloh: trojúhelník – hvězda – vypnuto. Při spojení topných těles do trojúhelníku má pec velký topný výkon a z toho vyplývá i velmi krátká doba rozběhu. Jakmile regulovaná veličina dosáhne poprvé nastavené hodnoty y_{w1} , přepojí se topná tělesa do hvězdy, a tím se topný výkon zmenší na třetinu. Regulovaná veličina se i nadále zvětšuje, ale již mnohem pomaleji. Při dosažení nastavené hodnoty se y_{w2} se topení vypne úplně. Další regulační pochod pak využívá pouze stavů hvězda – vypnuto, pokud se nevyskytnou velké poruchy.

Obr. 68. Průběh veličin při regulaci dvoukapacitního systému třípolohovým regulátorem

2.2.4. Regulační obvody s dvoupolohovými regulátory se zpětnou vazbou

V některých případech je kolísání regulované veličiny tak velké, že nevyhovuje jak klasický dvoupolohový, tak třípolohový regulátor. Tento problém se často vyskytuje u systémů, které mají nepříznivý poměr doby průtahu k době náběhu.

Šířku pásma kmitání regulované veličiny při regulaci klasickým dvoupolohovým regulátorem ovlivňuje přerušovaný přívod energie do regulovaného systému. Například při předpokládaném 100% nadbytku energie se po dobu $2T_u$ přivádí do systému energie $u_{max} \cdot 2T_u$. Vlivem setrvačnosti systému se pak tato energie projeví překmitnutím skutečné hodnoty regulované veličiny přes žádanou hodnotu. Čím je větší doba průtahu systému, tím větší dávka energie je do ní přivedena a tím větší je i šířka pásma kmitání. Kdybychom však dokázali ovládat regulátor, aby zapínal i vypínal dříve než po uplynutí doby $2T_u$, zmenšila by se dávka energie přiváděné do systému a to by vedlo ke zmenšení šířky pásma kmitání regulované veličiny. Tohoto efektu lze dosáhnout zápornou zpětnou vazbou. Ta způsobí, že akční veličina je dávkována v krátkých impulsích v závislosti na regulační odchylce. Při rozběhu se do systému trvale přivádí energie až do té doby, než průběh $y + y_{zv}$ dosáhne horní hystereze. Při vhodně nastavené zpětné vazbě dojde k tomuto prvnímu vypnutí přiváděné energie o dobu T_u dříve, než se dosáhne žádané hodnoty. Na regulované veličině se toto vypnutí projeví až za dobu T_u , tedy v okamžiku, kdy regulovaná veličina dosáhne přibližně ustálené hodnoty. Ta se od žádané hodnoty liší o trvalou regulační odchylku e . To znamená, že tento regulátor nereguluje zcela přesně. Vznik trvalé odchylky není zpravidla na závadu, neboť tato odchylka je menší než kolísání regulované veličiny v obvodu s regulátorem bez zpětné vazby. Trvalou regulační odchylku lze odstranit regulátorem s pružnou zpětnou vazbou.

Obr. 69. Průběh veličin při regulaci systému 2. řádu
dvoupolohovým regulátorem se zpětnou vazbou

2.2.5. Seřízení (nastavení) nespojitých regulátorů

Dvoupolohové regulátory bez zpětné vazby mají jedinou charakteristickou veličinu, prostřednictvím které lze do jisté míry ovlivňovat průběh regulačního pochodu. Je to hystereze regulátoru. Ne u každého regulátoru lze tuto veličinu nastavovat. Vliv změny hystereze se uplatňuje především při regulaci jednodukapacitních systémů a volba velikosti hystereze má vliv na četnost spínání regulátoru.

U dvoupolohových regulátorů se zpožďující se zpětnou vazbou lze nejčastěji plynule měnit zesílení zpětné vazby K_{zv} , zatímco jejich časová konstanta bývá stálá, nebo ji lze přestavovat skokově.

Dvoupolohové regulátory s pružnou zpětnou vazbou lze nastavovat zkusmo jen velmi obtížně. Proto při jejich seřízení vycházíme zpravidla ze znalostí dynamických vlastností systému. Konstanty pro nastavení regulátorů pak určíme ze vztahů:

$$K_{zv} = 2 \frac{T_u}{T_n} y_{\max}; \quad T_{zv} = T_u.$$

3. Číslicové řízení

3.1. Základní pojmy

3.1.1. Historický vývoj číslicové techniky

Číslicová technika je založena na využití poznatků z teorie číselných soustav, zejména dvojkové, a z dvojhodnotové logické algebry, tzv. Booleovy algebry publikované ve spisu „Matematická analýza logiky“ (originál: *The Mathematical Analysis of Logic: Being an Essay towards a Calculus of Deductive Reasoning*, Cambridge: Macmillan, 1847). Matematické kořeny lze vysledovat až do antického Řecka. Ve 4 stol. př. n. l. krétský filozof Epimidés prohlásil: „Všichni Kréťané jsou lháři, jak mi řekl jeden krétský básník“. Později Eubulidés tento paradox zjednodušil na výrok „Já lžu“. Ve 14. stol. francouzský filozof Jean Buridan napsal na prázdný list „Všechna tvrzení na této stránce jsou nepravdivá“. Tento paradox známý pod označením „paradox lháře“ vedl k úvahám o rozhodnutelnosti problémů matematiky. Matematik Russell formuloval svůj paradox: „jediný holič ve městě holí všechny muže, kteří se sami neholí, a nikoho jiného“. Matematici Russell, Frege a další se snažili paradox lháře vyřešit. Motivací byl požadavek důkazu úplnosti, bezespornosti a rozhodnutelnosti v matematice který vyslovil matematik David Hilbert (1862-1943). Těmito problémy se zabývali i matematici Kurt Gödel (rakušan, 1906-1978, ve spise „O formálně nerozhodnutelných větách v díle *Principia Mathematica* a příbuzných systémech“, publikováno r. 1931) a Alan Turing (1912-1954). Gödel se zabýval úplností a bezesporností, Turing rozhodnutelností. Jejich výsledky zcela změnilly matematiku a daly jí směr, o kterém se nikomu nesnilo. Turing pro důkaz rozhodnutelnosti použil ve svém článku „On Computable Numbers with an Application to the Entscheidungsproblem“ (O vyčíslitelnosti s ohledem na problém rozhodnutelnosti) publikovaném počátkem r. 1937 v časopise *Proceeding of the London Mathematical Society* představu fiktivního výpočetního stroje i když do té doby žádné skutečné výpočetní stroje neexistovali. Sice již v 19. století excentrický génius Charles Babbage vymyslel a navrhl parou poháněný „analytický stroj“ s děrnými štítky, ten ale nebyl nikdy sestrojen a na rozdíl od Turinga nedošel k poznání, že instrukce mohou být zapsány ve stejném matematickém kódu jako výpočet, kterého se týkají. Babbageův vynález předjímá Turingův „univerzální stroj“ v tom, že v principu měl být schopen provádět jakékoliv matematické výpočty. (Babbageovou spolupracovnicí byla Ada, lady z Lovelace, dcera lorda Byrona, která byla matematicky nadána a pro navržený Babbageův stroj sestavila první výpočetní algoritmus. Na její počest byl první skutečný programovací jazyk pojmenován ADA.) Turingův stroj měl pracovat s páskou, kterou umí posunout o políčko doleva nebo doprava, přečíst znak z políčka a zapsat znak na políčko. Teoretické zvládnutí základů číslicové techniky umožňovalo konstrukci prvních číslicových počítačů.

V roce 1934 začal Konrad Zuse v Německu vyvíjet samočinný reléově–mechanický počítač Z1, který uvedl do chodu v roce 1938. Byl však pomalý a nespolehlivý. V roce 1941 Zuse zkonstruoval první prakticky použitelný reléový počítač Z3 s pamětí pro 64 22-bitových čísel, zobrazením v pohyblivé čarce a čtením instrukcí z děrné pásky. Při náletu v r. 1944 byl Z3 však zničen.

V roce 1943 s finanční podporou firmy IBM Howard Aiken v USA na Harvardské univerzitě v Cambridge dokončil reléový počítač Mark I. Byl 15 m dlouhý, 2,4 m vysoký a obsahoval 3 300 relé. Pracoval s čísly na 23 desetinných míst, vstup byl z 24 stopé děrné pásky. Sčítání trvalo 0,3 s, násobení 3-5 s. Na Harvardské univerzitě pracoval 15 let.

V roce 1946 byl uveden do provozu na univerzitě v Pensylvánii první elektronkový počítač (určený pro výpočet balistických křivek a zaměřovacích dělostřeleckých tabulek) označený zkratkou ENIAC (Electronical Numerical Integrator and Computer). Obsahoval 17 468 elektronek a 7 200 krystalových diod, zabíral plochu 167 m², měl příkon 174 kW a vážil přes 30 tun. Sečtení

dvou čísel trvalo 0,2 ms a násobení 2,8 ms. Počítač měl magnetickou paměť s kapacitou 100 čísel a počítal přímo v desítkové soustavě. V r. 1945 byl Johnem von Neumanem, který navázal na Turingovu práci, uveden do chodu jeho následník počítač MANIAC (Mathematical Analyser Numerical Integrator and Computer), který byl použit k vývoji vodíkové bomby.

V r. 1951 firma Remington začala sériově vyrábět počítače řady UNIVAC. Na této generaci počítačů začaly vznikat první operační systémy a první programovací jazyky (COBOL, Fortran).

V r. 1957 byl prof. Svobodou skonstruován první československý počítač SAPO (SAmočinný POčítač). Obsahoval 7 000 relé, 400 elektronek a měl magnetickou bubnovou paměť o kapacitě 1024 32-bitových slov. Roku 1960, po 3 letech provozu vyhořel.

Mezníkem ve vývoji elektroniky a tím i automatizace byl v roce 1947 vynález tranzistoru a v roce 1959 vynález integrovaného obvodu.

V 70. letech s vývojem mikroprocesorů vznikaly programovatelné automaty a spolu s nimi různé generace počítačů. Ty se staly neodmyslitelnou součástí automatizovaných systémů. Logické a analogové řízení tak začalo být nahrazováno řízením diskrétním.

3.1.2. Výhody diskrétního řízení

Řízení je obecně definováno jako působení řídicího objektu na objekt řízený se snahou docílit požadovaného cílového chování. Podle tvaru signálů, kterými se přenáší informace lze řízení rozdělit na:

logické řízení – binární signály (True/False; 1/0; H/L; +5V/0V; Zap/Vyp; –12V/+12V atd.),

analogové řízení – spojitě signály v daném intervalu,

diskrétní řízení – signály jsou definovány v určitých časových okamžicích daných tzv. periodou vzorkování,

– základem řídicího členu je mikropočítačová výpočetní jednotka,

Většina technických prostředků současné automatizační techniky pracuje na principech diskrétního řízení a je tedy logické, že proti klasickému (spojitému) řízení bude mít řadu výhod.

K hlavním výhodám patří:

- **Centralizace a decentralizace řídicích prostředků**

Řídicí obvod je možno rozdělit na několik vzájemně spolupracujících celků propojených průmyslovými komunikačními linkami. Vzniká tzv. *distribuovaný řídicí systém*, který je charakteristický víceúrovňovou hierarchickou strukturou.

- **Velká spolehlivost**

Spolehlivost se vyjadřuje tzv. střední dobou mezi poruchami, případně střední dobou mezi opravami. U současných řídicích systémů nabývá tento parametr hodnot řádově 10^4 až 10^5 .

- **Snadná změna struktury regulátorů**

Počítače a programovatelné automaty umožňují požadovanou strukturu regulačního členu sestavit vhodnou kombinací počítačích bloků tj. softwarovou konfigurací a nastavením voleb.

- **Programové nastavení parametrů regulátorů**

Regulátory diskrétních systémů jsou často tvořeny jedinou výkonnou instrukcí (nejčastěji instrukce PID) a blokem dat obsahujícím všechny požadované parametry. Konstanty regulátoru se nastavují jejich modifikací. Některé systémy mají zabudovanou funkci automatického nastavení příp. adaptivní mechanismus.

- **Minimální drift nuly**

Základem klasických regulátorů jsou stejnosměrné zesilovače, které jsou charakteristické nestálostí výstupního napětí (drift nuly). Tento problém u mikropočítačových systémů samozřejmě odpadá.

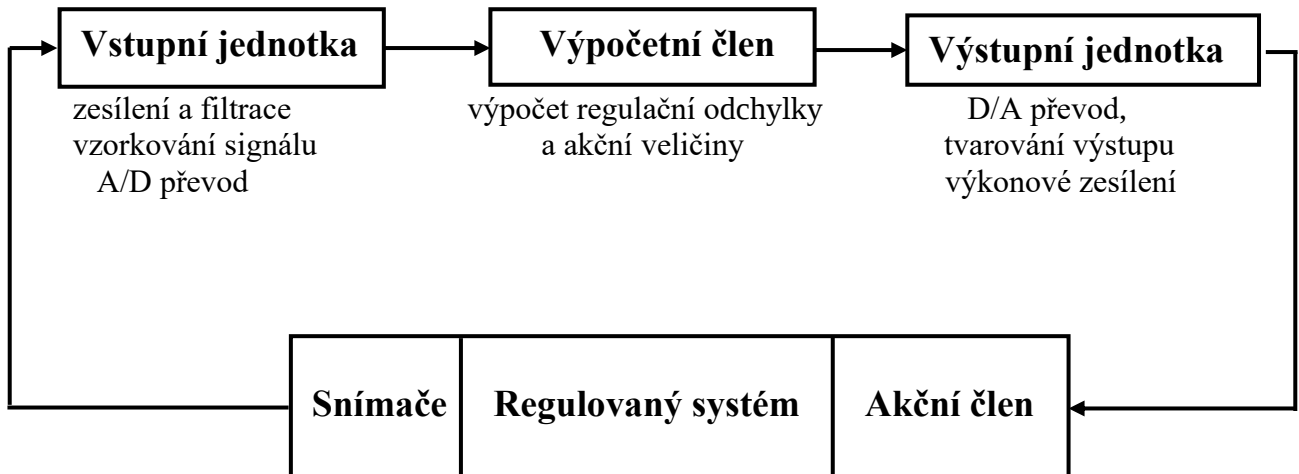
- **Snadný přenos informace na velké vzdálenosti**

Veškeré signály jsou přenášeny ve tvaru binárně kódovaných dat, která jsou podstatně odolnější vůči elektromagnetickému rušení než data analogová.

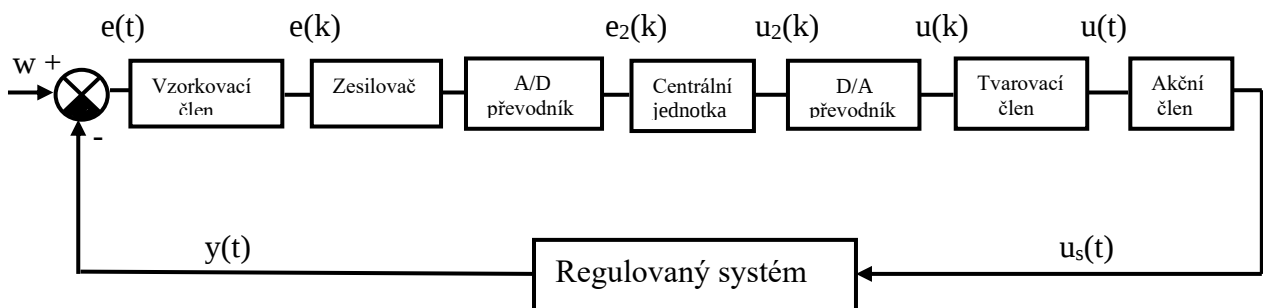
• **Snadnější nastavení, oživení a montáž řídicích systémů, diagnostické nástroje**

Diskrétní řídicí systémy obsahují řadu ladících a diagnostických nástrojů, které usnadňují uvedení do chodu a odstranění případných poruch.

3.1.3. Blokové schéma číslicového regulačního obvodu



Obr. 70. Přibližné blokové schéma číslicového regulačního obvodu



Popis činnosti:

Vycházíme z předpokladu, že regulátor bude zpracovávat jedinou regulovanou veličinu $y(t)$. Snímač sejme informaci (spojitý signál) úměrnou regulované veličině. V porovnávacím členu je tato informace porovnávána s žádanou hodnotou řídicí veličiny a postupuje dál jako spojitá veličina jejíž velikost odpovídá regulační odchylce $e(t)$. Regulační odchylka $e(t)$ se přivádí na vstup vzorkovacího členu (vzorkovače). Vzorkovač vybírá většinou v pravidelných intervalech T_{vz} (perioda vzorkování) ze signálu $e(t)$ vzorky (impulsy) $e(k)$, jejichž šířka je zanedbatelná proti délce intervalu T_{vz} . Amplitudy vzorků se rovnají amplitudám regulační odchylky $e(t)$ v okamžicích vzorkování.

Signál ze vzorkovače je veden do zesilovače, který svým zesílením a posunem nuly určuje rozsah pro daný vstup. Zesílení je často nastaveno softwarově.

Po zesílení je diskretní signál pomocí A/D převodníku upraven do digitální podoby. Šířka datového slova určuje rozlišující schopnost převodníku a ovlivňuje přesnost celé regulační smyčky. Současné řídicí systémy pracují s datovým slovem o šířce 8 až 16 bitů.

Vstupní obvody reálných řídicích systémů zpracovávají řádově desítky až tisíce signálů a jejich zpracování samostatnými vzorkovacími obvody by bylo neúměrně drahé. Proto se zpravidla pro

skupinu vstupů použije jeden analogový obvod, na který se pomocí analogového multiplexoru postupně vstupní obvody připojují.

Dále putuje signál do centrální jednotky. Centrální jednotka tvoří základ řídicího systému. Vyhodnocuje vstupní datové signály nesoucí informaci o stavu řízeného objektu, provádí výpočet akčních veličin, alarmových hlášení a pomocí výstupních obvodů zasahuje zpět do procesu.

Informace na výstupu centrální jednotky má podobu posloupnosti čísel. Ta jsou převedena D/A převodníkem na diskrétní hodnoty signálu. V tvarovači je z těchto hodnot vytvořen signál v podobě stupňovité funkce, který již působí na akční člen.

3.2. Teorie číslicových regulačních obvodů

3.2.1. Diferenční rovnice jednokapacitního systému

V předcházejících kapitolách jsme členy spojitého regulačního obvodu popisovali diferenciálními rovnicemi. V oblasti diskrétního řízení jsou signály nespojité a proto je nemůžeme popisovat diferenciálními rovnicemi. Použijeme rovnice, jejichž proměnné jsou definovány jen v určitých časových okamžicích daných násobky periody vzorkování. Rovnice potom nejsou funkcí času t , ale proměnné $k \cdot T_{vz}$ nebo častěji zjednodušeně jen k . Nazýváme je *rovnice diferenční*.

V našem případě diferenční rovnice umožní postupný výpočet okamžitých hodnot regulované veličiny v časech $t = k \cdot T_{vz}$, kde $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ kde T je perioda vzorkování. Ukažme způsob matematického popisu spojitého statického systému prvního řádu, který je součástí číslicového regulačního obvodu, diferenční rovnicí.

Obrazový přenos statického systému prvního řádu: $F(p) = \frac{K}{1 + p \cdot T_s}$

Obr. 71. Odvození diferenční rovnice

Na vstup systému působí stupňovitý signál $u(t)$, který vznikl v tvarovači nultého řádu z diskrétní funkce $u(k)$. Perioda vzorkování je T_{vz} . Na vstup systému působí postupně skokové funkce s různou amplitudou a s dopravním zpožděním $T_{vz}, 2T_{vz}, 3T_{vz}, \dots$, takže výstupní veličina systému (regulovaná veličina) $y(t)$ se bude měnit podle exponenciál. V okamžicích $k = 2, 3, 4, \dots$ se v průběhu veličiny $y(t)$ projeví zlomy. Závislost hodnot výstupní veličiny $y(k)$ v jednotlivých časových okamžicích lze popsat obyčejnou lineární diferenční rovnicí prvního řádu s konstantními koeficienty. Průběh jednotlivých veličin si vysvětlíme obecně pro k -tý interval. Průběh vstupního signálu označíme $u(k)$, odezvu systému $y(\tau)$ v době τ od počátku k -tého intervalu. Přenos systému

můžeme převést na diferenciální rovnici: $F(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{K}{1 + p \cdot T_s}$,

po úpravě: $p \cdot T_s \cdot Y(p) + Y(p) = K \cdot U(p)$

Provedeme-li zpětnou Laplaceovu transformaci, dostaneme: $T_s \cdot y'(t) + y(t) = k \cdot u(t)$

Nyní provedeme Laplaceovu transformaci, ovšem pro nenulovou počáteční podmínku y_0 :

$p \cdot T_s \cdot Y(p) - T_s \cdot y_0 + Y(p) = K \cdot U(p)$ odtud dostaneme: $Y(p) = \frac{K \cdot U(p) + T_s \cdot y_0}{1 + p \cdot T_s}$

Protože $u(k) = konst$, platí $U(p) = u(k)/p$. Dále dosadíme podle předcházejícího obrázku $y_0 = y(k)$

$$Y(p) = \frac{K \cdot u(k)}{p \cdot (1 + p \cdot T_s)} + T_s \cdot y(k) \frac{1}{1 + p \cdot T_s}$$

Zpětnou Laplaceovou transformací pomocí tabulky dostaneme:

$$y(\tau) = K \cdot u(k) \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T_s}}\right) + y(k) \cdot e^{-\frac{\tau}{T_s}}$$

Zajímá nás hodnota veličiny $y(\tau)$ v okamžiku $k+1$, tj. pro $\tau = T_{vz}$. Označíme $e^{-\frac{T_{vz}}{T_s}} = D$.
Potom:

$$y(k+1) = D \cdot y(k) + K \cdot (1-D) \cdot u(k)$$

nebo také: $y(k+1) + a \cdot y(k) = b \cdot u(k)$, kde: $a = -D = -e^{-\frac{T_{vz}}{T_s}}$; $b = K \cdot (1-D) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{T_{vz}}{T_s}}\right)$

Odvozená diferenční rovnice umožňuje výpočet hodnot $y(k+1)$ v okamžicích vzorkování v závislosti na minulých hodnotách $y(k)$ a $u(k)$. Z hlediska jednoduššího řešení je výhodnější zápis ve tvaru (posunutý o jeden interval „vlevo“): $y(k) + a \cdot y(k-1) = b \cdot u(k-1)$

Diferenční rovnice lze řešit numericky nebo pomocí transformace Z.

3.2.2. Matematické „minimum“ pro řešení regulačních obvodů

a) Přímá Laplaceova transformace pro spojitý reg. obvody

Je definována vztahem: $F(p) = L\{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt$ kde p je Laplaceův operátor.

Funkci $f(t)$ nazýváme předmět nebo originál a označujeme ji zpravidla malým písmenem. Transformovanou funkci $f(t)$ nazýváme obraz funkce a označujeme ji velkými písmeny $F(p)$. Následují některé obrazy funkcí a věty Laplaceovy transformace.

linearita: $L\{f(t)\} = f(p)$; $L\{k \cdot f(t)\} = k \cdot f(p)$; $L\{c_1 \cdot f_1(t) + c_2 \cdot f_2(t)\} = c_1 \cdot f_1(p) + c_2 \cdot f_2(p)$

derivace: $L\{f'(t)\} = p \cdot f(p)$; $L\{f^{(n)}(t)\} = p^n \cdot f(p)$

integrál začínající v 0: $L\left\{\int_0^t f(t)dt\right\} = \frac{1}{p} \cdot f(p)$

signály: $L\{1(t)\} = \frac{1}{p}$; $L\{\delta(t)\} = 1$; $L\{t(t)\} = \frac{1}{p^2}$; $L\{t^n(t)\} = \frac{n!}{p^{n+1}}$

exponenciály: $L\{e^{-at}\} = \frac{1}{p+a}$; $L\{e^{at}\} = \frac{1}{p-a}$; $L\{t \cdot e^{-at}\} = \frac{1}{(p+a)^2}$; $L\left\{\frac{1}{a}(1-e^{-at})\right\} = \frac{1}{p \cdot (p+a)}$

sinus a cosinus: $L\{\sin(\omega t)\} = \frac{\omega}{p^2 + \omega^2}$, $L\{\cos(\omega t)\} = \frac{p}{p^2 + \omega^2}$

věta o posunutí v originálu: L. obraz funkce $f(t)$ posunuté o $a > 0$: $L\{f(t-a)\} = f(p) \cdot e^{-p \cdot a}$

obraz funkce posunuté o $a > 0$ se rovná obrazu původní funkce násobené činitelem $e^{-p \cdot a}$,

věta o posunutí v obraze: $L\{e^{at} \cdot f(t)\} = f(p-a)$

b) Zpětná Laplaceova transformace racionální lomené funkce

Určit originál $f(t)$ můžeme jestliže známe obraz $F(p)$, který je racionální lomenou funkcí proměnné p . Dále musí platit, že stupeň jmenovatele je alespoň o jednu vyšší než stupeň čitatele a kořeny jmenovatele jsou reálné a jednoduché ($p_0, p_1, \dots, p_n$). Potom obraz $F(p)$ můžeme obecně vyjádřit jako:

$$F(p) = \frac{P(p)}{Q(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + b_{m-2} p^{m-2} + \dots + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + a_{n-2} p^{n-2} + \dots + a_0} \quad \text{přičemž platí } m < n$$

Jmenovatel lze vyjádřit součinem kořenových činitelů: $Q(p) = a_n \cdot (p - p_0) \cdot (p - p_1) \dots (p - p_n)$

Potom:
$$f(t) = L^{-1}\{F(p)\} = \sum_{k=0}^n \frac{P(p_k)}{Q'(p_k)} e^{p_k \cdot t}$$

kde $Q'(p_k)$ je hodnota derivace jmenovatele obrazu $F(p)$ při dosazení kořene p_k .

Postup při výpočtu originálu $f(t)$ je ukázán na následujícím příkladu:

k funkci (obrazu) $F(p)$ budeme hledat originál (předmět) $f(t)$.

$F(p) = \frac{p^2 + 1}{(2p + 1)(p + 1)(p + 2)}$ potom: $P(p) = p^2 + 1$; a: $Q(p) = (2p + 1)(p + 1)(p + 2)$

kořeny jmenovatele: $p_0 = -\frac{1}{2}$, $p_1 = -1$, $p_2 = -2$,

derivace jmenovatele: $Q'(p) = 6p^2 + 14p + 7$,

dosazení jednotlivých kořenů p_k : $P(p_0) = \frac{5}{4}$, $P(p_1) = 2$, $P(p_2) = 5$,

$Q'(p_0) = \frac{3}{2}$, $Q'(p_1) = -1$, $Q'(p_2) = 3$,

Dosadíme do základního vztahu a dostaneme: $f(t) = \frac{5}{6} e^{-\frac{1}{2}t} - 2e^{-t} + \frac{5}{3} e^{-2t}$.

c) Transformace Z pro číslicové regulační obvody

Transformace Z se používá k řešení diferenčních rovnic analogicky s použitím Laplaceovy transformace ve spojité oblasti. Transformace Z diskrétní funkce (z-obraz) je definována vztahem:

$$Z\{f(k)\} = F(z) = \sum_{k=0}^{\infty} f(k) z^{-k}$$

Diskrétní funkci $f(k)$ nazýváme originál (předmět) a $F(z)$ je její obraz. I pro tuto transformaci používáme několik důležitých vět:

Věta o linearitě: Je-li $f(k) = a_1 \cdot f_1(k) + a_2 \cdot f_2(k) + \dots + a_n \cdot f_n(k)$

potom $F(z) = a_1 \cdot F_1(z) + a_2 \cdot F_2(z) + \dots + a_n \cdot F_n(z)$

Věta o posunutí v originále: jestliže funkci $f(k)$ odpovídá obraz $F(z)$, potom funkce $f(k-n)$ je posunutá na ose času o n intervalů vpravo a odpovídá ji obraz $z^{-n} F(z)$.

Platí: $Z\{f(k-n)\} = z^{-n} F(z)$

Věta o počáteční a konečné hodnotě funkce: $\lim_{k \rightarrow 0} f(k) = \lim_{z \rightarrow \infty} F(z)$, $\lim_{k \rightarrow \infty} f(k) = \lim_{z \rightarrow 0} F(z)$

d) Zpětná transformace Z^{-1} racionální lomené funkce

Zpětnou transformací Z^{-1} se k danému obrazu $F(z)$ určuje originál (předmět) $f(k)$, tzn. diskrétní hodnoty funkce $f(k)$ pro jednotlivá $k = 0, 1, 2, \dots$

Metoda dělení čitatele jmenovatelem

Je jednou z metod, jak získat funkční hodnoty originálu $f(k)$ z obrazu $F(z)$. Tímto dělením získáme mocninou řadu, jejíž koeficienty při mocninách z^{-k} , kde $k = 0, 1, 2, \dots$ odpovídají hodnotám funkce $f(k)$ v časových okamžicích $k = 0, 1, 2, \dots$

Příklad: Určete originál (hodnoty funkce $f(k)$) k obrazu danému racionální lomenou funkcí:

$$F(z) = \frac{z - 0,8}{z^2 - 1,5z + 0,5}$$

Řešení:

Dělíme čitatele jmenovatelem $(z - 0,8) : (z^2 - 1,5z + 0,5) = z^{-1} + 0,7z^{-2} + 0,55z^{-3} + \dots$

$$\begin{array}{r} z - 1,5 + 0,5 z^{-1} \\ 0,7 - 0,5 z^{-1} \\ 0,7 - 1,05 z^{-1} + 0,35 z^{-2} \\ 0,55 z^{-1} - 0,35 z^{-2} \end{array}$$

Odtud dostaneme: $f(0) = 0$, $f(1) = 1$, $f(2) = 0,7$, $f(3) = 0,55 \dots$

Metoda použití vzorce

Je podobná postupu u zpětné Laplaceovy transformace. Vycházíme zde z obecného tvaru racionální lomené funkce proměnné z :

$$F(z) = \frac{P(z)}{Q(z)} = \frac{b_m z^m + b_{m-1} z^{m-1} + b_{m-2} z^{m-2} + \dots + b_0}{a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + a_{n-2} z^{n-2} + \dots + a_0} \quad \text{platí } m < n$$

Pro kořeny jmenovatele, které jsou reálné a navzájem různé pak můžeme originál $f(k)$ k obrazu $F(z)$

určit ze vztahu:
$$f(k) = Z^{-1}\{F(z)\} = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{P(z_i)}{Q'(z_i)} z_i^{k-1} \quad \text{kde } k = 0, 1, 2, \dots$$

z_i jsou kořeny jmenovatele $Q(z)$, $Q'(z_i)$ je hodnota derivace jmenovatele $Q(z)$ po dosazení $z = z_i$

Příklad: nalezněte předmět (originální funkci $f(k)$) k obrazu $F(z)$ z předcházejícího příkladu.

Řešení: $P(z) = z - 0,8$; $Q(z) = z^2 - 1,5z + 0,5$; $Q'(z) = 2z - 1,5$;

kořeny jmenovatele $Q(z)$ jsou: $z_1 = 1$; $z_2 = 0,5$;

potom po dosazení jednotlivých kořenů do čitatele a jmenovatele dostaneme:

$P(z_1) = 0,2$; $Q'(z_1) = 0,5$; $P(z_2) = -0,3$; $Q'(z_2) = -0,5$

Obraz $F(z)$ vyjádřený pomocí uvedeného vzorce jako součet parciálních zlomků je:

$$F(z) = 0,4 \frac{z}{z-1} \cdot z^{-1} + 0,6 \frac{z}{z-0,5} \cdot z^{-1}$$

Odpovídající předmět je: $f(k) = 0,4 + 0,6 \cdot 0,5^{k-1}$

Dosazením za $k = 1, 2, 3, \dots$ dostaneme jednotlivé funkční hodnoty diskrétné funkce $f(k)$:

$f(1) = 1$; $f(2) = 0,7$; $f(3) = 0,55 \dots$

Hodnotu diskrétní funkce v nule $f(0)$ určíme z věty o počáteční hodnotě funkce:

$$\lim_{k \rightarrow 0} f(k) = \lim_{z \rightarrow \infty} F(z) = 0$$

3.2.3. Řešení diferenčních rovnic

Diferenční rovnici lze řešit numericky nebo transformací Z .

Numerické řešení

Vycházíme z toho, že diferenční rovnice je vlastně algoritmus pro postupný výpočet hodnot veličiny $y(k)$, kde $k = 1, 2, 3, \dots, n$, známe-li hodnoty koeficientů diferenční rovnice, průběh signálu $u(k)$ a počáteční podmínky.

Diferenční rovnice regulovaného systému n-tého řádu:

$$y_{(k)} + \sum_{i=1}^n a_i \cdot y_{(k-i)} = \sum_{i=1}^n b_i \cdot u_{(k-i)}$$

Nevýhodou numerického výpočtu je to, že pro výpočet vzorku s pořadovým číslem např. 1000, musíme postupně vypočítat hodnoty všech předcházejících 999 vzorků. Obecně tedy platí, že pro výpočet hodnoty v okamžiku k (přesněji $k \cdot T_{vz}$), musí být známy hodnoty v okamžicích $k-1$, $k-2$, ..., $k-j$ (kde j = pořadí vzorku). Proto je tato metoda vhodná pro řešení na počítači.

Příklad: vyšetřete přechodovou charakteristiku jednodukapacitního systému s parametry:

$K = 1$; $T_s = 1s$; perioda vzorkování $T_{vz} = 0,2s$; $y(0) = 0$; $u(k) = 1$; pro $k = 0, 1, 2, \dots, n$

Diferenciální rovnice systému: $T_s \cdot y'(t) + y(t) = K \cdot u(t)$

Diferenční rovnice (viz. 3.2.1.): $y(k) + a \cdot y(k-1) = b \cdot u(k-1)$

$$D = e^{-\frac{T_{vz}}{T_s}} = 0,82; a = -0,82; b = 1 - D = 0,18;$$

$$y(k) = 0,82 y(k-1) + 0,18 u(k-1)$$

$$y(1) = 0,82 y(0) + 0,18 u(0) = 0,18$$

$$y(2) = 0,82 y(1) + 0,18 u(1) = 0,82 \cdot 0,18 + 0,18 = 0,33$$

$$y(3) = 0,82 y(2) + 0,18 u(2) = 0,82 \cdot 0,33 + 0,18 = 0,45$$

$$y(4) = 0,82 y(3) + 0,18 u(3) = 0,82 \cdot 0,45 + 0,18 = 0,55$$

$$y(5) = 0,82 y(4) + 0,18 u(4) = 0,82 \cdot 0,55 + 0,18 = 0,63$$

$$y(6) = 0,82 y(5) + 0,18 u(5) = 0,82 \cdot 0,63 + 0,18 = 0,70$$

Tímto postupem můžeme vypočítat požadovaný počet hodnot přechodové charakteristiky a charakteristiku sestojit.

Řešení pomocí transformace Z

Uuríme přenos $F(z) = \frac{Y(z)}{U(z)}$ a dosadíme Z-obraz vstupní veličiny ve tvaru jednotkového skoku:

$$Y(z) = \frac{z}{z-1} \cdot F(z) = \frac{P(z)}{Q(z)}$$

Pro rovnici z předchozího příkladu dostaneme po transformaci:

$$Y(z) - 0,82 \cdot z^{-1} \cdot Y(z) = 0,18 \cdot z^{-1} \cdot U(z)$$

$$\text{Pro přenos platí: } F(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{0,18 \cdot z^{-1}}{1 - 0,82 \cdot z^{-1}} = \frac{0,18}{z - 0,82}$$

Dosazením za $U(z) = \frac{z}{z-1}$ (obraz jednotkového skoku) bude obraz výstupní veličiny:

$$Y(z) = \frac{z}{z-1} \cdot \frac{0,18}{z-0,82} = \frac{P(z)}{Q(z)}$$

Dle postupu z předcházející kapitoly určíme kořeny charakteristické rovnice $Q(z) = 0$ a dosadíme

$$\text{je do vzorce: } y(k) = Z^{-1}\{Y(z)\} = \sum_{i=1}^2 \frac{P(z_i)}{Q'(z_i)} z_i^{k-1}$$

Získáme vztah pro $y(k)$ a dosazením za k dostaneme hodnoty výstupní veličiny.

Výhodou oproti numerické metodě je to, že můžeme určit hodnotu funkce pro libovolné k a to bez znalosti předchozích funkčních hodnot.

3.2.4. Diferenční rovnice regulátorů

Podobně jako regulovaného systému můžeme popsat diferenční rovnicí také regulátory. Vstupem regulátoru je regulační odchylka $e(k)$ a výstupem akční veličina $u(k)$. Koeficienty číselných regulátorů budeme označovat písmenem r tj. r_0 , r_{-1} a r_1 pro rozlišení od spojitých regulátorů kde byly použity koeficienty k tj. k_0 , k_{-1} a k_1 .

a) Regulátor P

Diferenční rovnici odvodíme z rozdílu výstupního signálu pro dva sousední vzorky (k a $k-1$).

$$u(k) = r_0 \cdot e(k) \qquad u(k-1) = r_0 \cdot e(k-1)$$

Naším cílem je dostat rekurentní vztah pro $u(k)$, tzn. že každou následující hodnotu výstupní veličiny $u(k)$ získáme z hodnot předchozího vzorku (časového intervalu) $u(k-1)$ a z „aktuální“ regulační odchylky $e(k)$. Toho docílíme vzájemným odečtením předchozích rovnic.

$$u(k) - u(k-1) = r_0 \cdot e(k) - r_0 \cdot e(k-1) = r_0 \cdot [e(k) - e(k-1)]$$

po úpravě:
$$\underline{u(k) = r_0 \cdot [e(k) - e(k-1)] + u(k-1)}$$

b) Regulátor I

Ve spojitě oblasti je integrační regulátor popsán rovnicí: $u(t) = k_{-1} \cdot \int e(t) dt$

Pro odvození diferenční rovnice I regulátoru budeme používat konstantu $r_{-1} = k_{-1} = \frac{k_0}{T_i}$

Potom:
$$u(k) = r_{-1} \cdot T_{vz} \cdot \sum_{j=0}^k e(j) \qquad u(k-1) = r_{-1} \cdot T_{vz} \cdot \sum_{j=0}^{k-1} e(j)$$

$$u(k) - u(k-1) = r_{-1} \cdot T_{vz} \cdot \left(\sum_{j=0}^k e(j) - \sum_{j=0}^{k-1} e(j) \right) = r_{-1} \cdot T_{vz} \cdot e(k)$$

po úpravě:
$$\underline{u(k) = r_{-1} \cdot T_{vz} \cdot e(k) + u(k-1)}$$

c) Regulátor D

Ve spojitě oblasti je derivační regulátor popsán rovnicí: $u(t) = k_1 \cdot \frac{de(t)}{dt} = k_1 \cdot e'(t)$

Pro odvození diferenční rovnice budeme používat konstantu: $r_1 = k_1 = k_0 \cdot T_d$

$$u(k) = \frac{r_1}{T_{vz}} [e(k) - e(k-1)] \qquad u(k-1) = \frac{r_1}{T_{vz}} [e(k-1) - e(k-2)]$$

$$u(k) - u(k-1) = \frac{r_1}{T_{vz}} \cdot e(k) - 2 \cdot \frac{r_1}{T_{vz}} \cdot e(k-1) + \frac{r_1}{T_{vz}} \cdot e(k-2)$$

po úpravě:
$$\underline{u(k) = \frac{r_1}{T_{vz}} [e(k) - 2 \cdot e(k-1) + e(k-2)] + u(k-1)}$$

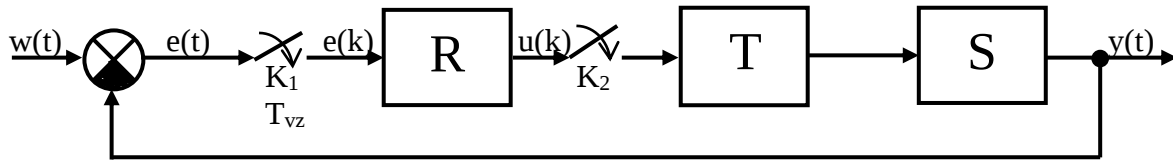
d) PI regulátor: $u(k) = (r_0 + r_{-1} \cdot T_{vz}) \cdot e(k) - r_0 \cdot e(k-1) + u(k-1)$

e) PD regulátor: $u(k) = (r_0 + \frac{r_1}{T_{vz}}) \cdot e(k) - (r_0 + 2 \cdot \frac{r_1}{T_{vz}}) \cdot e(k-1) + \frac{r_1}{T_{vz}} \cdot e(k-2) + u(k-1)$

f) PIDregulátor: $u(k) = (r_0 + r_{-1} \cdot T_{vz} + \frac{r_1}{T_{vz}}) \cdot e(k) - (r_0 + 2 \cdot \frac{r_1}{T_{vz}}) \cdot e(k-1) + \frac{r_1}{T_{vz}} \cdot e(k-2) + u(k-1)$

3.2.5. Analýza číslicového regulačního obvodu

Pro analýzu číslicového obvodu budeme používat následující blokové schéma regulačního obvodu (počítač, tvarovač, systém):



V tomto schématu je číslicová část oddělena od spojité (analogové) části vzorkovacími kontakty K_1 a K_2 , které spínají se stejnou periodou T_{vz} . Číslicový regulační obvod se tedy skládá z diskrétního regulátoru vlastně diskrétně pracujícího členu – počítače nebo PLC s diskrétním přenosem:

$$F_p(z) = \frac{U(z)}{E(z)}$$

a ze dvou spojitě pracujících členů: tvarovače 0. řádu a regulovaného systému 1. řádu. Jejich přenosy jsou:

$$\text{tvarovač: } F_T(p) = \frac{1 - e^{-p \cdot T_{vz}}}{p}; \quad \text{systém 1. řádu: } F_S(p) = \frac{K}{1 + p \cdot T_1}$$

Podle pravidel algebry diskrétních přenosů je diskrétní přenos dvou spojitě pracujících obvodů zapojených za sebou: $\overline{F_T F_S}(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = Z\{L^{-1}[F_T(p) \cdot F_S(p)]\}$

$$\text{Potom pro systém 1. řádu a tvarovač 0. řádu platí: } F_T(p) \cdot F_S(p) = \frac{1 - e^{-p \cdot T_{vz}}}{p} \cdot \frac{K}{1 + p \cdot T_1}$$

$$\text{Protože: } e^{p \cdot T_{vz}} = z, \text{ je: } 1 - e^{-p \cdot T_{vz}} = 1 - z^{-1} \text{ a platí: } \overline{F_T F_S}(z) = (1 - z^{-1}) \cdot Z\left\{L^{-1}\left[\frac{K}{p \cdot (1 + p \cdot T_1)}\right]_{i=k \cdot T_{vz}}\right\}$$

Zpětnou Laplaceovou transformací výrazu v závorce dostaneme:

$$L^{-1}\left[\frac{K}{p \cdot (1 + p \cdot T_1)}\right]_{i=kT} = K \cdot (1 - D^k); \text{ kde } D = e^{-\frac{T_{vz}}{T_1}}$$

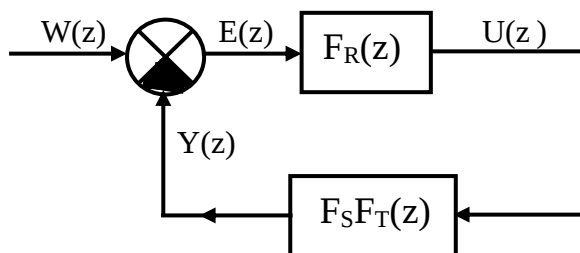
$$\text{Transformací } Z \text{ dostaneme: } Z\{K \cdot (1 - D^k)\} = K \cdot \left(\frac{z}{z-1} - \frac{z}{z-D}\right)$$

$$\text{Diskrétní přenos } \overline{F_T F_S}(z) \text{ sériového spojení tvarovače a systému je: } \frac{Y(z)}{U(z)} = K \frac{(1-D) \cdot z^{-1}}{1-D \cdot z^{-1}}$$

$$\text{Po úpravě: } Y(z) - D \cdot z^{-1} Y(z) = K \cdot (1-D) \cdot z^{-1} \cdot U(z)$$

$$\text{Po zpětné transformaci } Z \text{ dostaneme diferenční rovnici: } y(k) - D \cdot y(k-1) = K \cdot (1-D) \cdot u(k-1)$$

Blokové schéma číslicového regulačního obvodu můžeme též vyjádřit v podobě:



Příklad: Regulovaný systém 1. řádu s přenosem $F_S(p) = \frac{5}{1+10p}$ je řízen regulátorem I s přenosem

$F_R(p) = \frac{0,04}{p}$. Určete číslicový algoritmus řízení ve tvaru diferenční rovnice pro případ

jednotkového skoku změny řídicí veličiny, je-li součástí regulačního obvodu vzorkovač s periodou vzorkování $T = 5$ s a tvarovač 0. řádu. Pro daný obvod napíšeme diferenční rovnice, které známe z předchozích kapitol:

Regulovaný systém: $y(k) + a \cdot y(k-1) = b \cdot u(k-1)$

Regulátor: $u(k) = r_{-1} \cdot T_{vz} \cdot e(k) + u(k-1)$

Rozdílový člen: $e(k) = w(k) - y(k)$

Algoritmus řízení najdeme řešením soustavy diferenčních rovnic:

1. Do rovnice regulovaného systému dosadíme za $u(k-1)$ z rovnice regulátoru I. Potom:

$$y(k) + a \cdot y(k-1) = b \cdot [r_{-1} \cdot T_{vz} \cdot e(k-1) + u(k-2)]$$

2. Z rovnice rozdílového členu dosadíme za $e(k-1)$:

$$y(k) + a \cdot y(k-1) = b \cdot [r_{-1} \cdot T_{vz} \cdot (w(k-1) - y(k-1)) + u(k-2)]$$

3. Roznásobíme pravou stranu předchozí rovnice a dosadíme za $b \cdot u(k-2)$ (z rovnice systému).

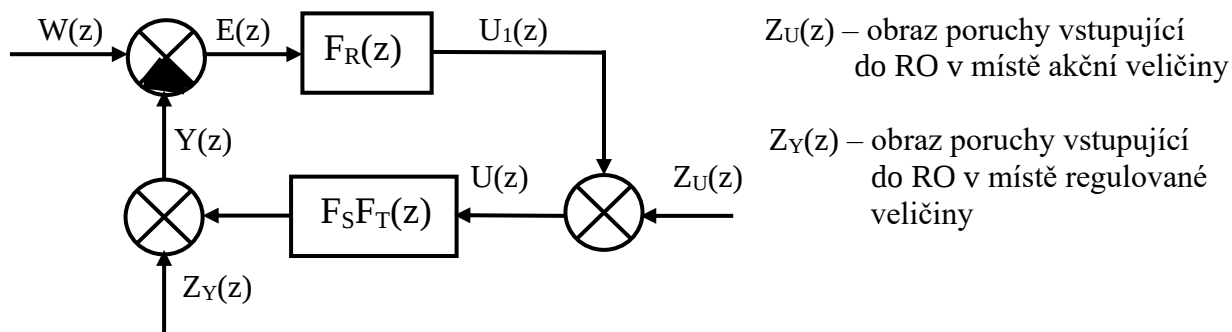
$$y(k) + a \cdot y(k-1) = b \cdot r_{-1} \cdot T_{vz} \cdot w(k-1) - b \cdot r_{-1} \cdot T_{vz} \cdot y(k-1) + (y(k-1) + a \cdot y(k-2))$$

4. Rovnici upravíme a dosadíme skutečné koeficienty: $a = -0,606$; $b = 1,97$;

$$y(k) - 1,212 \cdot y(k-1) + 0,606 \cdot y(k-2) = 1,97 \cdot w(k-1)$$

Dosazením za $k = 0, 1, 2, \dots, n$ a dosazením hodnoty řídicí veličiny $w(k)$, dostaneme průběh regulačního pochodu při skokové změně řízení.

3.2.6. Přenosy a stabilita číslicového regulačního obvodu



Přenos řízení určíme takto:

pro přenos řízení $F_w(z) = \frac{Y(z)}{W(z)}$ platí rovnice:

$$Y(z) = \overline{F_T F_S}(z) \cdot U(z);$$

$$U(z) = U_1(z) \text{ pro } Z_U(z) = 0$$

$$E(z) = W(z) - X(z); \quad U_1(z) = F_R(z) \cdot E(z)$$

Řešením rovnic dostaneme: $X(z) = \overline{F_T F_S}(z) \cdot F_R(z) \cdot [W(z) - X(z)]$

Po úpravě: $\frac{Y(z)}{W(z)} = F_w(z) = \frac{\overline{F_T F_S}(z) \cdot F_R(z)}{1 + \overline{F_T F_S}(z) \cdot F_R(z)}$

Přenos poruchy působící v místě akční veličiny $F_u(z) = \frac{Y(z)}{Z_u(z)}$ **určíme takto:**

$$\begin{aligned} Y(z) &= \overline{F_T F_S}(z) \cdot U(z) & \text{pro } W(z) &= 0 \\ U(z) &= Z_u(z) + U_1(z) & E(z) &= -X(z) \\ U_1(z) &= F_R(z) \cdot E(z) = -F_R(z) \cdot Y(z) & U(z) &= Z_u(z) - F_R(z) \cdot Y(z) \end{aligned}$$

$$Y(z) = \overline{F_T F_S}(z) \cdot (Z_u(z) - F_R(z) \cdot Y(z))$$

$$Y(z) \cdot [1 + \overline{F_T F_S}(z) \cdot F_R(z)] = \overline{F_T F_S}(z) \cdot Z_u(z)$$

$$\frac{Y(z)}{Z_u(z)} = F_u(z) = \frac{\overline{F_T F_S}(z)}{1 + \overline{F_T F_S}(z) \cdot F_R(z)}$$

Přenos poruchy působící v místě regulované veličiny určíme podobným způsobem:

$$\frac{Y(z)}{Z_Y(z)} = F_x(z) = \frac{1}{1 + \overline{F_T F_S}(z) \cdot F_R(z)}$$

Položíme-li $\overline{F_T F_S}(z) \cdot F_R(z) = F_0(z)$, je rovnice $1 + F_0(z) = 0$ tzv. *charakteristická rovnice* uzavřeného číslicového regulačního obvodu.

Definice kritéria stability:

Aby byl číslicový regulační obvod stabilní, musí všechny kořeny jeho charakteristické rovnice ležet uvnitř jednotkové kružnice se středem v počátku komplexní roviny.

3.2.7. Návrh algoritmů řízení

Pojem algoritmus je podle slovníku American Heritage Dictionary definován jako „postup při řešení problémů, obzvláště zavedený a opakovatelný výpočetní postup s konečným počtem kroků pro řešení nějakého problému“. Slovo *algoritmus* je odvozeno od jména perského matematika žijícího v Chorézmě (dnes Chiva v Uzbekistánu) jménem *Abou Jafar Muhammad Ibn Músá al-Khwarizmí*, jenž roku 825 napsal důležitou matematickou práci *Kitab al-jabr wa'l-mugabalah* (spis byl přeložen do latiny ve 12. stol. pod názvem „Liber algebrae et almucabola“, jméno autora přeloženo jako Algorismi). Ze spojení al-jabr (čtete: al-džabr) bylo odvozeno slovo *algebra*.

Při návrhu algoritmu řízení jde o určení takové posloupnosti akčních zásahů, aby regulovaný systém byl optimálně řízen. Vycházíme ze znalosti dynamického modelu systému, ze kterého buď určujeme pro známou strukturu regulátoru číselné hodnoty konstant regulátoru, nebo určujeme strukturu regulátoru i jeho konstanty. Návrh je vždy proveden pro určité kritérium kvality regulace, v jehož smyslu je pak systém řízen optimálně.

a) Návrh s předem známou strukturou regulátoru

Je-li předem známa struktura regulátoru (pracujeme obvykle s číslicovou verzí analogového regulátoru PID), jde o určení konstant regulátoru. K výpočtu konstant regulátoru lze použít např. kritérium maximálně přípustného překmitu (přeregulování) regulované veličiny při poruše působící v místě akční veličiny (popř. regulované veličiny) nebo při změně řídicí veličiny.

Metoda, podle které budeme konstanty regulátoru zjišťovat, umožňuje výpočet konstant regulátorů pro zvolené přeregulování Δx_0 regulované veličiny v mezích 0 až 60 % a to pro jednotkový skok poruchové veličiny z , působící na vstupu systému s přenosem maximálně druhého řádu a pro jednotkový skok řídicí veličiny.

Pro zadanou hodnotu přeregulování dále umožňuje výpočet charakteristických veličin regulačního pochodu, jako je doba výběhu T_m , za kterou dosáhne přeregulování své maximální hodnoty, nebo doba $T_{2\%}$, za kterou dojde k poklesu regulované veličiny na 2% ustáleného stavu.

Údaje pro výpočet konstant regulátorů a charakteristických veličin regulačního pochodu bychom našli v příslušné literatuře (např. učebnice autorů Maršík-Boltík: Automatizační technika pro 4. ročník SPŠ str. 126).

Obr. 72. Charakteristické veličiny regulačního pochodu

b) Návrh pro neznámou strukturu regulátoru

(kritérium konečného regulačního pochodu s minimálním počtem regulačních kroků)

Určujeme-li jak strukturu, tak i konstanty regulátoru, lze použít kritérium konečného regulačního pochodu s minimálním počtem regulačních kroků.

Naším úkolem je navrhnout takový algoritmus řízení, kterým bude regulovaný systém řízen tak, aby po skokové změně řídicí veličiny dosáhla regulovaná veličina žádané hodnoty w během minimálního počtu regulačních kroků. Nejmenší počet regulačních kroků, během nichž může regulovaná veličina dosáhnout žádané hodnoty dané řídicí veličinou, je dán skutečností, že jakákoliv změna působící na vstupu regulovaného systému v časovém okamžiku k se pojeví na jejím výstupu až v časovém okamžiku $k+1$, tzn. se zpožděním jednoho regulačního kroku. Dále předpokládáme, že regulátor pracuje bez zpoždění, tzn. že k výpočtu akčního zásahu $u(k)$ lze ještě použít diskrétní hodnotu regulované veličiny $x(k)$. Kritérium tedy vychází z požadavku, aby hodnota regulované veličiny $y(k)$ měla hodnotu řídicí veličiny z předcházejícího kroku $w(k-1)$. Tento požadavek lze vyjádřit rovnicí:

$$y(k) = w(k-1)$$

Příslušný přenos řízení $F(z) = z^{-1}$ nazýváme *minimální tvar přenosu řízení*.

Máme-li systém popsán diferenční rovnicí, potom hledáme akční signál, kterým by systém byl řízen tak, že při skokové změně akční veličiny dosáhne regulovaná veličina žádané hodnoty v nejbližším regulačním kroku a tuto hodnotu si zachová i v dalších krocích.

Postup: z diferenční rovnice systému: $y(k) + \sum_{i=1}^n a_i y(k-i) = \sum_{i=1}^n b_i u(k-i)$ vypočítáme $y(k)$

a dosadíme $y(k) = w(k-1)$. Dostaneme: $w(k-1) = -\sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + \sum_{i=1}^n b_i u(k-i)$.

Jelikož je naším cílem nalézt vztah pro $u(k)$, vyjádříme nejprve člen s proměnnou $u(k-1)$, celou rovnici posuneme o krok doprava a tím dostaneme rovnici obsahující proměnnou $u(k)$. Vyjádříme $u(k)$ a dostaneme výsledný tvar pro hodnotu akční veličiny $u(k)$. Pak tedy bude:

$$w(k-1) = -\sum_{i=1}^n a_i y(k-i) + b_1 u(k-1) + \sum_{i=2}^n b_i u(k-i)$$

Tuto rovnici posuneme o krok doprava: $w(k) = -\sum_{i=1}^n a_i y(k-i+1) + b_1 u(k) + \sum_{i=2}^n b_i u(k-i+1)$

a $u(k)$ osamostatníme na levé straně: $u(k) = \frac{1}{b_1} \left[\sum_{i=1}^n a_i y(k-i+1) - \sum_{i=2}^n b_i u(k-i+1) + w(k) \right]$

Touto rovnicí neznámé struktury bude regulovaný systém řízen.

3.2.8. Simulace řízení na počítači

Před nasazením algoritmu řízení do konkrétního automatizovaného systému řízení, obvykle prověřujeme do jaké míry navržený algoritmus splňuje naše očekávání. Reálný systém nahrazujeme jeho modelem ve tvaru diferenční rovnice (popř. diskrétního přenosu) a pro daný algoritmus řízení vyšetřujeme s použitím počítače (u jednodušších algoritmů stačí kalkulačka) průběh regulačního pochodu pro různé typy poruch působících v různých místech regulačního obvodu. Jedná se o tzv. *simulaci řízení*. Je to součást prací ve fázi projektování automatizovaných systémů.

Známe-li přenosy $F_w(z)$, $F_u(z)$ a nebo $F_x(z)$, lze pro známý průběh řídicí veličiny (žádané hodnoty) nebo některé z poruchových veličin (nejraději ve tvaru skokové funkce) vypočítat průběh regulačního pochodu tzn. průběh regulované veličiny.

Příklad: mějme systém 1. řádu s diskrétním přenosem: $\overline{F_T F_S}(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b \cdot z^{-1}}{1 + a \cdot z^{-1}}$

a číslicový regulátor s přenosem: $F(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = r_0$.

Porucha $z_u(k)$ má tvar jednotkového skoku a působí v místě akční veličiny.

Diferenční rovnice systému včetně tvarovače s přenosem $\overline{F_T F_S}(z)$ pro okamžik $k+1$ na výstupu je

$$y(k+1) + a y(k) = b u(k).$$

Rovnice číslicového regulátoru s přenosem $F_R(z) = r_0$ realizovaného programem v počítači je:

$$\begin{aligned} u_1(k) &= r_0 e(k) = -r_0 y(k) & \text{kde } e(k) &= w(k) - y(k) & \text{a } w(k) &= 0 \\ u(k) &= u_1(k) + z_u(k) \end{aligned}$$

Postup výpočtu:

- pro $k=0$: na začátku (v nultém kroku) je $y(0) = 0$, $u_1(0) = 0$ a $z_u(0) = 1$,
dostaneme z rovnice součtového členu $u(0) = z_u(0) = 1$
odezvu na výstupu systému dostaneme dosazením do rovnice $y(k+1) + a y(k) = b u(k)$
potom **$y(1) = b$**
- pro $k=1$: pro akční veličinu z rovnice číslicového regulátoru $u_1(k) = -r_0 y(k)$
vypočítáme $u_1(1) = -r_0 y(1) = -r_0 b$
z rovnice $u(k) = u_1(k) + z_u(k)$ vypočítáme $u(1) = u_1(1) + z_u(1) = 1 - r_0 b$
odezva na výstupu systému potom je: $y(2) = -a y(1) + b u(1) = -b(a + r_0 b) + b$
- pro $k=2$: pro akční veličinu platí: $u_1(2) = -r_0 y(2)$
pro vstupní veličinu systému platí: $u(2) = u_1(2) + z_u(2)$

Tímto postupem získáme hodnoty na vstupech a výstupech jednotlivých členů regulačního obvodu. Hodnoty získáváme postupně po jednotlivých krocích tak, jak je tomu při regulaci v reálném regulačním obvodu. Posloupnosti hodnot jednotlivých veličin zobrazíme v závislosti na čase (kT).

3.3. Fuzzy logika

3.3.1. Historie

Slovo fuzzy [fazi] znamená v překladu mlhavý, neurčitý, rozplizlý. V češtině se pro označení fuzzy logika ustálil překlad mlhavá logika.

V roce 1965 publikoval profesor elektrotechniky na kalifornské univerzitě v Berkeley Lotfi Aliasker Zadeh ['za:der] (*1921 †2017) základní práci „Fuzzy sets“. Profesor L. A. Zadeh, který byl původem azerbajdžánec žijící v USA, přišel na myšlenku fuzzy množin při přiřazování neurčitých prvků množinám. Jeho myšlenkou bylo nepřirázovat objekty množinám na základě konkrétních hraničních hodnot, ale pracovat i s neurčitostí. Definoval proto tzv. sílu příslušnosti (membership – m) každého prvku k dané množině. Síla příslušnosti může plynule nabývat hodnot od nuly k jedné. Profesor Zadeh si uvědomil, že lidé jsou schopni rozhodovat i na základě neurčitosti, vágní a nenumernické informace a dosahují mnohdy lepších výsledků než stroje. Zavedl proto pojem jazykové proměnné, jejíž hodnotou nejsou čísla, ale slova (velmi malý, velký, dost velký, docela malý atd.).

Teorie mlhavých množin narazila tehdy na nepochopení a odpor exaktních matematiků a informatiků. V západním světě vyvolávala nová teorie u vědců jen smích. Jinak tomu bylo na Dálném východě – v Japonsku a Číně. Uvádí se, že uvažování v odstínech vyhovuje asijské filosofii více než evropskému ano/ne. Ale i v Japonsku trvalo dost dlouho, než byly rozpoznány netušené možnosti fuzzy logiky. V devadesátých letech 20. stol. již bylo využito v plném proudu – spotřební elektronika, řízení metra v Sendai (ostrov Honšú, od roku 1987), řízení výtahů, rozpoznávání obrazu atd. Udává se, že Japonsko ovládalo v roce 1991 plných 80% světového trhu s průmyslovými produkty s fuzzy řízením. V západním světě nebylo nasazení fuzzy logiky tak prudké – přistávací modul NASA, cementárna v Dánsku, atd. Nyní je již běžné využití v automatických pračkách, myčkách nádobí, videokamerách a další spotřební elektronice.

3.3.2. Podstata fuzzy logiky

Jedná se o matematickou metodu popisu neurčitého vyjadřování, tak blízkého člověku: „přidej trochu vody“, „je docela horko“, „ne moc velký člověk“ apod. Fuzzy logika naplňuje toto vyjadřování matematickým obsahem, proto jí rozumí i počítač. Lze tak zpracovávat i nepřesná (neurčitá) vstupní data – což není možné u klasické Booleovy algebry. Nové pojmy se kterými v této oblasti pracujeme jsou *jazyková proměnná* a *síla příslušnosti*.

Jazyková proměnná

Jazyková neboli lingvistická proměnná je soubor slovních pojmů pomocí kterých vyjadřujeme souvislost mezi fuzzy množinou a fyzikální veličinou. V češtině můžeme s výhodou použít odstupňovaných přídavných jmen jako: nejmenší-menší-malý-střední-velký-větší-největší.

Síla příslušnosti prvku

Síla příslušnosti prvku (fyzikální veličiny jako např.: „okamžitá teplota vody“) k fuzzy množině (definované názvem jako např.: „teplota koupele“) je logická hodnota, která může nabývat všech hodnot od nuly do jedné (včetně 0 a 1). Při hodnotě 0 prvek do množiny určitě nepatří, 0,2 znamená asi sotva, 0,5 snad, 0,8 téměř jistě, 1 znamená zcela jistou příslušnost k množině. Tím se vyhneme situaci, kdy v klasické logice například teplotu 25°C označíme jako příjemnou a 24,9°C jako nepříjemnou.

Síla příslušnosti přitom nesouvisí vůbec s pravděpodobností jevu (ta nabývá také hodnot 0 až 1), protože nám neříká nic o tom, zda jev nastane. Pouze určuje s jakou „sílou“ patří konkrétní hodnota do zvolené množiny.

Příklad: Mějme například množinu teplot vzduchu v místnosti označenou jako *Příjemná teplota*. Intuitivně cítíme, že teplota 0°C není zcela určitě příjemná, 10°C je asi sotva příjemná teplota, 20°C je téměř jistě příjemná teplota a 25°C je zcela jistě příjemná teplota. Můžeme tedy stanovit tabulku síly příslušnosti skutečné teploty k množině „*Příjemná teplota*“:

Teplota [°C]	Síla příslušnosti μ	Slovní vyjádření
5	0	zcela jistě není
10	0,2	asi sotva je
15	0,5	snad je
20	0,8	téměř jistě je
25	1,0	zcela jistě je
35	0,3	sotva je
40	0	určitě není

Příslušnostní funkce

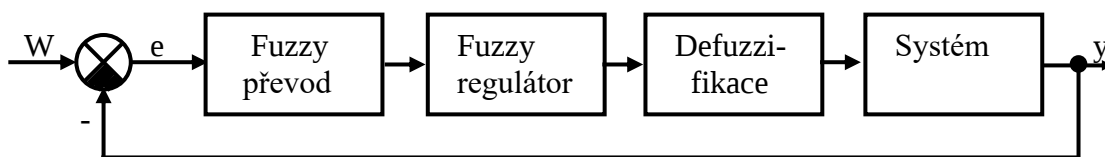
Průběh síly příslušnosti v závislosti na teplotě můžeme znázornit graficky jako tzv. příslušnostní funkci. Tvar příslušnostní funkce je dán některým z možných postupů jako již výše uvedená definice pomocí jazykové proměnné. Dalšími tvary jsou trojúhelník (definován 3 body na vodorovné ose), lichoběžník (4 body), Gaussova křivka, zvonová křivka, tabulkové stupně a celá řada dalších. Výhodou trojúhelníkové a lichoběžníkové funkce je jednoduchý výpočet síly příslušnosti pomocí rovnic přímek použitelný i u méně výkonných PLC.

Obr. 73. Příslušnostní funkce

3.3.3. Fuzzy řízení

U fuzzy řízení není základem řízený systém a jeho model, ale pozornost je zaměřena na chování člověka (tzv. experta), který umí systém řídit, ale přitom nemá ani pojem o klasickém matematickém modelu. Takový člověk pak řídí systém na základě pravidel typu „jestliže ukazatel teploty hodně pomalu klesá, stačí o trochu pootočit ventilem doprava“.

Fuzzy regulátor musí nejprve přiřadit zvoleným vstupním veličinám jazykovou hodnotu. To se provede pomocí *příslušnostní funkce* – (nejčastěji lichoběžníkové). Tato etapa je označována jako fuzzifikace. V dalším kroku určí fuzzy regulátor na základě znalostí experta slovní hodnoty akčních veličin. V závěrečném kroku převede slovní vyjádření na konkrétní číselné hodnoty veličin – tzv. defuzzifikace.



Obr. 74. Blokové schéma fuzzy regulace

Fuzzy řízení je vhodný prostředek pro řízení systémů, u nichž neznáme matematický model, ale které dovede člověk řídit. Lze určit hodnotu výstupu, aniž tak známe vzorce mezi vstupem a výstupem. Každé fuzzy pravidlo přispívá jen částí ke konečnému výsledku. Takový postup je odolnější proti chybám než obvyklý algoritmus.

K nevýhodám fuzzy regulátorů patří složitý řídicí algoritmus, možnost oscilací v ustáleném stavu a zatím malé zkušenosti s návrhem a provozem fuzzy regulace. Mezi význačnější české autory v oblasti fuzzy matematiky patří Petr Hájek a Mirko Navara.

3.3.4. Jednoduchá fuzzifikace, normalizace

Fuzzifikaci lze chápat jako převod hodnot jazykové proměnné na pravdivostní hodnotu jedné nebo několika logických proměnných (vstupní termy) pomocí příslušnostní funkce. Je to zpracování vstupní veličiny (vnější nebo vnitřní) na hodnotu síly příslušnosti k dané fuzzy množině (množinám). Tento proces pro množinu A lze zapsat jako:

$$Ax_j = fuzz(x_j^0)$$

Logické hodnoty 0 a 1 zde budeme chápat jako krajní body číselného intervalu funkčních hodnot, mezi nimiž existuje spojitý nebo nespojitý přechod hodnot fuzzy nebo vícehodnotové logické proměnné (můžeme je interpretovat jako desetinný nebo dvojkový zlomek nebo jako číslo v procentech). Logická proměnná tak může nabývat kterékoli z množiny hodnot uvnitř intervalu $\langle 0;1 \rangle$.

Uvažujme nejprve nejjednodušší případ fuzzifikace dle obrázku 75., kdy k napětí na analogovém vstupu PLC (např. napětí v rozsahu 0 až 10 V) přiřadíme spojité pásmo pravdivostních hodnot jediné fuzzy proměnné VSTUP. Toto přiřazení může být lineární v celém rozsahu, ale též i nelineární.

Obr. 75. Lineární a nelineární přiřazení pravdivostních hodnot fuzzy proměnné (fuzzifikace) k napětí vstupního signálu (jazykové proměnné) přiváděného na analogový vstup PLC (0 až 10 V)

V tomto případě je fuzzifikace vlastně normalizací jazykové proměnné, případně spojená s korekcí nebo linearizací funkční závislosti.

Pravdivostní funkce může být i stupňovitá (např. tříhodnotová nebo devítihodnotová logika). To je výhodné zejména při generování funkčních závislostí tabulkou.

Obr. 76. Přiřazení pravdivostních hodnot - 3hodnotový průběh a 9hodnotové průběhy

3.3.5. Vícenásobná fuzzifikace

Obr. 77. Možné průběhy pravdivostních funkcí fuzzy proměnných
ledová, chladná, snesitelná, vlhák, teplá a horká pro posuzování
teploty vody pro koupel (jazyková proměnná „lázeň“)

Tvar příslušnostní funkce, její průběh a umístění určuje sám projektant řízení podle významu logické proměnné a jsme přitom omezovali jen technickými a programovými prostředky (některé prostředky/PLC umožňují použít jen omezený výběr např. jen 2 možnosti: buď jen lichoběžníkovou funkci nebo vícehodnotovou tabulku). Je pravděpodobné, že jiný autor např. otužilec by volil jiné tvary a rozmístění průběhů příslušnostních funkcí. To ovšem z principu na řízení nemá vliv, ale na kvalitu řízení ano. Pro dosažení kvalitního řízení je nutné vhodně volit jak způsob fuzzifikace, tak samotná pravidla řízení a posléze také způsob defuzzifikace.

3.3.6. Fuzzifikace a binární systémy

Mnoho příležitostí k vyhodnocení vícehodnotových nebo fuzzy logických proměnných poskytují nejenom spojitě senzory, ale i typicky dvouhodnotové prostředí, jakým je řízení strojů a výrobních linek. Například:

- Hodnoty signálů z nadbytečného souboru binárních čísel (např. fotozávor pro zabezpečení pracovního prostoru). Za vícehodnotovou proměnnou můžeme považovat počet aktivovaných čísel nebo jejich kombinaci.
- Posloupnost posledních vzorků (např. osmi nebo šestnácti) jedné binární logické proměnné. Za vícehodnotovou proměnnou můžeme považovat počet jedničkových nebo nulových vzorků (z celého souboru), počet po sobě jdoucích stejných vzorků (nepřerušená posloupnost nul nebo jedniček) nebo střední hodnotu všech vzorků (klouzavý průměr).
- Dobu trvání impulsu (jedničkového nebo nulového), celkový počet impulsů, jejich četnost, střída, sumární hodnota trvání jedničkové hodnoty
- Některé binární snímače nebo ovládací prvky poskytují výstup ve formě přepínacího kontaktu, jehož mezipolohu můžeme považovat za „třetí stav“.
- Za třetí stav můžeme považovat i „neurčený stav“, se kterým někdy pracujeme při definování hodnoty vnitřní nebo výstupní logické funkce s binárními operandy. Třetí stav mívá význam: „kombinace nemá smysl“, „je fyzikálně nerealizovatelná“, „nebylo zadáno“, „nelze rozpoznat“, „nemůže nastat“, „hodnota není důležitá“, „nevím“, „něco mezi 0 a 1“, „neumím rozhodnout“. V pravdivostní tabulce pro definovanou logickou funkci se proto nemusíme rozpakovat pracovat i se symboly pro tříhodnotovou nebo i vícehodnotovou logiku (např. 0,5 = „něco uprostřed“, 0,2 = „spíše 0“, atd.)
- V logickém řízení pracovních strojů se často používá skupina binárních snímačů pro zakódování pracovních oblastí (např. řádného pracovního prostoru). Za vícehodnotovou proměnnou můžeme považovat kombinaci koncových spínačů.
- Pracovní oblast sledované (jazykové) veličiny (např. polohy, teploty, hladiny) můžeme rozdělit na pásma – souborem čidel nebo vyhodnocením v programu. Pořadové číslo pásma můžeme považovat za vícehodnotovou proměnnou.
- Za vícehodnotovou proměnnou můžeme považovat i kombinaci binárních výstupů pro třístavové nebo vícestavové ovládání akčních členů.

- Operátorské rozhraní (dialog s obsluhou) je obvyklé řešit formou odpovědí na otázky. Místo odpovědi typu „ano-ne“ můžeme připustit a vyhodnotit i odpovědi typu „nevím“, „ani jedna z možností“, „spíše ano“ atd.

3.3.7. Algebra fuzzy množin

Na rozdíl od dvouhodnotové logiky se algebra použitelná pro práci s fuzzy množinami vyvíjela déle a bylo vyvinuto více algebraických systémů. Jednou z prvních vícehodnotových algeber je algebra Lukasiewiczova. Její operátory jsou speciální negace, součet, součin, průnik a sjednocení, pro které se používají upravené matematické symboly ($\neg$, $\oplus$, $\cdot$).

Nejvíce rozšířená fuzzy algebra je algebra triangulárních norem tzv. T-norem a T-konorem (neboli sumačních S-norem). Její operátory jsou zobecněný součin ANF, zobecněný součet ORF a fuzzy negace NOF. Protože není dán jednoznačný postup pro jednotlivé operace postupem času vznikly a vznikají různé varianty postupů, které tím pádem dávají rozdílné výsledky. Základními 3 spojitými T-normami jsou: standardní (pod jinými názvy Zadehova, Gödelova, minimální), součinnová a Lukasiewiczova. Ostatní varianty T-norem lze z nich odvodit. Mezi nejznámější T-normy patří: produktová, drastická, nilpotentní, Hamacherova, Einsteinova, maximální, algebraická atd. T-konormy (S-normy) jsou doplňkové funkce k T-normám. Volba příslušného typu operátorů je závislá na typu požadovaného regulačního pochodu.

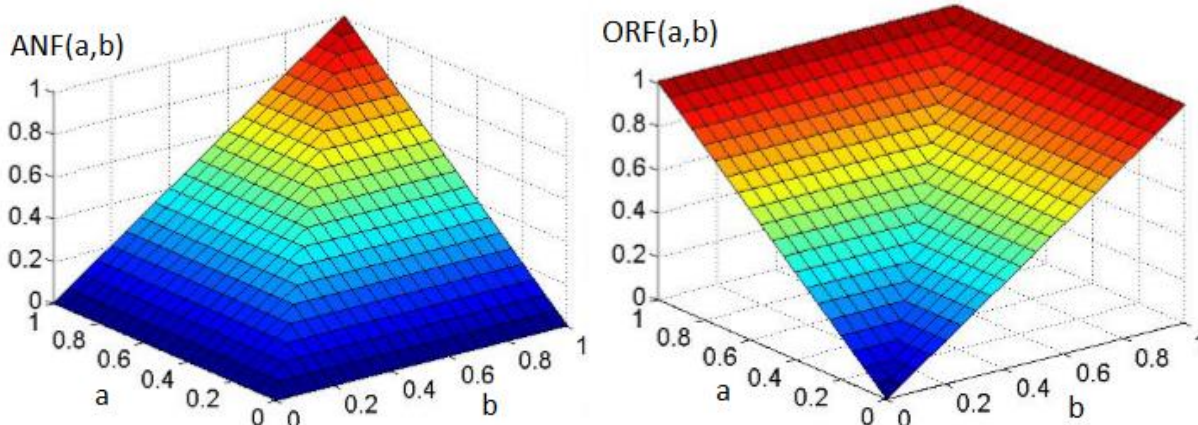
Fuzzy negace: $NOF(a) = 1 - a$

Standardní t-norma: $ANF_S(a, b) = \min(a, b)$; $ORF_S(a, b) = \max(a, b)$

Algebraická t-norma: $ANF_A(a, b) = a \cdot b$; $ORF_A(a, b) = a + b - a \cdot b$

Lukasiewiczova t-norma: $ANF_L(a, b) = \max(0, a + b - 1)$; $ORF_L(a, b) = \min(1, a + b)$

Pro snadné vytvoření představy o výsledku konkrétní varianty jsou vytvářeny grafy pro 2 proměnné. V případě více proměnných se uvádí další proměnné jako odstupňovaný parametr (např. pro $c=0; 0,1; 0,2; \dots 1$) ke grafu 2 proměnných.



Obr. 78. Standardní T-norma a T-konorma

3.3.8. Defuzzifikace

Defuzzifikace je proces, který k fuzzy proměnné přiřadí hodnotu skutečného výstupního signálu. Protože není jednoznačně dán postup jak proměnit fuzzy proměnnou na jednoznačnou hodnotu, bylo vypracováno více metod, které vytváří rozdílné výsledky. Nejznámější jsou:

- metoda COG (center of gravity = těžiště plochy) nejčastěji používaná i když výpočetně náročná, fuzzy regulace s touto metodou dává podobné výsledky jako klasický PID regulátor, akční veličina regulátoru (výstupní signál regulátoru) je rovná hodnotě polohy těžiště výstupní fuzzy množiny na

vodorovné ose. Výstupní množina má většinou komplikovanější tvar složený z různých průniků a sjednocení vstupních množin, takže poloha těžiště se vypočítá vzorcem:

$$u = \frac{\sum_d B_0(u_d) \cdot u_d}{\sum_d B_0(u_d)}$$

- metoda COA (center of area = střed plochy),
- metoda MOM (mean of maximum = průměrné maximum),
- metoda MCM (mean criterium of maximum = výskyt maxima).

3.3.9. Fuzzy logika a PLC

Instrukce pro fuzzy logiku nabízejí pro své uživatele i PLC a přibližují tento mocný aparát i pro řešení obvyklých úloh při řízení strojů, technologických a energetických procesů, pro doplňky řídicích programů, pro realizaci diagnostických a rozhodovacích operací. Vyspělé PLC od významných výrobců disponují instrukcemi a systémovou podporou pro vývoj a realizaci fuzzy algoritmů. Zpřístupňují tak fuzzy logiku pro každodenní programátorskou praxi nejenom pro regulační úlohy, ale především pro řešení každodenních problémů optimálního rozhodování při řízení strojů a výrobních linek a při řešení jejich diagnostiky. Programátor v algoritmu řízení použije příkazy pro fuzzifikaci a defuzzifikaci a nadefinuje pravidla řízení. K jednotlivým příkazům nakonfiguruje jejich parametry a limity. Tím vlastně nahradí lidské rozhodování na základě přibližných údajů a neostrých formulací. Vliv na výslednou regulaci nemají jen stanovaná pravidla řízení, ale i volba metod fuzzifikace a defuzzifikace. Přes tyto obtíže je ale použití fuzzy řízení velmi efektivní a najdeme ho v mnoha domácích spotřebičích. Typické je uplatnění fuzzy regulace u praček (dávkování pracího prostředku, vody a ohřevu podle vlastností náplně), sušiček (řízení výkonu podle rosného bodu) a myček nádobí (dávkování detergentu a řízení tlaku oplachu podle náplně). V průmyslu jsou to ventilační, klimatizační a rekuperační jednotky, obslužné systémy, dopravní systémy apod.

4. Robotika

4.1. Úvod

Nahrazování fyzického zapojování člověka do výrobního procesu automatickými systémy je základním rysem soudobého technického pokroku. V etapě intenzivní realizace komplexní automatizace výroby mají významné postavení i prostředky pro automatizovanou operační manipulaci – průmyslové roboty a manipulátory (dále jen **PRaM**).

Cílem zavádění robotizovaných technologických pracovišť (RTP) a robotizovaných technologických komplexů (RTK) je zvyšování produktivity práce při snižování úplných vlastních nákladů, úspora pracovních sil, zvyšování kvality a spolehlivosti výrobků, rychlejší inovace výrobků a zvýšení kultury lidské práce.

První RTP se začala objevovat v 60. letech 20. století. PRaM jsou dnes významným činitelem konkurenceschopnosti a efektivity národního hospodářství. Mezi nejvyspělejší země v průmyslové automatizaci je Japonsko a USA, kde pracuje 60% celkového počtu průmyslových robotů. Tyto země dosahují i nejpříznivější poměr mezi počtem robotů a pracovníků. Nejvíce jsou nasazovány roboty v automobilovém průmyslu při operacích: montáž, bodové svařování, obloukové svařování, obrábění, lisování, tváření, obrábění, povrchové ochrany a lakování.

Plánované nasazení PRaM má řešit kromě jiného i nedostatek odborných pracovních sil. V současnosti se uvádí, že v Japonsku je robotizováno přes 90 % všech pracovišť. V ČR jen zatím jen 20 % až 25 %. Výhledově se v nejbližších 10ti letech má robotizovat přes 60 % všech pracovišť. To ovlivní i požadavek na vyšší odborné vzdělání technických pracovníků (konstrukce, montáž, instalace, údržba a programování PRaM) a menší potřebu zaměstnanců bez vzdělání.

Nejvíce se automatizace a robotizace vyvíjí v oblasti montáže. Současnou úroveň montáží lze charakterizovat tak, že stále převládá hardwarové řešení problémů (mechanická orientace dílců, víceúčelová chapadla) před softwarovým řešením, tzv. „inteligentní montáže“ (systém oko-ruka). Kombinace práce robotů s videosystémy se začíná prosazovat, zatím však netvoří základ v této oblasti. Hlavní tendence se ubírají spíše směrem k vyšším rychlostem a větším přesnostem.

Své nezastupitelné místo mají roboty v prostředí nepřátelském člověku, kam patří práce pod vodou, v kosmickém prostoru, v radioaktivním prostředí jaderných elektráren a v podzemí. Do těchto prostředí se zahrnují též práce nebezpečné člověku a tak se roboty uplatňují při požárech, v provozech hutnictví a chemickém průmyslu, při teroristických akcích, odstraňování výbušnin, odminování atd.

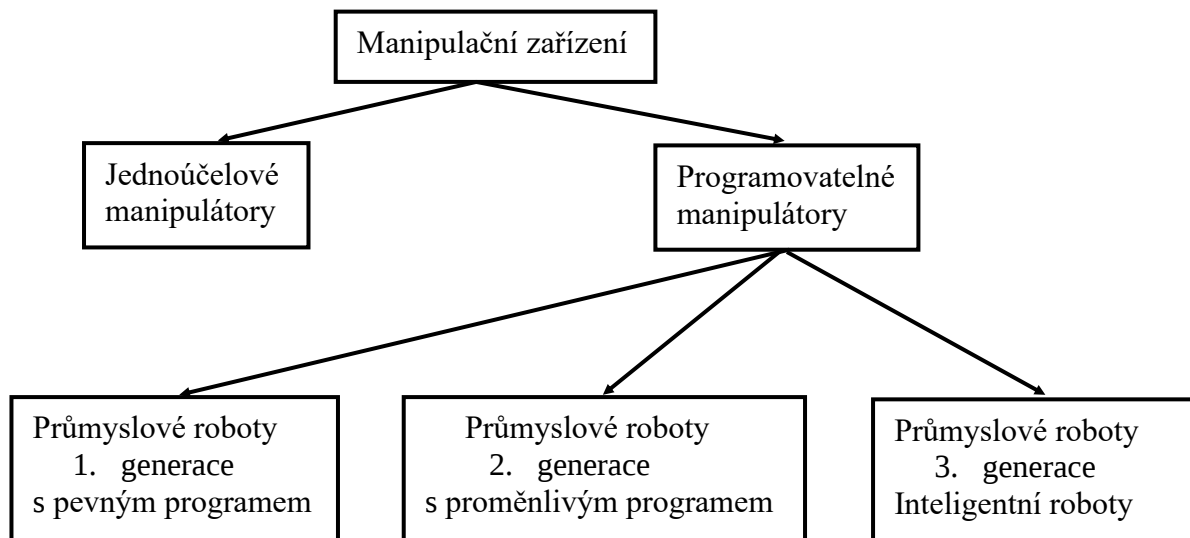
4.2. Rozdělení

Definice PRaM, včetně jejich členění, není jednotně stanovena a v odborné literatuře nalezneme celou řadu různých výkladů.

Rozdělení PRaM podle prováděné práce:

- manipulační (podávání polotovarů, součástek)
- technologické (svařování, montážní, nanášení povlaků)
- speciální (pracující pod vodou, v kosmu, v radioaktivním prostředí)
- univerzální (kombinace předešlých)

Rozdělení PRaM podle způsobu řízení:



Obr. 79. Rozdělení PRaM

Manipulátory – ručně řízená zařízení na vykonávání pohybů, která slouží k ulehčení těžké fyzické práce, nebo také manipulační zařízení s nižším počtem stupňů volnosti.

Jednoúčelové manipulátory – slouží k automatizaci manipulačních prací, vesměs jednoúčelových strojů a linek ve velkosériové a hromadné výrobě. Mají omezenou funkci na několik jednoduchých pohybů (podavače, autooperátory).

Synchronní manipulátory – slouží k oddělení ručních manipulačních prací s nebezpečnými látkami (laboratorní manipulace s jedy, biologickými vzorky atp.), případně k posílení pohybů člověka a snížení pracovního zatížení (pracovní skeletony, nebo medicínské skeletony).

Robot – slovo českého původu, vymyslel ho malíř Josef Čapek pro umělé lidské bytosti v románu R.U.R. spisovatele Karla Čapka (**R**ossums **U**niversal **R**obots).

Průmyslové roboty – univerzálně použitelné automaty pro vykonávání pohybu, které zastávají funkci člověka, především u výrobního stroje. Jsou programovatelné v několika osách a pomocí chapadel, nástrojů a senzorů mohou vykonávat velké množství různých pracovních úkonů. Složitost a objem řídicího systému určuje tzv. generaci robotů.

Roboty první generace – manipulační zařízení s programovým řízením, určené pro vykonávání pevně programovatelných postupných operací. Program je sestaven k dosažení cíle činnosti pro určenou výrobní operaci, která je stálá. Při změně cíle nebo situace se uskuteční změna programu. Jednoduchost změny programu je činí dostatečně univerzálními v systému „zdvihni a umísti“

Roboty druhé generace – vybavené vnímáním pomocí široké řady senzorů nebo viděním pomocí kamery. Systém „udělej a ověř“ nebo „oko-ruka“.

Roboty třetí generace – inteligentní roboty. Elementy umělé inteligence dávají robotu schopnost přizpůsobovat se změněným podmínkám, učí se a mohou tak samostatně řešit zadané úkoly. Stavebními prvky robotů s umělou inteligencí jsou vizualizace, hlasová komunikace, rozpoznávání a orientace v prostředí.

4.3. Kinematika robotů

Při stavbě robotů se nejčastěji používají kinematické dvojice translační (přímočaré posuvné – lineární) a rotační (v odborné češtině se významově rozlišuje rotace = vyšší pojem a otáčení = druh rotace).

Translační (T) kinematické dvojice se rozdělují na:

- suportové – po delším vedení se posouvá kratší těleso
- smykadlové – v kratším vedení se posouvá delší těleso
- výsuvné – teleskopické

Rotační (R) kinematické dvojice se rozdělují na:

- otočné (úhel pohybu je větší než 360° , jednootáčkové, víceotáčkové, s nekonečným otáčením)
- kyvné (úhel pohybu je menší než 360° , s pevným úhlem 270° , 180° , 90° , 45° apod.)

U robotů se v praxi nejvíce rozšířily čtyři základní typy kinematických modelů a jim odpovídající pracovní prostory (oblast, kterou obsáhne koncový bod ramene robota). Kinematické modely:

a) TTT - tři translační kinematické dvojice

- pracovní prostor je kvádr (pravoúhlý, kartézský)
- kinematika odvozena od 3 lineárních pohybů
- systém je velmi stabilní a je nejpřesnější
- nevýhodou je nižší prostorová pohyblivost
- používá se především při delších pracovních drahách

b) RTT - jedna rotační a dvě translační dvojice

- pracovní prostor je válcový (cylindrický) segment
- válcový souřadný systém
- je robustní s jednoduchým řízením
- je nejčastěji používán

c) RRT - dvě rotační a jedna translační dvojice

- pracovní prostor je kulový (sférický) segment
- výhodou je dobře umístěná zóna obsluhy a vyšší pohyblivost, vysoké rychlosti a zrychlení
- nevýhoda: menší pracovní prostor a složitější řízení, vykazují vyšší stupně volnosti a jsou méně vhodné pro prostorové pohyby
- použití nejčastěji u plošných montáží

d) RRR - tři rotační dvojice

- složený kulový souřadnicový systém
- pracovním prostorem je anuloid tzv. torus (prostorový oblouk)
- výhody: dobrá manipulační schopnost, vysoká pohyblivost, dobře se vyhýbají překážkám, vysoká rychlost pohybu
- nevýhoda: při náročnějším řízení dosahují nižší pracovní přesnosti

e) delta - tři translační kyvně uložené dvojice

- složený kulový souřadnicový systém
- pracovní prostor je složený sférický segment
- nevýhody: malý pracovní prostor a složité řízení, nižší rychlost pohybu
- výhoda: vysoká pohyblivost

Obr.80. Kinematické značky, kinematická schémata a pracovní prostory

4.4. Hlediska posuzování průmyslových robotů a manipulátorů

a) Manipulační schopnost

Manipulační schopnost je dána druhem, stavbou a typem použitého zařízení. Závisí na mechanické konstrukci robota, jeho kinematickém modelu a pohyblivosti jeho kloubů, os a ramen.

b) Počet stupňů volnosti

Pro obecné zajištění polohy a orientace předmětů ve volném prostoru je dostačující pouze 6 stupňů volnosti (3 stupně pro polohování a 3 stupně pro orientaci v prostoru). Např. lidská ruka má 27 stupňů volnosti.

c) Manipulační hmotnost břemene

Základní parametr robotů. Většinou se do ní započítává i hmotnost úchopového mechanismu.

d) Přesnost manipulace

Závisí především na konstrukci robota a použitých prvcích pohonu, odměřování a řízení. Dříve přes 1 mm. Dnes až 0,01 mm. Důležitými veličinami pro posouzení vlastností robotů jsou přesnost polohování a opakovaná přesnost.

- **přesnost polohování** – maximální odchylka mezi požadovanou a skutečnou polohou při najetí do libovolného bodu pracovního prostoru. Ovlivňuje ji rychlost pojezdu, směr najíždění a užité zatížení,
- **opakovaná přesnost** – zpravidla vyšší než přesnost polohování, poněvadž do cílového bodu se vždy najíždí za stejných podmínek, tzn. ze stejného směru stejnou rychlostí,
- **geometrická přesnost dráhy** – má význam pouze pro určité aplikace, např. průběžné svařování, odstraňování otřepů atd.

Přesnost manipulace robotů je závislá na hmotnosti manipulovaného břemene. Výrobci robotů vesměs udávají, při jakých podmínkách zatížení je robot schopen jimi udávanou přesnost dodržet.

e) Rychlost pohybů

Pro výrobní procesy jsou rychlosti pohybů předem přesně určené vzhledem k výrobní operaci nebo druhu technologie. Pro manipulace většinou je limitem maximální rychlosti dynamické vlastnosti manipulovaného předmětu. Při manipulaci se nesmí manipulovaný předmět poškodit z hlediska jeho tvaru, pevnosti, vzhledu atd. případně se nesmí nadměrně mechanicky namáhat vysokými dynamickými silami konstrukce robota. Samozřejmě vyšší rychlosti mohou být požadovány z hlediska vyšší produktivity robota.

f) Konstrukce robota

Celkové vlastnosti mechanismu robota souvisejí i s jeho konstrukčním uspořádáním, tj. s kinematickým modelem a s konkrétním provedením. Do toho se počítají i druhy pohonů, převodovky a odměrné senzory. Většina výrobců má zavedené určité konstrukční uspořádání tvořící jejich know-how díky němuž dosahují vlastností, kterými se odlišují od konkurenčních výrobců. Příkladem mohou být roboty s modelem RRT a RTR (pořadí písmen odpovídá skutečnému pořadí uspořádání kinematických dvojic), jejichž provedení má mít teoreticky přibližně stejné vlastnosti, ale ve skutečnosti tomu tak není. Konstrukce souvisí i s přesností polohování, protože určuje tuhost mechanismu a tím průhyby ramen při zátěži. Zatížení ramen je složeno jak ze statické složky (hmotnost břemene, samotných ramen, výbavy, polohy ramen – vyložení) tak i z dynamické složky (zrychlení pohybu, délka ramen pohybu těžiště, směr pohybu, hmotnosti břemene a ramen, pozice ramen robota atd.). Nadměrná zátěž zvyšuje odchylky polohy a způsobuje vyšší a rychlejší opotřebení mechanismu.

g) Způsob řízení

Většina ovládacích programů robotů umožňuje několik základních režimů. Režimy jsou odstupňovány podle typu činnosti: výrobní proces (plné nasazení), průběžný servis (profilaxe), firemní servis (hloubková kontrola, seřízení), programování (tvoření programu a jeho odladění) a případně ruční manipulace. Je výhodou, když výrobce dodá řídicí systém s pokročilými funkcemi jako je samoučící režim, antikolizní funkce, kooperativní funkce, autodiagnostika, virtuální model pro off-line ladění programů atd.

4.5. Konstrukce robotů

4.5.1. Pojezdové ústrojí

V řadě technologických operací je vyžadován pohyb robotu po delší dráze. V těchto případech bývá robot nebo manipulátor umístěn na pojezdovém ústrojí. Pojezdová ústrojí (podvozky) se konstruují podle únosnosti a nerovnosti podkladu po kterém se pohybují. Rozeznávají se málo únosné terény (nerovný, nepevněný volný terén) kde jsou vhodné pásové nebo krácející podvozky, středně únosné terény (zhuťněný zarovnaný povrch, asfaltová komunikace) kde se uplatní podvozky s pneumatickými koly a vysokoúnosné terény (betonové základové desky, kolejové dráhy, jeřábové dráhy, visuté dráhy) kde se používají bantamová nebo ocelová kola. Pohyb podvozku většinou nahrazuje jednu osu přímočarého pohybu (existují i podvozky s všesměrovým pohybem po ploše).

Některé konstrukce podvozků splňují i přídavné funkce jako např. udržení přesné výšky základny robota nad terénem, rovnoměrné rozložení tlaku na terén, udržení vodorovné polohy základny robota, zamezení otřesů při pohybu, možnost změny směru pohybu atd.

4.5.2. Konstrukční řešení pohybů

a) Přímočaré pohyby (T)

Přímočaré pohyby zajišťují posuvné jednotky, které jsou konstruovány v provedení suportovém, které umožňuje téměř neomezeně dlouhý pohyb (malý objekt se pohybuje na dlouhé podpoře), smykadlovém, které se používá do 1 metru), nebo výsuvném (teleskopickém). Přenos hnacích sil zajišťují lanové, řemenové nebo řetězové vazby, ozubené lišty nebo závitové tyče (s metrickým, trapézovým, obdélníkovým či kuličkovým závitem).

U průmyslových robotů, vzhledem k potřebě bezvůlových uložení (existují rozmanitá řešení vymezení vůlí nutných pro samotný pohyb kinematických dvojic) s minimálním třením, se dává přednost valivým uložení před kluznými. Valivými elementy vkládanými mezi vodící plochy jsou kuličky, válečky, jehly nebo kladky. Tvar vedení může být čtvercový, obdélníkový, trojboký (prizmatický), rybinový nebo kruhový. U kruhových je nutno řešit omezení proti otáčení.

b) Rotační pohyby (R)

Rotační jednotky umožňují otáčení o více než jednu otáčku. Lze je rozdělit do dvou základních skupin: s **přímým náhonem** (točna je přímo spojena s motorem), a s **nepřímým náhonem** (točna a motor jsou odděleny a propojení je provedeno pomocí některého z typů převodů). Při potřebě vyšších převodů je mezi motor a točnu vložena vícestupňová převodová skříň.

c) Kývavé pohyby (R)

Kývavé jednotky mají omezený pohyb menší než 360°. Jsou poháněny elektromotory, pneumatiky nebo hydraulickými pohony. Dělí se opět na kývavé jednotky s **přímým** a **nepřímým** náhonem. U přímých kývavých jednotek je na výstupu motoru přímo aplikovaná natáčivá část jednotky. Mezi kývavé jednotky s nepřímým pohonem patří jednotky s výkyvnými válci, posuvnými šrouby, řemenovým převodem atd.

U všech konstrukcí pohybů se řeší převod mezi pohonem a poháněným mechanismem. Protože nejčastějším typem pohonu je některý z točivých elektromotorů s většinou vysokým počtem otáček, musí se pohyb motoru zpřevodovat na pomalý pohyb mechanismů. K tomu slouží celá řada převodovek. V robotice se nejčastěji uplatňují převodovky se souosým uspořádáním vstupní a výstupní hřídele. Toto provedení dovoluje montáž převodovky přímo na motor a vytváří tak stavebnicovou konstrukci hnací jednotky (motor, převodovka, momentová spojka, senzory pohybu, limitní snímče). Mezi často používané patří především převodovky planetové, harmonické a cykloidní. Dalšími typy používaných převodovek jsou převodovky šnekové, s ozubenými koly (různé druhy ozubení), s vačkami, excentry, řemeny, řetězy, závitovými tyčemi atd.

Zároveň s konstrukcí převodovek je řešeno valivé uložení hřídelí různými typy ložisek. Ložiska se dělí na 2 základní skupiny: radiální (přenášejí síly kolmé na osu otáčení) a axiální (přenášejí síly působící ve směru osy otáčení). Další rozdělení ložisek je podle tvaru valivého prvku: kuličková, válečková, soudečková, kuželová a jehlová. Podle prostorového uspořádání valivých prvků se ložiska dělí na: jednořadá, dvouřadá, víceřadá. Podle tvaru vodících ploch se ložiska dělí na: pevná, výklopná atd.

4.5.3. Pohony robotů

Každá řízená osa robotu potřebuje vlastní servopohon, který musí být schopen zajistit jak velmi pomalé a přesné najíždění, tak také rychloposuv s dostatečným zrychlením a brzděním.

Podle druhu použité energie rozdělujeme pohony na mechanické, hydraulické, pneumatické, elektrické a kombinované.

Mechanické pohony - využívají se pouze u jednoduchých a jednoúčelových manipulátorů. Jedná se především o použití mechanismů z vaček, excentrů, pák, táhel, bowdenů, převodů s ozubenými koly, řetězy, řemeny atd. jejichž pomocí lze docílit požadované pohyby.

Pneumatické pohony - používají se především u manipulátorů. Jejich předností je čistota prostředí, nízké pořizovací náklady a jednoduchá údržba. Nevýhodou je elasticita stlačeného vzduchu, obtížná regulace, vyšší hlučnost a vyšší energetické náklady.

Hydraulické pohony - jejich předností je dosahování značných sil při malých rozměrech a nízké hmotnosti, plynulé řízení pracovních rychlostí a bezpečnost proti přetížení. Nevýhodou je teplotní závislost, nízká účinnost a ztráty oleje při netěsnostech.

Elektrické servopohony - nejrozšířenější druh pohonů. Výhodami jsou: jednoduchá montáž, nízké náklady na údržbu a případný servis, jsou menší, nižší, teplota má menší vliv na jejich činnost.

- **Stejnoseměrné pohony s kotoučovým rotorem**

Tyto motory mají malý moment setrvačnosti, protože rotační hmoty jsou zredukovány na váhu samotného vinutí rotoru tvořené nejčastěji technologií lisovaných cívek. Rotor nemá tvar válce s železným jádrem jako u běžného elektromotoru, ale tvar disku/kotouče tvořeného závitovými rotorovými cívkami zpevněnými zalévací pryskyřicí. Komutátor je stejný. Stator je tvořen permanentními magnety s osmi páry pólových nástavců mezi kterými je umístěn disk rotoru. Prochází-li vinutím rotoru elektrický proud, působí magnetické pole permanentních magnetů na rotor točivým momentem. Nevýhodou tohoto typu motoru je, že teplo z vinutí rotoru se špatně odvádí (nemá železné jádro, které by ho ochlazovalo), takže při přetížení snadno dochází k spálení rotoru.

- **Krokové motory** (viz skript pro 3. ročník)

▪ Střídavé pohony

Jsou lehké jednoduché konstrukce a jejich výhodou je velký záběrový moment. Nevýhodou je skluz otáček, závislý na zatížení. Řízení otáček je prováděno frekvenčním měničem.

4.5.4. Odměrovací zařízení

Odměrovacím zařízením se zjišťuje skutečná poloha řízeného členu, která se porovnává s požadovanou hodnotou. Podle rozdílu těchto hodnot koriguje řízení robotu daný pohyb. Ke stanovení polohy jednotlivých řízených os se používají tyto způsoby odměřování (viz skript pro 3. ročník Senzory polohy a rychlosti):

Inkrementální odměřování

Jedná se o odměřování po jednotlivých krocích pomocí rotačního snímače. Dělení skleněného kotouče obsahuje až 10 000 rysek. Každá ryska která projde mezi zdrojem světla a fotodiodou, poskytne jeden čítací impuls. Pomocí vřazené převodovky s převodem do pomalu dosahujeme velmi přesného odměřování.

Většina robotů pracuje s inkrementálním odměřováním dráhy. Po zapnutí robotu musí být pro stanovení počátku souřadného systému najeto ve všech osách do tzv. referenčního bodu. Najetí do referenčního bodu se provádí automaticky.

Absolutní odměřování

Každá pozice generuje signál, který jednoznačně definuje aktuální polohu, tj. okamžitý úhel natočení. Používají se tzv. enkodéry, které poskytují vícebitovou informaci o poloze.

Odměřování rychlosti pohybu

Pro odměřování rychlosti otáčení bývá v každé pohonové jednotce zabudován tachogenerátor. Ten vytváří stejnosměrné napětí, jehož hodnota odpovídá měřeným otáčkám. Další možností je použití impulsních snímačů, kdy rychlost pohybu odpovídá frekvenci výstupních impulsů.

4.5.5. Pracovní hlavice – chapadla

Pracovní hlavice slouží k uchycení nástrojů a vykonání pracovní operace. Chapadla jsou koncové členy určené k uchycení a vkládání předmětů do pracovního prostoru a jejich vyjímání. Pracovní hlavice i chapadla by měly být co nejlehčí, protože jejich hmotnost snižuje užitečné zatížení. Čelisti chapadel musí zajišťovat bezpečné uchopení a uvolnění součástí. Pro součásti rozdílného tvaru proto volíme různé vhodné čelisti. Typů chapadel je velké množství (pro téměř každou aplikaci existuje speciální provedení) a proto univerzální rozčlenění nepokrývá všechny možnosti.

Mechanická chapadla:

- pasivní,
 - s pevnými a stavitelnými opěrami
 - pružné a odpružené
- aktivní
 - s hydromotory
 - s pneupohony
 - s elektromotory
 - s elektromagnety

nejčastěji se používají s hydraulickým a pneumatickým pohonem. Motory k ovládání čelistí tvoří s úchopovou hlavicí jeden kompaktní celek. Vlastní čelisti jsou většinou ovládány prostřednictvím mechanických převodů – pákové, s ozubením, s klínem, šroubové a šnekové.

Pneumatická chapadla

- pasivní (deformační přísavky)
- aktivní
 - podtlakové
 - s ejektorem

jedná se o vakuové (podtlakové) hlavice, které se používají pro přenášení rovinných materiálů (tabule plechu, dřevěné desky, papír, sklo). Hlavní částí jsou přísavné misky z elastického materiálu pro přizpůsobení povrchu manipulovaného předmětu. Přísavný podtlak se dosahuje vývěvou nebo ejektorem.

Magnetická chapadla

- s permanentními magnety
- s elektromagnety

jsou vhodná pro menší předměty z feromagnetického materiálu. K upnutí se nejčastěji používají elektromagnety na stejnosměrný proud. Chapadla s permanentními magnety mají speciálně řešenou situaci odhození předmětu.

Deformační chapadla

- pneumatické prsty a vaky
- mechanické

mají speciální vlastnosti např. deformační prsty umožňují uchopit libovolně tvarovaný nepravidelný předmět (v určitém rozsahu velikostí a váhy). Podobně vaky umožňují uchopení předmětů s dutinami v určitém rozsahu velikostí. Tyto chapadla jsou levná a spolehlivá.

Pro manipulaci s různými typy součástí nebo provádění většího množství pracovních operací se používají vícenásobné hlavice nebo výměnné hlavice uložené v zásobníku.

Obr. 81. Pohony a převody čelistí, různé druhy chapadel

4.6. Řízení robotů

Řídicí systém řídí podle uloženého programu činnost robotu ovládáním pohonů a ostatních mechanismů, dále zajišťuje komunikaci s řídicím systémem obsluhovaného výrobního stroje případně s řízením periferního zařízení (paletové stanice, dopravníky polotovarů atd.).

Pro řízení robotů, tzn. jak pro řízení souřadných os, tak i pro řízení dvoustavových funkcí se zásadně používají prostředky výpočetní techniky. Struktura řídicího systému odpovídá struktuře počítače. Základní jednotkou řídicího systému je tedy počítač vybavený jedním nebo několika procesory. Podle programů uložených v operační paměti počítače řídí procesor veškerou činnost robotu.

Vzájemná spolupráce jednotlivých funkčních jednotek řídicího systému závisí na zvoleném pracovní režimu.

Používané pracovní režimy a jejich funkce:

- **Ruční řízení** – pomocí přístroje pro ruční ovládání jsou například vyvolávány jednotlivé příkazy pro pohyb. Procesor řídicího systému tyto příkazy vyhodnocuje a zadává regulátorům pohonů požadované hodnoty.

- **Zadávaní programu** – je vyvolán ediční program, který ukládá načtené uživatelské programy a hodnoty polohy do paměti řídicího systému. Příkazy pro pohyby a ostatní funkce jsou zadávány ve stanoveném příkazovém jazyce. Ten umožňuje také zahrnout do programu výstupy a vstupy periferních zařízení.
- **Samoučící režim** – slouží u robotů 3. generace k napodobení lidského pohybu s nástrojem. Je nejčastěji používán při nanášení barev, kdy zkušený lakýrník vykoná příslušnou operaci s uvolněnými rameny robotu a tento pohyb se uloží do paměti jako program, který robot samostatně opakuje. Dalším cílem vývoje je použití umělé inteligence pro sledování práce člověka a její napodobení robotem.
- **Automatický režim** – je to primární režim pro které je robot určen a konstruován, v tomto režimu jsou vyvolány uživatelské programy robotu uložené v paměti a robot je vykonává v plné rychlosti v požadované pracovní době (24/7).
- **Najíždění na referenční body** – v tomto režimu jsou měřeny odchylky polohy při opakovaném nájezdu na definované body v pracovním prostoru, opakované najíždění z jednoho směru, případně najíždění ze všech směrů, tím se ověří přesnost polohování koncového bodu nástroje,
- **Testovací provoz** – jsou postupně prováděny a kontrolovány jednotlivé úkony (věty programu), testování může probíhat za různých podmínek. Základní formou je krokování povelů kdy programátor řídí a sleduje provádění jednotlivých povelů. Další formou je testování celých programových celků. Dále testování bez a s funkcemi přídavných zařízení. Testování s dopředným a zpětným chodem atd.
- **Diagnostika chyb** – je prověřován diagnostický systém robotu, jeho reakce na vyvolané chyby (chybové stavy), vytváření záznamu o výskytu chyb atd.

Jednotlivé pracovní režimy jsou vyvolávány podle předem stanoveného pořadí. Jiný sled režimů bude například při uvádění robota do provozu, jiný na začátku směny atd.

5. Komunikace v automatizovaných systémech

5.1. Základní pojmy

Přenos informací (resp. přenos dat) je jednou ze základních a nejdůležitějších funkcí řídicích systémů. Centrální jednotka řídicího systému musí mít pro zabezpečení své funkce neustálý přísun aktuálních informací z vnějšího prostředí o řízeném ději a výsledek rozhodnutí musí být včas dopraven na správné místo do řídicího děje. Řídicí systém dostává informace o ději svými vstupními obvody, výsledky řízení sděluje řízenému ději prostřednictvím výstupních obvodů. Soubor technických prostředků zabezpečujících přenos dat mezi vnějším prostředím a vnitřními obvody počítače se nazývá **rozhraní** (interface). Přenos dat mezi zdrojem a příjemcem probíhá podle předem definovaných pravidel zvaných **komunikační protokol**. Pro zdroj i příjemce dat musí platit shodná pravidla o formátu zprávy a o fyzikálním přenosu. Zdroj i příjemce musí mít v době přenosu společný jazyk a společný prostředek dorozumívání.

K přenosu dat mezi dvěma místy slouží množina technických a programových prostředků, které nazýváme **přenosový** nebo **sdělovací** kanál. V mikropočítačové technice **sběrnice**. Přenosový kanál dělíme podle účasti na přenosu informace na část datovou a řídicí. Počet bitů datové část přenosového kanálu přenášených současně nazýváme šířkou toku dat nebo šířkou přenosového kanálu.

Přenosová rychlost (propustnost kanálu)

- počet bitů přenesených za sekundu (bit/s),

Modulační rychlost:

- je to převrácená hodnota nejkratšího časového intervalu, který je přenosový systém schopen přenést, bez ohledu na to, kolik úrovní signálu je v tomto časovém intervalu rozlišeno,
- základní jednotka je **1 Bd** (baud – čti bód),
- udává počet přenesených znaků za sekundu,
- pro binární (dvojúrovňový) signál je přenosová a modulační rychlost stejná,

Přenosový výkon:

- udává kolik bitů zprávy nebo informace je přeneseno za jednotku času
- jednotka 1 bit/s
- na rozdíl od přenosové rychlosti se zde uvažují pouze datové bity

5.2. Datové spoje

Soubor technických prostředků, zajišťujících spojení mezi dvěma místy datového provozu. Spoje lze klasifikovat podle následujících kritérií:

- druh signálu přenášený spojem - analogový, číslicový,
- rychlost přenosu dat spojem - malá střední, velká,
- přidělení spoje uživateli - pevné, komutované,
- vztah uživatele ke spoji - soukromý, veřejný, propůjčený,
- směr přenosu dat spojem - simplexní, poloduplexní, duplexní,

Analogové spoje - jsou zatím nejrozšířenější, protože je využívána současná telefonní síť, která je analogová (nové trasy jsou digitální),
- přenos spojitého spektra kmitočtů,
- pro zvýšení dosahu signálu jsou na trase umístěny zesilovače signálu,

Číslicové (digitální) spoje - podstatně vyšší rychlost přenosu než analogové spoje,
- pro zvýšení dosahu - obnovovače signálu – „tvarovače“,

Z hlediska přenosu dat můžeme spoje rozdělit na spoje:

Telegrafní spoje (pomalé) – dosahují rychlost přenosu jen 50, 75, 100, 150 a 200 b/s,

Telefonní spoje (středně rychlé) - rychlost přenosu je 600 b/s a 1200 b/s,

- zdokonalováním měničů (modemů) lze přenosovou rychlost podstatně zvýšit (1 200, 2 400, 3 600, 4 800, 7 200, 9 600, 10 500 b/s, ..., 56 000 b/s atd.),

Širokopásmové spoje (rychlé) - přenosové rychlosti jsou až do 100 Gb/s u optických spojů

Z hlediska způsobu přidělení spoje uživateli rozlišujeme:

Komutovaný spoj - přes ústřednu - malé množství vedení,

- velký počet účastníků,
- menší kvalita spojů,

Pevný spoj - trvalé zapojení - vhodné tam, kde je spoj využíván několik hodin denně,

- poúpravách nízké zkreslení, méně chyb a vyšší rychlost,

Z hlediska vztahu uživatele ke spoji rozlišujeme spoje:

Soukromé spoje - zcela ve vlastnictví uživatelů,

- místní dveřní telefony, spoje železnic, energetiky, armády, povodí řek atd.

Veřejné spoje - nejpoužívanější,

- veřejné telefonní ústředny, domácí stanice, mobilní telefony,

Pronajatý spoj - dočasně vyjmut za pronájem z veřejné sítě a tvoří pevný spoj se všemi jeho výhodami,

Z hlediska přenosu dat rozlišujeme provoz:

Simplexní provoz - koncová stanice umožňuje přenos dat pouze v jednom směru,

- vhodný pro systémy sběru dat,
- nemá zpětný kanál pro řídicí nebo potvrzovací signály - není příliš rozšířen,

Poloduplexní provoz - přenos dat oběma směry, ale **ne současně**,

- efektivní využití kanálu, vhodný pro dialogový režim nebo malou zátěž

Duplexní provoz - využívá dvou kanálů současně pro přenos dat i řídicích signálů,

- obě stanice vysílají a přijímají současně,
- velký přenosový výkon.

5.2.1. Přenosová média

Pro přenos informací se v praxi používají tato přenosová média: *dvoulinka, kroucená dvoulinka, koaxiální kabel, optická vlákna, infračervené záření, radiový přenos, družicový přenos*

Dvoulinka - vhodná pro analogový signál a jen pro velmi krátká digitální spojení

Kroucená nestíněná dvoulinka (UTP – Unshielded Twisted Pair)

- nejlevnější a nejsnáze dostupné přenosové médium s vyšší odolností proti šumům.
- dva navzájem zkroucené izolované vodiče,
- výsledné rušivé napětí je 200 x menší než u nezkroucené dvoulinky.

Kroucená stíněná dvoulinka (STP - Shielded Twisted Pair)

- 1/40 000 původní hodnoty rušení,
- použití do vzdálenosti 1 km,
- přenosová rychlost řádově Mbit/s.

Koaxiální kabel

- skládá se z vnitřního vodiče (zpravidla Cu vodič nebo Cu trubička), izolace zajišťující izolační oddělení při *definované* vzdálenosti vnitřního vodiče a stínění (opředení z Cu drátků, ovinutí Cu plechem, nebo Al fólií),
- dobré vlastnosti z hlediska útlumu na vysokých frekvencích,
- přenos dat rychlostí až desítky Mbit/s při přenosu v základním pásmu na vzdálenost 1 km,
- přenos po několika frekvenčních pásmech - až desítky Mbit/s na vzdálenost několik km.

Světlovodný kabel

druhy optických vláken: jednovidové (SMF single mode optical fiber, průměr do 10 μm), vícevidové (MMF multimode optical fiber, průměr větší než 10 μm), gradientní (GI graded index, vícevrstvá středící), plastová (průměr cca 1 mm).

- přenos pomocí modulovaného světelného paprsku po optickém vlákně,
- přenos dat rychlostí až několik Gbit/s,

nevýhody: - obtížné spojování (svařování skleněných vláken),

- drahé konektory (vysoké nároky na přesnost výroby),
- potřeba speciálních přijímačů a vysílačů,
- vysoká cena (tyto nevýhody jsou postupně eliminovány),

výhody: - necitlivost vůči všem druhům rušení (s výjimkou mech. porušení),

- úplné elektrické oddělení vysílače od přijímače
- nemožnost odposlechu,
- vysoká přenosová kapacita,
- nízké ztráty.

Infračervené záření - rozsáhlá šířka vysílacího pásma,

- vysoká rychlost přenosu - až 30 Mbit/s,
- přenášená informace se kóduje časovým odstupem jednotlivých informací,
- pulsně - mezerová modulace.

Klasický bezdrátový přenos - vysílač i přijímač naladěny na pevné frekvenční pásmo,

- signál se šíří všemi směry, proniká zdmi - není nutné jeho usměrňování,
- signál bývá rušen různými odrazy a interferencemi jiných frekvencí

Spektrální radiový přenos - vysílá signály v daném rozsahu frekvencí,

- používá se kódování, nedochází k interferenci.

Družicové spoje - velký nárůst počtu kanálů - klesá cena za pronájem,

- rozhlas a televize, navigace lodí, letadel atd.,
- komunikace.

5.2.2. Způsob přenosu signálu kanálem

Podle způsobu přenosu jednotlivých bitů v kódových skupinách rozlišujeme přenos:

Seriový přenos - jednotlivé bity jsou přenášeny postupně - seriově,

- použití na větší vzdálenosti - nižší náklady,
- přenosový výkon je při stejné přenosové rychlosti ve srovnání s paralelním nižší,

Paralelní přenos - všechny bity jedné kódové skupiny jsou vysílány a přenášeny současně,

- využíván pro přenos na kratší vzdálenosti,

Serioparalelní přenos - kombinace obou předešlých způsobů přenosu,

- užívá se tam, kde je kódová skupina dlouhá a není k dispozici potřebný počet přenosových kanálů,

Na přenos informací informačními kanály má vliv nedokonalost vedení. Vzniká útlum, zpoždění a na signál se superponují různé druhy rušivých signálů. Přenášený signál bude na přijímací straně všemi těmito vlivy zkreslen. Jestliže budeme předpokládat přenos diskretní veličiny například v binárním tvaru, bude problematické rozpoznat začátek a konec jednotlivých bitů. Úkolem přijímací jednotky je zpracovat a převést přijatý signál do číselného tvaru, který by co nejvěrněji odpovídal vyslané zprávě. Mírou stupně kvality je přípustná hodnota chybovosti. Pro správnou funkci přijímací stanice a pro minimalizaci chybovosti příjmu je nutné, aby v přijímaném signálu byl určen začátek zprávy a jednotlivé bity byly analyzovány v optimálních intervalech.

Podle způsobu přenosu signálu kanálem v čase dělíme přenos na:

Synchronní přenos - zajištěn vzájemnou synchronizací vysílače a přijímače. Synchronizaci vysílače a přijímače zajišťuje jediný generátor synchronizačních impulsů na straně zdroje dat,

- bity jsou vysílány a přijímány v konstantním rytmu, což umožňuje přijímací straně odstranit oddělovací znaky pro odlišení sousedních bitů
- efektivní využití přenosového kanálu, vyšší přenosové rychlosti (př. disketová jednotka)

Asynchronní přenos - sled vysílaných a přijímaných impulsů není časově vázán

- vyhodnocení log „0“ nebo „1“ určuje délka příslušné napěťové úrovně
- při přenosu několika bitů stejné úrovně je obtížné jejich rozpoznání
- použití jen v nejnútnejších případech - signalizace a některá měření

Arytmický přenos - start stop systém

- kompromis mezi asynchronním a synchronním přenosem
- nepředpokládá se trvalý přenos
- zdroj dat vyšle nejprve jeden bit („rozběhový“, „start bit“), teprve potom následuje posloupnost vlastní informačních bitů a na závěr vyšle jeden až dva ukončovací bity („stop bity“)

5.2.3. Zabezpečení informace

Při přenosu dat od zdroje k přijímači mohou různé zdroje rušení a poruch způsobit, že do užitečného signálu vnikají rušivé signály, které znehodnocují přenášené informace. Proto je nutné zabezpečit přenášené informace tak, aby vznik případné chyby byl buď zcela nebo ve velké většině znemožněn.

Kvalitu přenosu signálu můžeme ovlivnit již při návrhu a realizaci přenosové cesty.

Na kvalitu přenosu má vliv:

- volba trasy přenosu, druhu energie signálu, technologie, technických prostředků a volba kódu,
- zálohování, kompenzace šumu, stínění, filtrace signálu, odstup signál - šum, pravidelná kontrola a údržba, informační zpětná vazba.

Kódování

Jedná se o velmi často používaný způsob zabezpečení informace. Řešení zabezpečení informace tímto způsobem je velmi rozsáhlé a vyžaduje složitější matematický aparát (teorie pravděpodobnosti, teorie detekčních a korekčních kódů atd.). My se proto omezíme na základní způsoby zabezpečení informace detekčními kódy a zmíníme se o cyklických kódech.

Detekční kódy

Tyto kódy se často používají v mikropočítačové technice. Případnou chybu detekují, ale neumí ji lokalizovat a opravit. Chceme-li přenášenu informaci zabezpečit, musíme její datovou část doplnit o část, která toto zabezpečení umožní.

Zabezpečení paritním bitem: v tomto případě je každý přenášený znak doplněn jedním bitem tak, aby součet jedniček ve znaku byl vždy sudý nebo lichý, podle toho zda byla zvolena *sudá* nebo *lichá* parita. Proto se mu říká paritní bit. Zabezpečení znaku nazýváme *příčná parita*. Při přenášení bloku dat můžeme zabezpečení rozšířit o *podélnou paritu* bloku tak, že každý řádek bloku doplníme o paritní bit. Příčná a podélná parita může být doplněna o *paritu parit*.

Zabezpečení cyklickým kódem: používané ve výpočetní technice. Jeho podstatou je to, že se zpráva doplní o bity, které obsahují předem „domluvenou“ informaci (součet, zbytek po dělení atd.), která vznikne generováním tzv. cyklického kódu. Nejčastěji používaným kódem je zabezpečovací kód CRC (Cycle Redundancy Code). Nejpoužívanější je dvou bytový kód CRC, který vznikne jako součet přenášených dat modulo 65535.

Obr. 82. Příklad zabezpečení sudou paritou

5.3. Rozhraní

5.3.1. Paralelní rozhraní

Paralelní rozhraní realizuje přenos dat mezi vnitřní sběrnici řídicího systému s vnějším prostředím. Sběrnice počítače se skládá z adresní, řídicí a datové sběrnice. Na rozhraní lze rozlišit datové a řídicí signály. Paralelní rozhraní může být jednosměrné nebo obousměrné. Třístavové rozhraní - umožňuje kromě „0“ a „1“ také „stav odpojení“ (tzv. vysoká impedance). Nejpoužívanější je Centronix (tiskárna) a IEEE 488 (měřicí zařízení).

Centronix:

- signály v úrovni TTL,
- původně určeno pro jednosměrný tok dat (modifikace umožňují obousměrnou komunikaci),
- rozhraní propojení určené pro připojení tiskárny k PC (obecně 2 zařízení navzájem),
- délka kabelu max. 2,5 m
- max. přenosová rychlost 100 kb/s.

IEEE 488:

- informace mají podobu číslicových signálů v úrovni TTL,
- sběrnici může být propojeno maximálně 15 zařízení,
- celková délka přenosového kanálu maximálně 15 m,
- přenosová rychlost na kterémkoliv vodiči maximálně 1Mbit/s.

5.3.2. Sériové rozhraní

Sériové rozhraní umožňuje přenášet data pouze po bitech, proto je nutné na straně signálového zdroje převést znak (obvykle byte) na posloupnost jednotlivých bitů. Na straně příjemce se musí přijaté bity zpětně sestavit do původního znaku. Toto lze provést buď technickými nebo programovými prostředky. Rovněž je nutné zajistit zabezpečení přenosu informace. To však snižuje

přenášený výkon. Je nutné vždy zvážit požadavky na přenos a podle toho zvolit přenosovou rychlost a způsob zabezpečení.

Proudová smyčka:

- nejstarší a přitom dodnes používané seriové rozhraní,
- datový signál interpretován dvěma proudovými stavy - proud vede („0“), nevede („1“),
- vysílače spínač, přijímačem relé (možno oddělit optočlenem),
- pro obousměrnou komunikaci jsou potřeba dva kanály,
- použití do 100 m,
- maximální přenosová rychlost 20kb/s,
- maximální proud 20 mA,

Rozhraní HART:

Umožňuje obousměrnou číslicovou komunikaci se zařízeními propojenými dvou vodičovou smyčkou s analogovým přenosem signálů proudovými úrovněmi 4 až 20 mA. Podstatné je, že po původním vedení je možno k řídicímu centru současně přenášet jak analogový údaj o hodnotě měřené veličiny ve formě proudu (4-20mA), tak i číslicovou informaci, např. o stávající konfiguraci zařízení, identifikační údaje o senzoru, kalibrační a diagnostické údaje a další. Přenos číslicové informace po vedení proudové smyčky se realizuje superpozicí (např. transformátorovou vazbou) kmitočtově klíčených signálů na původní analogový proudový signál. Logická „1“ odpovídá kmitočtu 1 200 Hz, úroveň logické „0“ odpovídá kmitočtu 2 200 Hz. Amplituda superponovaného signálu je volena 0,5 mA. Rychlost přenosu může dosáhnout až 1 200 bit/s. Při použití kroucené dvoulinky může být délka vedení až 3 000 m. Využití tohoto rozhraní je především u senzorů.

U rozhraní HART je definován komunikační protokol. Hodnota zatěžovacího odporu smyčky má být v rozmezí 230 až 1000 Ω . Přenos číslicové informace je organizován způsobem Master-Slave. Zprávy jsou kódovány jako posloupnost osmibitových bajtů. Na začátku zprávy je *start bit*, na konci *stop bit* a ještě *bit liché parity*.

Rozhraní RS - 232C:

- nejrozšířenější rozhraní u počítačů a řídicích systémů s aritmetickým přenosem.
- použití do vzdálenosti 20 m
- maximální přenosová rychlost 20kb/s
- maximální napětí ± 25 V (běžně ± 12 V), impedance vedení 3-7 k Ω ,
- **malá varianta** - jednokanálový arytmičtý přenos dat,
 - neumožňuje zjistit stav zařízení,
 - nemůže technickými prostředky zajistit kvitování (provádí se programově: opakování přenesených znaků, potvrzení vybraným znakem),
 - použití k jednosměrnému nebo střídavému přenosu v nejjednodušších aplikacích při připojení mezi dvěma koncovými zařízeními.
- **střední varianta** - nejpoužívanější,
 - jednokanálový synchronní nebo arytmičtý přenos,
 - má prostředky pro zjištění stavu přenosu i ke kvitování,
 - používá se pro připojení mezi dvěma koncovými zařízeními přímo nebo na větší vzdálenosti s modemem.
- **velká varianta** - všechny možnosti dané tímto rozhraním,
 - používá ji koncové zařízení typu komunikační procesor pracující s pevným komunikačním protokolem.

Průmyslové rozhraní RS – 423:

- symetrický přijímač,
- maximální počet vysílačů / přijímačů - 1/10,
- maximální délka vedení - 1200m,
- přenosová rychlost 10 Mb/s,
- impedance vedení 100Ω,

Průmyslové rozhraní RS – 485:

- maximální počet přijímačů – 32,
- délka vedení 1200m,
- přenosová rychlost - 10 Mb/s,
- nejpoužívanější,

Pro průmyslovou komunikaci jsou vyráběny komunikační karty:

I/O karty pro seriovou komunikaci,

Převodníky seriového rozhraní,

Inteligentní multiportové karty,

Komunikační karty PCMCIA

5.4. Počítačové (datové) sítě

- Rozdělení sítí z hlediska aplikací - jednoúčelové**
- rezervační,
 - bankovní,
 - pro důležité informace,
 - pro řízení výroby,
- veřejné.

Rozdělení sítí z hlediska územní rozlehlosti:**LAN (Local Area Network)**

- většinou pokrývají oblast jedné budovy nebo areál jedné samostatné instituce,
- vysoce výkonný transfer informací.

MAN (Metropolitan Area Network)

- pokrývají obvykle jednu městskou aglomeraci a jsou koncipovány jako rychlé sítě navzájem spojující větší množství sítí LAN,
- příklad: Pražská Akademická Síť,
- přenosová rychlost: 25 Mb/s až 625 Mb/s.

WAN (Wide Area Network)

- spojují uživatele ve více městech,
- CESNET, Internet.

Pro řízení procesů v reálném čase lze ze známé nabídky, použít pouze průmyslové sběrnice, které jsou použitelné od spodní vrstvy až po management. Vývoj, management a řízení výroby spolu souvisí, proto se pro jejich provázání používají lokální sítě. Takové řešení umožňuje komunikaci i mezi vzdálenými pracovišti.

Nejnižší vrstvu pyramidu tvoří akční členy a senzory nutné pro řízení celého technologického řetězu výroby. Propojovací pole má za úkol každý senzor a každý akční člen propojit s jeho řídicím obvodem, který je znázorněn šikmými čarami mezi vrstvou senzorů a vrstvou měření a řízení. Grafické zúžení znázorňuje snížení počtu vyhodnocovacích obvodů proti počtu senzorů a akčních členů. Vyhodnocovací obvod může být multiplexorem připojen na několik senzorů nebo akčních

členů. Při použití “inteligentních” senzorů může být propojovací pole realizováno průmyslovou sběrnici.

Měření a řízení - vyhodnocuje naměřené hodnoty pro vyšší vrstvu,
- zpracovává informace z vyšší vrstvy pro akční členy.

Automatizace - provádí automatizované řízení celého technologického procesu.

Management - soustřeďuje důležité údaje technologického procesu, vyhodnocuje je a optimalizuje výrobní proces z hlediska kvality výroby, ekonomické náročnosti provozu, úspory materiálu atd.,
- změny se předávají vrstvě automatizace jako změny v nastavení parametrů procesu.

Vývoj a konstrukce - management zadává úkoly pro vývoj a zpětné výsledky aplikuje do výroby.

Administrativa - součástí každé činnosti (umístěna na vrcholu, ikdyž není hlavní činností).

Obr. 83. Komunikační řetězec

5.4.1. Topologie sítí

Topologií se rozumí vzájemný vztah a rozložení jednotlivých uzlů sítě. Na topologii sítě lze již pozorovat mnoho znaků a rysů, jež budou charakterizovat pozdější chování sítě - reakce sítě na výpadek stanice nebo vedení sítě, propustnost sítě, náklady atd. Druhy topologií jsou:

Sběrníková topologie

- jednotlivé uzly (stanice) připojeny na společné vedení,
- zpráva se z uzlu šíří oběma směry, ke všem uzlům v síti,
- vhodná pro síť LAN,
- **výhody:** - rozšíření sítě, malé náklady spojů,
 - přímé vysílání ze zdroje k cíli,
 - výpadek stanice nemá vliv na chod sítě,
 - snadno lze rozšířit,
- **nevýhody:** - krátká vzdálenost kabelů - max 500 m,
 - při poruše sběrnice - porucha celé sítě.

Kruhová topologie

- prvky sítě uspořádány do kruhu,
- vhodná pro síť LAN,
- **výhody:** - lehce rozšiřitelná struktura,
 - malý počet spojů,
 - rychlý přenos.

Hvězdicová topologie

- základem řídicí počítač (server), stanice připojeny samostatnými kabely,
- všechny zprávy přejdou řídicím počítačem,
- vhodná pro síť LAN, MAN,
- **výhody:** - lehce rozšiřitelná struktura,
 - odolnost proti závadám,
 - vysoká datová propustnost,
- **nevýhody:** - výpadek serveru způsobí poruchu sítě,
 - vysoké náklady na rozšiřování sítě.

Sít' s topologií strom

- odpovídá sběrníkové topologii - rozdíl – rozbočovače,
- stanice spojeny pomocí zařízení nazvaných „hub“- rozbočovač signálu
- používá ARCNET
- **výhody:** - relativně laciné,
 - snadno rozšiřitelné,
- **nevýhody:** - mohou vznikat fronty na vedení.

Topologie typu polygon

- každý uzel propojen se všemi ostatními,
- nejodolnější proti poruchám na vedení,
- nejnákladnější,
- použití u WAN a to jen u nejzatíženějších a nejdůležitějších oblastí.

Velmi často jsou sítě budovány hybridním způsobem – z částí s různou topologií. Nejznámější síťové standardy:

Arcnet

- historicky nejstarší standard,
- vyniká v jednoduchosti realizace a rozšiřování a nízkou pořizovací cenou,
- topologie: sběrníková a hvězdicová,
- vhodný pro instituce kde se pracuje převážně s textově orientovanými aplikacemi,
- rychlost přenosu: 2,5 Mb/s,
- max. vzdálenost stanic: 6,5 km,
- max. počet stanic: 255,
- přenosové médium: koaxiální kabel,
- distribuovaná přístupová metoda: logický kruh,
- šíření signálu sběrníkové.

Token ring

- síťová implementace firmy IBM,
- topologie: fyzický i logický kruh,
- z hlediska přenosu v současné době nejvýkonnější,
- vyšší cena i složitost - odpojené stanice je nutné přemostovat,
- zvýšení spolehlivosti - dvojité vedení,
- přenosová rychlost: 4, 8, 16 Mb/s,
- max. počet stanic: 250,
- přenosové médium: kroucená dvoulinka,
- distribuovaná přístupová metoda: v kruhové síti,
- přenos: fyzicky simplex, reálně duplex.

Ethernet

- jeden z typů sítí LAN, které jsou založeny na sběrníkové nebo hvězdicové struktuře za použití rozbočovače (HUB) a pracují s přenosovou rychlostí 10 Mbit/s,
 - přenosové médium – koax. kabel, optické kabely a nestíněná kroucená dvoudrátová vedení UTP,
 - Ethernet je však také označení rychlého přenosu dat po společném kanále v síti LAN,
 - kromě toho existuje také přenos Fast Ethernet pro rychlosti do 100 Mbit/s a gigabitový Ethernet.
- Pro různá přenosová média je k dispozici řada rozhraní. Například:

- 10Base2 – specifikace IEEE pro přenos 10 Mb/s po koaxiálním kabelu max. délky 185 m
- 10Base-T – specifikace přenosu Ethernet 10 Mb/s po nestíněných kroucených párech (UTP) max. délky 100 m. Používá se např. pro připojení pracovních stanic na rozbočovač (HUB)
- 10Base-FB – přenos po optickém vlákně max. délky 2 km. Používá se pro páteřní síť Ethernet
- 1000Base-SX – standard přenosu Ethernet 1Gb/s pro optická vlákna

Gigabitový Ethernet

je nová specifikace sítě Ethernet, přenosové rychlosti 1 Gbit/s, určena pro páteřní síť, maximální dosah 2 km pro jednomódová vlákna, 500 m pro multimódová vlákna a 25 až 100 m pro připojení klasickou kabeláží (UTP, STP).

5.4.2. Metody přístupu na spojovací vedení

Tyto metody udávají způsob určování, která ze stanic pracujících v síti a hodlající ve stejném okamžiku vysílat zprávu, může svoji zprávu skutečně odeslat. Metoda přístupu musí umožnit řešení kolize současného požadavku na vysílání dat u 2 a více stanic a zaručit že každá stanice včas obdrží data.

V sítích LAN jsou používány následující metody přístupu:

CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) je metoda s vícenásobným kolizním přístupem a nasloucháním nosné.

Token Ring je specifická předáváním vysílacího práva pomocí tokenu (štafetového kolíku), což je speciální datový rámec, mezi síťovými prvky zapojenými do logického kruhu.

Token Bus metoda je podobná metodě Token Ring, rozdíl je hlavně v tom, že token se předává nezávisle na fyzické topologii sítě (sběrnice, hvězda, strom ...) v logické kruhové topologii. Token Bus je vhodný pro průmyslové sítě díky zaručené odezvě pod 20ms.

5.4.3. Referenční model – OSI (Reference Model for Open System Interconnection)

Tento model se také označuje díky své zrcadlové konfiguraci blokového schéma jako model OSI-ISO. Specifikuje soubor standardů pro výměnu informací mezi systémy, které jsou vůči sobě vzájemně „otevřené“, tj. respektují stejné normy. Model OSI je modulární a umožňuje nové aplikace nebo služby bez změny struktury modelu. Tím také umožňuje vývoj a výrobu navzájem kompatibilních síťových prvků různými nezávislými výrobci.

Model OSI definuje a popisuje sedm vrstev pro spojení. Vrstvy definují způsob komunikace s dalšími systémy. Určují synchronizační signály a strukturu přenášených dat. Nižší vrstvy určují hardwarovou komunikaci, vyšší softwarovou. Těmto vrstvám se také říká protokolové zásobníky.

Každá vrstva definuje vlastnosti obou svých rozhraní specifikací služeb požadovaných od nižší vrstvy a specifikací služeb předávaných vrstvě vyšší. Vstup do vrstvy se označuje SAP (Service Access Point) a pomocí těchto bodů může paralelně využívat služeb více uživatelů současně.

Popis modelu OSI

Každá vrstva modelu definuje sadu funkcí. Vrstvám 2. až 7. jsou přiřazeny softwarové a logické funkce, zatímco vrstva 1. řeší fyzický přenos signálu příslušnými médii. Data procházejí jednotlivými vrstvami od vrstvy 7. až k vrstvě 1., kde jsou přenášena na druhou stranu spojení přes fyzické komunikační médium. Na druhé straně spojení pak prochází od vrstvy 1. až k vrstvě 7.

Horní 3 vrstvy (tj. 7., 6. a 5. aplikační, prezentační a relační) bývají společně označovány jako aplikačně-služebně orientované, dolní 3 vrstvy (tj. 3., 2. a 1. síťová, linková a fyzická) se označují jako vrstvy orientované komunikačně-síťově. Podle toho také protokoly vázané k těmto vrstvám se označují jako síťové nebo komunikační resp. služební nebo aplikační.

7. Aplikační vrstva (Application Layer)

Nejvrchnější vrstva modelu. Zodpovědná za poskytnutí přístupu aplikacím k síti, přenáší soubory, zajišťuje služby elektronické pošty, správu sítě atd. Programové požadavky a data propouští prezentační vrstvě.

6. Prezentační vrstva (Presentation Layer)

Nese odpovědnost za prezentaci informací. Obsahuje funkce konverze dat, kódování a dekódování dat atd. Pokud jednotlivé uzly používají odlišnou reprezentaci dat, šifrování či jejich kompresi, pak potřebnou konverzi provede tato vrstva. V praxi se tato vrstva jeví jako prázdná a její funkce přebírá vrstva relační a z části vrstva aplikační.

5. Relační vrstva (Session Layer)

Po navázání spojení (pomocí transportní vrstvy) je zodpovědná za synchronizaci a správné řazení v síťovém spojení. Zodpovídá za udržení spojení, zajišťuje bezpečnost přenášených dat atd. Je-li potřeba řídit komunikaci dvou uzlů během spojení, pak to provádí tato vrstva.

4. Transportní vrstva (Transport Layer)

Zajišťuje přenos paketů mezi libovolnými uzly sítě - komunikace koncových uživatelů. Ze zařízení do této vrstvy patří brány (gateway). Tato vrstva zajišťuje přenosy paketů, tedy jejich odeslání a na druhé straně jejich správné řazení. Proto odcházející pakety čísluje. Na druhém konci spojení paket zkontroluje a podle čísel paketů z nich vytvoří správnou sekvenci a sestaví příslušnou zprávu, kterou předá vyšší vrstvě. V OSI jsou definovány některé třídy transportních protokolů (Transfer Protokol Class TP0 až TP4).

3. Síťová vrstva (Network Layer)

Zajišťuje spojení, které linková vrstva neumí. Pokud mezi stanicemi existuje mezilehlý uzel, pak přes něj zajišťuje cestu. Musí znát topologii sítě a zajišťuje přepravu paketů mezi jednotlivými uzly. Ze zařízení se do této vrstvy zahrnuje směrovač (router). V této vrstvě pracují dvě důležité vrstvy protokolů - protokoly určené pro práci s adresami a směrové protokoly (zajištění přenosu paketu mezi jednotlivými sítěmi).

2. Spojová vrstva (Data Link Layer)

Má za úkol zvýšit spolehlivost dat přenášených fyzickou vrstvou mezi dvěma sousedními uzly. Převádí znaky nebo slova počítače na seriovou posloupnost bitů a naopak. Vlastní přenášená data se doplní před odesláním o úvodní synchronizační posloupnost a další informace, jako je cílová a zdrojová adresa a kontrolní kód. Spojová vrstva umožňuje detekovat chyby na nejnižší úrovni a provést příslušné korekce. Přenášená data jsou strukturována do bloků, tzv. rámců (frame), které obsahují informace pro rozpoznávání chyb při přenosu. Data přepravovaná uvnitř rámce se nazývají paket. Ze zařízení se do této vrstvy zahrnují můstky (bridge).

1. Fyzická vrstva (Physical Layer)

Tato vrstva předává informace (bity) mezi jednotlivými stanicemi prostřednictvím fyzické přenosové cesty, kterou ovládá. Nezabývá se významem informace. Jedná se o vlastní propojení včetně případných opakovačů. Na této úrovni se definuje : typ použitého kabelu a konektoru, formát elektrického signálu, kódovací schema určující význam logické nuly a jedničky v digitálním přenosu, nebo odpovídající význam v analogovém přenosu.

Informace na úrovni určité vrstvy se skládají z vlastních dat a ta jsou doplněna o řídicí informace vrstvy. Datový paket je rozšiřován a vzniká rámec. Při přechodu do nižší vrstvy jsou veškeré

informace z předcházející vrstvy převzaty jako data a opět doplněny o řídicí informace příslušné vrstvy. Při přechodu do vyšší vrstvy jsou naopak řídicí informace předávající vrstvy odtrženy.

V technice průmyslových sítí se všechny vrstvy modelu OSI vždy nevyužívají. Pro jednoduchou komunikaci kdy se jen předávají data o několika bytech např. na úrovni snímačů a aktuátorů jsou to nejčastěji vrstvy 1., 2. a 7. tj. fyzická, spojová a aplikační.

5.4.4. Technické prostředky sítí

Pro připojení stanic na větší vzdálenosti je třeba použít přídavné aktivní prvky. Patří k nim: *zesilovač, převodník, rozbočovač, most, směrovač, brána*.

Zesilovač – tvarovač (shaper), opakovač (repeater)

- nejjednodušší aktivní prvek v síti
- tvaruje a zesiluje signál
- slouží ke zvětšení rozsahu sítí
- malá krabička s dvěma shodnými konektory, se zdrojem energie, vlastním tvarovačem, pomocnými obvody atd.

Převodníky

- signál nejen zesilují, ale převádějí z jednoho typu kabelu na jiný,
- mají dva odlišné konektory,
- příklad: převodník mezi koaxiálním a optickým kabelem (Ethernet).

Rozbočovač (hub)

- rozbočování signálu - větvení sítě - síť se stromovou strukturou

Uvedené zařízení se žádným způsobem nezabývají procházející informací. Pracují ve fyzické vrstvě tj. ve vrstvě 1. modelu OSI-ISO.

Most (bridge)

- slouží ke vzájemnému spojení dvou nebo více kabelových segmentů sítě a k přenosu paketů dat mezi nimi,
- pracuje na úrovni spojové vrstvy - spojení např. ARCnet s Ethernet,
- může rozeznávat jistou část adresy procházejících paketů - filtrace paketů,
- pracuje ve 2. vrstvě.

Směrovač (router)

- slouží obdobně jako most,
- pracuje na úrovni síťové vrstvy,
- dokonalejší zpracování adres paketů,
- shromažďuje informace o všech připojených sítích, o způsobu jejich propojení a o všech pracujících směrovačích a serverech,
- je schopen určit každému procházejícímu paketu jeho konkrétní cestu tak, aby vedly nejkratší cestou k cíli – „směrování paketů“ (paket routing),
- používá pro směrování datové informace v síti směrovací tabulky, které mohou být pevně naprogramovány, nebo si je router sestavuje sám ze statistických dat. O statistická data se starají směrovací protokoly, které v síti probíhají samostatně v routerech. Shromažďují informace o síti a síťové topologii a předávají data směrovači pro vyhodnocení. Tyto funkce jsou součástí routerů a dodávají se přímo od výrobce.

Brána (gateway)

- pracuje na nejvyšší úrovni (aplikační)
- připojování sítí LAN na cizí prostředí,
- dovoluje komunikovat mezi sítěmi s různými protokoly,
- např. propojení navzájem nekompatibilních videosystémů, spojení telefonní sítě a sítě Internet (komprese hlasové informace, převod na paketový způsob přenosu).

5.4.5. Síťové operační systémy

Síťový operační systém (Network Operating System) je chápán jako nadstavba operačního systému počítače, která má za úkol zprostředkovat komunikaci počítače s ostatními účastníky sítě. Síťové programové vybavení zajišťuje:

- sdílení prostředků sítě jednotlivými uživateli,
- synchronizaci činností počítačů, řazení přístrojů ke sdíleným souborům a vzájemnou komunikaci mezi jednotlivými místy sítě,
- ochranu prostředků sítě a dat před náhodným nebo záměrným zneužitím,
- obsluhu tisku což je řízení tiskových front a tiskáren,
- zpracování chybových stavů sítě,
- administrativní činnost v síti: statistiku, diagnostiku, přidělení přístupových práv uživatelů a hesel.

Typy serverů:

Server (obsluhovač – obslužná stanice) je stanice (počítač), která zaznamenává data a vysílá je do pracovních stanic. Poskytuje tedy služby jiným objektům v síti. Servery rozdělujeme podle funkce na *nosné* a *pomocné*.

Nosné servery – zabezpečují vlastní funkce informační sítě
– souborové, databázové, prezentační, aplikační

Pomocné servery – podporují činnost informační sítě
– pro tisk, terminálové, komunikační

Lokální síť nemusí mít všechny uvedené servery nebo naopak může mít ještě další. Pro programovou obsluhu sítě se používají dva typy operačních systémů:

síť *client - server* a síť *peer to peer*.

Client server (PC sloužící provozu sítě – servery a PC užívající síť pro svou potřebu – klienti)
- vhodná pro lokální síť, pro střední a velké zatížení,
- uživatel se přihlašuje jménem a heslem,
- příklad: Novell Netware, MS Windows NT Server, Unix, IBM OS/2.

Peer to peer (rovný s rovným),
- funkce serveru rozprostřena v síti na více klasických počítačů,
- počítač plní funkci pracovní stanice i výkonného serveru,
- vhodná do 10 uzlů,
- příklad: Lantastic, Microsoft Windows 95, 98.

5.5. Sběrnice PROFIBUS

- PROces FIeld BUS
- normalizována v roce 1987 v Německu, norma definuje funkční, elektrické a mechanické vlastnosti
- přenos dat ve spodní a střední výkonové třídě v blízkosti technologických procesů (regulátory, programovatelné automaty, inteligentní senzory atd.)
- má sěrnicovou topologii, fyzické přenosové medium je rozhraní RS-485

Přístupové metody sítě ProfiBus:

Token Pasing - stanice připojeny k RS-485, postupně si předávají pověření v logickém kruhu,

Master Slave - jediná stanice označená jako Master řídí činnost celého systému,
- ostatní stanice musí komunikovat přes stanici Master,

Hybridní - každá stanice Master může navázat spojení s jakoukoliv jinou stanicí,
- pořadí přístupu k přenosovému mediu určuje pověření (token),

- výhody: - snadná realizace - např. seriovým rozhraním monolitického mikropočítače
- snadné vytvoření distribuovaných systémů pro sběr dat a řízení procesů

Obr. 84. Přístupové metody sítě

Pod označením Profibus jsou normalizovány v podstatě tři průmyslové sběrnice:

a) Profibus-FMS (Fieldbus Message Specification)

Je určena zejména pro náročné aplikace, především pro komunikaci řídicího systému s podřízenými subsystemy. Maximální délka sběrnice je 1,2 km (4,8 s opakovači), přenosová rychlost je maximálně 500 kbit/s. Jako přenosové médium je použita stíněná kroucená dvoulinka, přičemž všechny stanice jsou galvanicky oddělené. Pro optimální využití kanálů používá tři typů rámců.

Obr. 82. Používané typy rámců – řídicí, datový pevný a datový proměnný

b) Profibus-DP (Decentral Periferie)

Opět využívá rozhraní RS 485 a stíněnou kroucenou dvoulinku s galvanickým oddělením všech stanic. Předpokládá větší přenosovou rychlost. Určena pro úroveň senzor-akční člen a má definovanou dobu přístupu řídicí stanice k jednotlivým podřízeným stanicím.

c) Profibus-PA

Určena pro jednoduché aplikace a subsystemy. Opět používá dvoudrátové vedení (STP), ovšem nejen pro přenos dat, ale i k napájení čidel a akčních členů s malým výkonem.

Obr. 85. Typická síť Profibus-DP/PA

Základní informace o Profibusu

Přenosová rychlost a délka kabelu:

Přenosová rychlost [kbit/s]	9,6	19,2	93,75	187,5	500	1500	12000
Délka [m]	1200	1200	1200	1000	400	200	100

Profibus podporuje čtyři topologie: sběrnice, strom, hvězda a kruh. Preferovanou topologií je sběrnice. Maximální délka sítě Profibus DP/FMS pro RS-485 v závislosti na přenosové rychlosti je uvedena v tabulce. Síť může být prodloužena pomocí opakovačů. Na segmentu mezi dvěma opakovači může být až 30 stanic, celkový počet stanic na síti je maximálně 127.

1. RS-485 (high speed – H2) – Profibus DP/FMS

- asynchronní kódování NRZ, přenosová rychlost od 9,6 kb/s do 12Mb/s,
- stíněná kroucená dvojlinka, 32 stanic v segmentu, celkem maximálně 127 stanic,
- pomocí opakovačů lze síť prodloužit do 10 km, připojení 9pinovým D-Sub konektorem,

2. optické vlákno – Profibus DP/FMS

- maximální délka sběrnice závisí na typu optického vlákna (do 80 km),
- topologie segmentu – kruh nebo hvězda,
- možnost použít převodník mezi RS-485 a optickým vláknem.

3. IEC 1158-2 (Low Speed – H1) - Profibus PA

- synchronní kódování Manchester II s rychlostí 31,25 kb/s,
- volitelná jiskrová bezpečnost a volitelné napájení po sběrnici,

- stíněná nebo nestíněná kroucená dvojlinka
- délka segmentu maximálně 1 900 m (ne pro EEx), síť lze prodloužit pomocí čtyř opakovačů, podporuje topologie sběrnice, strom nebo jejich kombinace,
- 10 až 32 stanic v segmentu (závisí na třídě EEx a proudové spotřebě), maximálně 127 stanic.

5.6. Standardizace průmyslové sběrnice

V průmyslových aplikacích se můžeme setkat s mnoha komunikačními sběrnici různých výrobců (Profibus, CAN, Modbus, Interbus-S, AS-Interface, atd.).

V roce 1994 byla založena nadace Fieldbus Foundation sdružující více než 100 významných světových výrobců komunikačních systémů. Vznikla sériová komunikační sběrnice podle mezinárodního standardu IEC 61158, známá pod názvem Foundation Fieldbus (FF). Jedná se o mezinárodní otevřený model sběrnic pro digitální komunikaci mezi měřicími převodníky, řídicími systémy a akčními členy.

Výhody

Schopnost přístrojů různých výrobců spolupracovat na jedné sběrnici. Rychlejší monitorování technologie. Vyhledávání adres a ochrana před jejich duplicitou. Levnější instalace – nižší náklady na projekt, dodavatelskou činnost, inženýrské práce i na řídicí systém. Menší náklady na uvedení do provozu. Větší spolehlivost.

Existují dvě verze:

Verze H1 – přenosová rychlost 31,25 kb/s, délka vedení do 1900 m, používána bezprostředně v technologickém procesu, zařízení mohou být napájena přímo ze sběrnice, může mít odbočky.

Verze H2 – přenosová rychlost 1 Mb/s a 2,5 Mb/s s délkami vedení do 750 m a 500 m. Používá se v náročnějších případech řízení procesu a v aplikacích vyžadujících rychlé řízení.

5.7. Infračervené digitální síť IRDN

IRDN (InfraRed Digital Network) se používají v automatizovaných provozech, kde vznikají problémy s přenosem dat mezi částmi, které nelze napevno propojit vodiči. Umožňují bezdrátovou komunikaci mezi 255 vzájemně nezávislými účastníky. Tato síť se napojuje na centrální počítač. Síť pracuje jako otevřený poloduplexní systém, informace jsou přístupné současně pro všechny napojené jednotky.

Oblast šíření infračerveného signálu je v horizontálním směru asi 40 m, ve vertikálním asi 22 m. Neprostupuje stěnou a jeho dosah lze rozšířit pomocnými IR releovými stanicemi (opakovači). Jednotlivé uzavřené prostory lze navzájem propojit pomocí vazebních relé, rozhraní a kabelového spoje, který nemá být delší než 100 m.

Rozšíření a změny sítě jsou kdykoli možné, vliv poruch lze silně potlačit. Pro přenos dat se používá seriových telegramů, které mají tři rozličné informační části:

- datové bity - nesou informace s různou délkou dat,
- adresové bity - identifikují vysílače a přijímače,
- kontrolní bity - omezují chybné úkony.

5.8. Přenosové kanály

Budování přenosových cest tvoří podstatnou nákladovou položku distribuovaných měřících a řídicích systémů a jejich počet je poměrně omezený. Proto se vždy hledal způsob jak existující přenosové cesty lépe a hospodárněji využít. Základním způsobem jej její vícenásobné využití tj. přenos většího množství dat (dat z různých zdrojů) jednou cestou.

Přenos v základním pásmu frekvencí:

- přenosovou cestu tvoří jeden analogový kanál,
- na přenosové cestě může být pouze jedno dvoubodové spojení, ostatní stanice žádající o spojení musí počkat dokud se cesta neuvolní,
- vhodný v systémech, kde nejsou kladeny nároky na vysoké průměrné přenosové rychlosti,
- běžný pro měřicí a řídicí systémy i pro síť LAN.

Přenos v přeloženém pásmu:

- vícenásobné využívání přenosových cest,
- každé dvoubodové spojení má svůj vlastní přenosový kanál, soubor přenosových kanálů má však společnou přenosovou cestu a jeden fyzický kanál.

Není-li forma energie signálu vhodná pro přenos daným prostředím, nebo překrývají-li se frekvenční pásma přenášených signálů, musíme informaci dále upravit. Pro popis takové úpravy se používají pojmy: *nosný signál*, *modulační signál*, *modulátor*, *modulovaný signál*.

Nosný signál: je signál pomocného generátoru, který produkuje signál s požadovanými vlastnostmi (amplituda, frekvence), který je vhodný pro samotný přenos přenosovou cestou.

Modulační signál: je nositel přenášené informace. Jeho forma není vhodná pro přímý přenos příslušným kanálem. Jeho působením se z nosného signálu stane signál modulovaný.

Modulátor: je zařízení, ve kterém dochází k procesu modulace tj. působení modulačního signálu na nosný signál a tím ke změně některých parametrů či vlastností nosného signálu (změna amplitudy, frekvence, fáze, tvaru ...).

Modulovaný signál: je produktem modulace – výstupem modulátoru, vznikne modulací z nosného signálu a tím je výhodný pro efektivnější využití přenosových cest a potlačení rušení. Při modulaci je nosný signál řízen pomocí modulačního signálu.

Typů modulací je celá řada. Historicky nejstarší a nejjednodušší je modulace amplitudová. Dále se používají modulace frekvenční, fázové, impulsové a další množství speciálních. Pokud je modulační signál harmonický (je tvořen harmonickými složkami - sinusovkami) jedná se o **analogovou modulaci**. V měřících a řídicích systémech se často používají impulsní/digitální signály (mají pravoúhlý tvar) a pak se jedná o **impulsovou modulaci**.

Zařízení, která umožňují vícenásobné využití přenosové cesty jsou *multiplexor* a *demultiplexor*:

Multiplexor:

- sdružuje signály z více vstupních kanálů do jednoho společného (multiplexovaného) kanálu,
- provede vlastní rozdělení rychlého kanálu na odpovídající počet „pomalých“ subkanálů.

Demultiplexor:

- rozděluje multiplexovaný signál na jednotlivé datové kanály a přijímací převodníky.

Provedení multiplexerů a demultiplexerů závisí na druhu rozdělování rychlé přenosové cesty na jednotlivé přenosové kanály. Existují a používají se následující druhy rozdělení:

- frekvenční rozdělení,
- časové rozdělení,
- časově frekvenční rozdělení,
- fázové rozdělení,
- amplitudové rozdělení,
- tvarové rozdělení,
- korelační rozdělení.

Nejpoužívanějším rozdělením je dělení frekvenční a časové.

Frekvenční rozdělení:

- frekvenční multiplex,
- vhodné pro analogové signály, nebo diskrétní signály analogově modulované,
- jednotlivým signálům jsou přiřazena navzájem se nepřekrývající frekvenční pásma,
- frekvenční šířka kanálů se volí obvykle shodná,
- přenášený signál je většinou frekvenčně nebo amplitudově modulován na nosnou frekvenci,
- **výhody:** - současné vysílání signálů patřících různým kanálům,
 - vysílače a přijímače nemusejí být soustředěny na jednom místě,
- **nevýhody:** - velký vzájemný vliv kanálů,
 - překrývání spekter signálů, neideální propustě, parazitní frekvenční složky ...

Časové rozdělení:

- časový multiplex,
- vhodné pro digitální signály,
- zprávy se vysílají jen v určitých vyhrazených časových intervalech,
- všechny kanály mají shodné frekvenční pásmo, shodné s šířkou přenosové cesty,
- po přenosové cestě se přenáší pouze jedna informace.

6. Vizualizace technologických procesů

Vizualizace stavu technologického procesu, neboli schematické znázorňování stavu a funkce technologických zařízení na obrazovce spolu s dalším účelovým využíváním získaných informací se již dnes stala standardem při řízení technologických procesů a výrobních strojů. Většina renomovaných výrobců programovatelných automatů dodává vedle softwarových balíků pro programování a ladění též programové balíky pro vizualizaci.

Např., společnost Siemens dodává pro tyto účely rozsáhlý systém programů COROS, Allen Bradley – Control View, FESTO – ViP, Teco – Control Panel, Moravské přístroje – Control Web, **Microsys – Promotic**, GE – Cimplicity, dalšími jsou TIRS, In Touch atd.

Důvody pro vyvíjení stále dokonalejších univerzálních monitorovacích systémů, k nimž vizualizační systémy částečně patří, bylo na jedné straně neustálé zvyšování požadavků na moderní výrobní proces (dodržování vysoké konstantní kvality, vysoké efektivnosti výroby, minimální spotřeby energie, maximální využití výrobních strojů nebo technologického zařízení, náročných ekologických požadavků atd.) a na druhé straně vzrůstající nároky na zlepšování komfortu obsluhy na všech úrovních, a to i pro speciální stroje, kde je vyvíjení jednoúčelových vizualizačních aplikací příliš náročné jak časově, tak i finančně.

Kvalita řízení je mj. závislá i na množství použitých informací získaných z technologického procesu. Při použití vizualizačních systémů jsou všechny informace zpracované v automatu použitelné nejen pro vytvoření grafické informace na obrazovce, ale i pro další zpracování a využití na úrovni PC.

K hlavním výhodám získaným použitím kvalitního vizualizačního SW patří např.:

- přehledná a souhrnná informace o stavu technologického procesu nebo výrobního stroje,
- dostupnost informací, které nemusí být obsluze zřejmé pouhým pohledem, ev. poslechem apod.,
- usnadněné monitorování procesu,
- automatická tvorba protokolů o výrobě (možnost podrobného sledování kvality výroby a případné nalezení příčiny jejího zhoršení),
- automatická tvorba dokumentace o alarmech (možnost zpětného vyšetření viníka havárie),
- při vhodném využití informací k detekci chyb může dojít k výraznému zkrácení doby mezi poruchou a jejím odstraněním a tím i ke zkrácení průběžných časů výroby a ke snížení spotřeby energie,
- sbírané informace o technologickém procesu lze použít např. i ke zjištění prostojů výrobních strojů a jejich nejčastějších příčin, což může být podkladem pro optimalizaci jejich vytížení,
- možnost zaškolení obsluhy v simulačním režimu.

I když každý programový produkt je řešen specifickým způsobem jeho chování vůči uživateli je více či méně přátelské, lze vysledovat řadu společných znaků těchto SW produktů.

Většina těchto produktů se dělí na dvě základní části, a to na část pro přípravu projektu a na část pro vlastní vizualizaci za provozu. Některé komfortnější systémy umožňují zasahovat do definic vizualizačního projektu i za provozu.

K hlavním parametrům vizualizačního SW patří především tyto kategorie údajů: požadavky na hw, požadavky na operační systém, funkční vybavení editorů projektu, požadavky provozu projektů, cena a služby dodavatele při vývoji a při provozu projektů.

6.1. Požadavky vizualizačních programových balíků

a) Požadované HW vybavení

Omezuje třídu procesorů na nichž může vizualizační SW bez problémů fungovat, tj. minimální požadovanou velikost paměti RAM, podporované grafické adaptéry, požadovaná velikost prostoru na pevném disku, způsob ovládání programů při přípravě projektu (myš, klávesnice, track ball, atd.), matematický koprocessor (u starších generací PC), počet paralelních a seriových rozhraní a jejich typy atd.

b) Požadované SW prostředí

Definuje požadovaný operační systém (MS DOS, MS WINDOWS, OS/2, UNIX). Operační systém musí podporovat běh vizualizační aplikace v reálném čase tzn. musí mít schopnost práce s reálným časem. To je splněno buď samotným operačním systémem (např. UNIX), nebo doplňkovou nadstavbou, která funkce reálného času doplní (např. u MS DOS a Windows).

6.2. Možnosti vizualizačních programových balíků

c) Tvorba vizualizačního projektu

Posuzuje se míra vybavenosti a nabídky u následujících uživatelsky důležitých nástrojů:

- uživatelský komfort grafického editoru,
- semigrafika či plná grafika,
- knihovny standardních oborových symbolů,
- možnost tvorby vlastních symbolů a objektů,
- typy použitelných grafických elementů a jejich počet,
- počet a typy dynamizačních a ev. animačních funkcí,
- podpora receptů, tj. speciálních datových struktur pro dávkovou změnu technolog. parametrů,
- počet proměnných použitelných na jedné obrazovce,
- maximální počet proměnných v projektu celkem,
- počet použitelných obrazovek v projektu celkem,
- podporované grafické, textové i datové formáty souborů,
- zabudované matematické funkce pro účely simulace výrobního procesu a statistických výpočtů ze získaných dat,
- komfort tvorby systému uživatelských menu,
- podpora definování textů alarmových hlášení (podmínky vzniku alarmů a způsobů jejich obsluhy, texty těchto hlášení),
- podpora definování uživatelských přístupových práv.

d) Provoz vizualizačního projektu

- schopnost práce v reálném čase,
- možnost provozu v síti,
- seznam podporovaných programovatelných automatů, tj. automatů s nimiž je vizualizační balík schopen komunikovat,
- schopnost podpory programovatelných automatů několika různých výrobců najednou v rámci jednoho projektu,
- podpora zasahování do procesu ze strany obsluhy (aktivní funkce vizualizačního softwaru),
- podpora receptů (editace, zasílání do procesu),
- podpora průběžného protokolování výrobního procesu,
- podpora sledování alarmových podmínek a tvorby alarmových hlášení,
- rychlost obnovy obrazovky,

- minimální doba vzorkování technologického procesu,
- maximální počet vzorkovaných proměnných celkem a na jednu obrazovku,
- podpora více monitorů v rámci jednoho projektu (monitory vyčleněné např. pro schemata, alarmová hlášení, výrobní protokoly),
- lupa pomocí níž lze zobrazit podrobněji zvolenou část technologického procesu,
- počet současně otevřených oken,
- komunikace s obsluhou, podporované periferie (myš, standardní klávesnice, technologická klávesnice, světelné pero, dotyková obrazovka, plotter atd.),
- možnost práce s softwarovým simulačním režimu,

e) Cenové relace

Velmi důležitým hlediskem je modulárnost vizualizačního SW, tzn. zda je možno požadovaný vizualizační systém vybudovat buď postupně a nebo s optimálním poměrem výkon/cena při zadaných požadavcích uživatele pro cílovou aplikaci.

f) Poprodejní servis

O kvalitě SW rozhodují i služby poskytované dodavatelem dlouhodobě po prodeji produktu: např. firemní školení, horké informační linky ev. servisní linky, průběžná aktualizace novými verzemi softwaru apod.

7. Expertní systémy

7.1. Úvod

Vznikly jako praktický důsledek uplatňování poznatků a zkušeností získaných v oblasti výzkumu umělé inteligence a vědy o programování.

Podrobné pozorování a studie lidských myšlenkových procesů spolu s vývojem počítačů vedlo ke vzniku a vývinu umělé inteligence a ke snaze vytvořit „myslící počítače“.

Už v 50. letech 20. stol. se objevují první náznaky vývoje těchto počítačů. F. Rosenblatt, který vycházel z myšlenek kybernetiky formulovaných Wienerem, rozvíjí myšlenky o neuronových sítích McCullocha a Pittse a pokouší se realizovat samoorganizující se automat. Domníval se, že bohatě propojovaný systém velkého počtu technicky simulovaných neuronů může vést ke vzniku jevu samoorganizace a inteligenci. Předpokládal, že takovýto systém je v principu možné pozitivními a negativními podněty „vycvičit“ pro libovolnou natrénovatelnou činnost. V roce 1961 vytvořil systém perceptron, který se ale ukázal jako nevyhovující.

V tomto období vznikaly vývojové trendy, které se nezabývaly modely na principu lidského mozku na bázi neuronových sítí, ale napodobovaly vnější projevy myšlení. Vznikaly programy na hraní šachů, dámy, vyučovací programy, řešení geometrických úloh atd.

Šedesátá léta byla obdobím vzniku a realizace rozsáhlejších projektů.

Newell, Simon: systém GPS (**G**eneral **P**roblem **S**olver) neboli všeobecný řešitel problémů. Vycházel z představy, že lidské myšlení se uskutečňuje koordinovaným řešením jednoduchých úloh manipulací se symboly, jakými jsou například vyhledávání, porovnávání, slučování, modifikování, nahrazování, rušení atd. Jsou to činnosti, které se dají lehce realizovat i počítačem. Přínos GPS spočíval v metodice nacházení řešení problémů, tzn. ve způsobu vyhledávání posloupnosti vhodně formulovaných myšlenkových úkonů, které krok za krokem provázejí počáteční stav řešení daného problému do některého z jeho cílových stavů. Technika analýzy cílů a prostředků realizovaná v tomto systému je založená na nacházení automaticky detekovatelných odlišností (diferencí) mezi dvojicemi stavů (např. toho, ve kterém se problém právě nachází a cílového), na stanovení relevantnosti operátorů odstraňujících difference a na proceduře testování aplikovatelnosti a vykonávání operátorů. V případě, že vybraný relevantní operátor není možné na daný stav bezprostředně aplikovat, řešící postup spočívá ve stanovení nových podcílů, ve kterých vyřešení je předpokladem aplikovatelnosti tohoto operátoru.

Všeobecnost systému GPS spočívá v tom, že postup řešení úloh není bezprostředně spjat s povahou zadaného problému. Ukázalo se však, že použitelnost systému nepřerostla oblast různých her a hlavolamů. GPS, tak jako většina podobných systémů té doby, byl schopen realizovat řešící posloupnosti jenom v určitém mikrosvětě, transformovaném na požadovaný formalizovaný tvar. Dosahované výsledky byly velmi zajímavé, ale z hlediska aplikací na dané problémy nebyly vhodné a efektivní.

Začátkem 70. let na Stanfordu v Kalifornii kolektiv v čele s Feigenbaumem řešil zajímavý problém: pomocí počítače interpretovali hmotové spektrogramy vznikající při analýze struktur složitých molekul neznámé chemické látky. Vytvořili programový produkt Dendral (1971), který využíval hluboké znalosti, specifické postupy a řešení pro danou oblast. Stal se jedním z prototypů systémů, které nazýváme „expertní“. Od tohoto systému se odvodili další: v medicíně systém MYCIN (1976) a INTERNIST (1982) a další systémy v oblasti geologie, molekulární biologie, finančnictví atd. Od té doby vznikly tisíce expertních systémů.

Expertní systém je:

- počítačový systém hledající řešení problému v rozsahu určitého souboru tvrzení anebo jistého seskupení znalostí, které byli formulovány experty pro danou specifickou aplikační oblast.
- systém založený na reprezentaci poznatků expertů, které využívá při řešení zadaných problémů.
- systém kooperujících programů na řešení vymezené třídy úloh, v jednotlivých problémových oblastech, obvykle řešených experty.
- počítačový systém vybavený znalostmi odborníka (experta) ze specifické oblasti, v rozsahu, které je schopný uskutečňovat rozhodnutí rychlostí a kvalitou rovnající se nejméně průměrnému specialistovi.

Problémy vhodné na řešení expertními systémy patří alespoň do jedné z následujících kategorií (Hayes – Roth, Waterman, Lenat, 1983):

Interpretace – rozpoznání situace z údajů, které ji popisují,

Predikce – odvození očekávatelných důsledků dané situace,

Diagnostikování – určení stavu (poruchy, poškození) systému z pozorovatelných (dostupných) projevů jeho chybového chování,

Konstruování – výběr a sestavení objektů do určitého funkčního celku za daných ohraničujících podmínek,

Plánování – sestavení posloupnosti akcí za účelem dosažení daného cíle,

Monitorování – sledování a porovnávání údajů odpovídajících určité situaci za účelem zjišťování (a následného odstraňování) odchylek od očekávané situace,

Ladění a opravování – výběr, sestavení a uskutečnění posloupnosti akcí odstraňujících odchylky či chybové stavy,

Poučování (učení) – diagnostikování, ladění a upravování studentových vědomostí,

Rízení – interpretování, predikování, monitorování a opravování činnosti (chování) systému.

Řešení problémů též můžeme rozdělit na analyzující a syntetizující:

- analyzující – řešení problému spočívá v rozpoznání, určení předem specifikované, a tedy i popsané entity na základě známých postupných údajů například: identifikace chemické látky nebo nemoci v medicínském diagnostikování,
- syntetizující – řešení problému na základě daných údajů a ohraničujících podmínek pomocí sestavení (odvození) zatím ještě nepopsané (neznámé) entity (zcela nového řešení) sestavené z prvků, které jsou známé.

7.2. Architektura expertních systémů

Expertní systém je realizovaný rozsáhlou soustavou kooperujících programů, jejichž činnost se opírá o specifické datové (údajové) struktury. Jednotlivé programové celky této soustavy jsou prvky funkčně vymezených a svým posláním odlišných modulů.

Architektura expertního systému – vzájemné (přímé nebo zprostředkované) vazby mezi moduly a jejich programovými celky.

I přesto, že expertní systémy mají funkčně podobné nebo stejné složky, nedá se hovořit o nějaké pevné (univerzální) architektuře expertních systémů. V našem případě si uvedeme jedny z nejběžnějších a nejjednodušších příkladů.

Je-li expertní systém vybaven soustavou specifických poznatků, jedná se o „problémově orientovaný expertní systém“ s vytvořenou (naplněnou) bází znalostí. Systém, který nemá naplněnou bází znalostí nazýváme „prázdný expertní systém“. Prázdné expertní systémy jsou dodávány zároveň s programovými prostředky pro naplňování a údržbu báze znalostí. Jsou tedy univerzální pro řadu oborů a způsoby použití.

Základní složky expertních systémů

V každém expertním systému můžeme rozlišit tři základní složky tvořící jeho minimální konfiguraci. Jsou to: inferenční mechanismus, báze znalostí a báze údajů.

Obr. 87. Základní složky expertního systému
Inferenční mechanismus (IM) je tvořený systémem kooperujících programů
Báze znalostí (BZ) a báze faktů (BF) jsou pasivní údajové struktury

Inferenční mechanismus

Je to prostředek, který v určitém rozsahu umožňuje napodobovat expertovu způsobilost uvažovat. Používá dvě základní metody – zpětný a přímý chod (zpětné a dopředné řetězení).

Zpětný chod – řešení problému spočívá v nacházení vhodného a efektivního způsobu dosahování určitého předem stanoveného cíle (potvrzení nebo vyvrácení hypotézy).

Přímý chod – „údaji řízené odvozování“ – řešení vyplývá z určitého objemu faktů, které je potřeba interpretovat, tzn. je potřeba odvodit co z nich vyplývá a k jakým výsledkům je možné na jejich základě dospět.

Báze znalostí

Její obsah (až na výjimky) je tvořen pasivními údajovými strukturami v tom smyslu, že netvoří vykonávatelné instrukce programu. Posláním těchto struktur je parametrizování aktivních procesů IM. Ve vývoji expertních systémů se dospělo k tak rozsáhlým bázím znalostí, že jejich vytváření, modifikování a udržování si vyžádalo k expertním systémům vytvořit doplňkový znalostní systém.

Doplňkový znalostní systém musí být způsobilý přijímat poznatky bez požadavku jejich detailního symbolového vyjádření a začlenění do soustavy už existujících a zdokonalovat existující soustavu znalostí na základě zkušeností z výsledků používání problémově orientovaného expertního systému.

Obr. 88. Znalostní systém

Báze faktů (údajů)

Uchovává symbolovou reprezentaci konkrétních faktů (údajů) související s právě řešeným problémem. Frekvence přístupu k bázi faktů je vyšší oproti přístupu k bázi znalostí. Na rozdíl od báze znalostí je báze faktů dynamická údajová struktura, která se v průběhu odvozování zpravidla značně mění. Báze znalostí a faktů nemusí být vždy navzájem oddělené.

Přídavné složky expertních systémů

Ve většině případů se v expertních systémech ještě vyskytují následující složky:

Komunikační modul – zabezpečování interakce mezi uživatelem a expertním systémem

Vysvětlovací modul – vysvětlování a zdůvodňování stavu a průběhu řešení problému

Generátor výsledků – sestavování částečných výsledků do určitého celku, bez nadbytečných informací, v požadovaném tvaru a ve srozumitelné formě

Obr. 89. Základní a přídavné složky expertních systémů

8. Projektování AIŘS

Součástí dnešních automatizačních projektů je výpočetní technika. Použití počítačů v řízení se rozvíjelo od samého počátku zavádění počítačů do praxe. Celkem přirozeně došlo k oddělení automatizace administrativních činností. Tyto aplikace dostaly výstižný název hromadné zpracování dat. Jsou to zejména aplikace databázových systémů a jsou spíše řazeny do třídy informačních systémů. Druhou větví automatizačních systémů pak bylo přímé řízení technologických a výrobních procesů v reálném čase. V současnosti je číslicová regulace sice významnou složkou počítačového řízení, avšak je jen relativně malou složkou celého řídicího systému. Z tohoto důvodu se dnes mluví o automatizovaných informačních a řídicích systémech (dále jen **AIŘS**). Informační složka má stále více rozhodující roli. Z hlediska uživatele jsou největším přínosem AIŘS jeho složky vizualizační, sledovací, záznamová a archivační.

Všechny automatizační projekty se vyznačují tím, že projektovaný systém komunikuje se sledovaným a řízeným objektem prostřednictvím automatického sběru dat a automatického předávání dat v řízeném objektu. Projektovaný systém se může rozdělit na dvě části. Na objekt, jehož činnost má být automatizována a na část, která tuto automatizaci zajišťuje. Standardní výpočetní technika (počítače), která zajišťuje automatizaci, vyžaduje pro nový AIŘS příslušné nové softwarové vybavení. Celý vývoj nového AIŘS se tedy týká z větší části vytvoření nového softwaru.

Snahy o vnesení řádu do tvorby programového vybavení a počítačových aplikací vůbec lze datovat do první poloviny 70. let. První metody projektování vznikaly především v rámci softwarových firem a orientovaly se výhradně na informační systémy neboli na tzv. hromadné zpracování dat, tj. na databázové aplikace. Současné metody, které jsou rozvíjeny od druhé poloviny 90. let a mají pro jednotlivé vyspělé státy nebo pro velké aplikační firmy charakter normy, jsou zaměřeny na automatizované systémy obecně.

8.1. Vznik a původ metod projektování

Rozbor nedostatků špatně navržených AIŘS ukazuje, že základní příčina spočívá v jejich intuitivním a nahodilém vývoji. Analýza systémů a jejich návrh se často provádí s použitím primitivních metod, které neodpovídají složitosti řešené problematiky. Přitom je nutno si uvědomit, že analýza a návrh AIŘS jsou základními faktory, které určují vlastnosti celého informačního systému spolu se specifikací funkcí, které požaduje uživatel. Chyby analýz a návrhu může programování jen stěží kompenzovat. Proto bylo mnoho úsilí vynaloženo na to, aby vznikly metody, které by podstatnou měrou zvýšili produktivitu projektové práce při návrhu AIŘS a výslednou kvalitu AIŘS. Tyto metody vznikly na univerzitách a u firem, které poznaly, že jen použití vědecky propracované správné metody může zaručit přijatelný průběh procesu analýzy a návrhu. Nejznámější metody, které se rozšířily i mimo rámec pracoviště, kde byly vyvinuty, jsou:

- De Marcova metoda,
- System Development Methodology, universita v Rotterdamu, firma Cap Gemini Pandata,
- Yourdonova metoda,
- Gane-Sarsonova metoda,
- Jacksonova metoda,
- Constantin-Yourdonova metoda,
- Ward-Mellorova metoda.

Následně vznikaly další metody u firem, které se zabývaly vývojem AIRS a poznaly výhody a přínosy dobře propracovaných metod:

- Information Engineering Facility, vyvinutá u americké firmy Texas Instruments,
- System Entwicklung Methode, vyvinutá u pobočky firmy Siemens ve Vídni,
- AD/Cycle, vyvinutá u firmy IBM,
- ISEE/TSEE/RTEE u Westmount Corporation, Holandsko,
- CADES u ICL, Velká Británie,
- PCTE u Bull, Francie,
- LOGOS u Western Reserve University, USA,
- ADS/MRF u firmy NCR, USA,
- STATEMATE u firmy i-LOGIC, USA,
- System Analysis and System Design u MicroTOOL, Německo,
- Navigator System u Knowledge WARE, USA.

8.2. Výhody aplikace metod projektování

Velký zájem o tyto metody a jejich rozšíření pramení z výhod, které se získají při jejich aplikaci. Praxe potvrdila následující přínosy při jejich použití:

- Zvyšuje se kvalita vyvíjeného produktu v důsledku používání vědecky zdůvodněné metody a systémového přístupu, který zahrnuje přesně definované kroky pro zajištění kvality (QA – z angl. Quality Assurance Steps.)
- Zjednodušuje se plánování a řízení, díky dopředu známým fázím a krokům při vývoji systému.
- Usnadňuje se komunikace zákazník – dodavatel, uživatel – analytik, analytik – programátor a řešitel – vedoucí projektu tím, že jsou používány jednotné prostředky pro komunikaci k přesně definovaným účelům (grafy, tabulky, terminologie).
- Zvyšuje se produktivita projektových prací v důsledku používání racionálních postupů, nástrojů a zmenšeného výskytu chyb.
- Zmenšuje se riziko plýtvání nákladů používáním osvědčených a prověřených postupů.
- Odstraní se závislost na jednotlivých osobách, protože postup je na nich nezávislý. To je významné při zvážení důsledků vysoké migrace v realizačních týmech (tzv. ego less design).
- Usnadňuje se zapracování nových pracovníků.
- Vytvářejí se předpoklady pro použití počítačové podpory analytických a návrhářských prací.
- Dokumentace systému je vytvářena systematicky, jednotně a metodicky správně.

Uvážíme-li výše uvedené výhody, pochopíme, proč se v osmdesátých letech v západních státech tak rozšířilo používání metod strukturované analýzy a návrhu s cílem racionalizovat podstatně průběh analýzy a návrhu informačních systémů.

8.3. Standardizace metod projektování

Standardizace metod pro navrhování AIRS se provádí v praxi na následujících úrovních:

Podniková úroveň: metoda je standardizována v rámci určité firmy nebo jiné instituce. Vedení firmy vydává obvykle za tím účelem oficiální pokyn k používání zvolené metody nebo nařídí používání vybrané metody v jiném dokumentu (nejčastěji v informační strategii firmy). Všechny přední světové firmy, zabývající se vývojem software a všechny vyspělé světové firmy, které prezentují využívání špičkových technologií, mají standardizovanou metodu, jejímž prostřednictvím vyvíjejí firemní informační systém. Jedná se většinou o firmy mající více než 2000 zaměstnanců.

Národní úroveň: je představována vydaným národním standardem. Ty státy, které patří k vedoucím v oblasti zavádění a využívání informačních technologií, podporují zavedení jednotné metody pro vývoj používaných AIŘS (USA, Velká Británie, Francie, Německo, Itálie). Ale i řada dalších zemí si uvědomuje výhodu jednotně používané metody (Holandsko, Španělsko, Švédsko). Standardy na úrovni státních norem jsou vydány ve Velké Británii a Švédsku.

Mezinárodní úroveň: je prezentována všeobecnou mezinárodní normou, (ta nebyla dosud realizována). Snaha států Evropského společenství o zavedení jednotné metody návrhu informačních systémů v zemích společenství je zatím první oficiální snahou o mezinárodní standardizaci v této oblasti. Jedná se o metody EUROMETHOD a ISSSS (viz dále).

Je nutno upozornit, že i zde existují standardy „de jure“ viz např. SSADM a standardy „de facto“, které jsou v převážné většině případů. Zejména metody šířené některými systémy CASE např. ve USA představují nepsaný standard a působením amerických firem v zahraničí (filiálky, dodávky systémů na klíč, join venture, kapitálová účast) se šíří používání takových metod v ostatních zemích. Zásadní celospolečenský efekt přinášejí metody, používané celostátně, proto jim bude věnována samostatná pozornost. Nástroje CASE (Computer Aided Software Engineering) pomáhají procesům vývoje softwaru, od generování kódu, ladění až po testování systému. Pomáhají automatizovat úkoly, snižovat chyby a zlepšovat celkovou produktivitu projektování. Mezi známější CASE systémy patří: Rational Rose, Star UML, case 4.0 a pro tvorbu diagramů Microsoft Visio.

Cílem by měla být pro všechny zainteresované subjekty mezinárodní standardizace, zdůvodněná obecným světovým trendem informatizace společnosti. Přehled metod, které jsou používány s celostátní působností v Evropě:

- **DAFNE (DATA Function NETWORKING)**

Je používána v Itálii ve státním veřejném sektoru. Byla vyvinuta organizací ITASIEL jako součást projektu podporovaného Italskou národní radou výzkumu.

- **IE (INFORMATION ENGINEERING)**

Metodu rozšiřuje firma J. Martin Associates zejména v Rakousku a Švýcarsku, kde ji využívají především soukromé firmy, poradenské firmy pro informatiku a softwarové firmy. S označením IEF je metoda používána v USA, kde ji distribuuje firma Texas Instruments.

- **MEIN (METHODOLOGIA INFORMATICA)**

Je používána ve státní administrativě Španělska. Byla vyvinuta firmou ERIA. Obsahuje zásady řízení kvality podle normy ISO 9004.

- **MERISE**

Vyvinutá pod vedením Centre Technique Informatique francouzského ministerstva průmyslu. Je používána povinně v oblasti veřejných státních informačních systémů, ale působí jako de facto standard i při vývoji AIŘS pro soukromé firmy.

- **SDM (SYSTEM Development Methodology)**

Vyvinutá na universitě v Rotterdamu a rozšiřovaná firmou CAP Gemini Pandata v Holandsku, kde představuje de facto standard pro navrhování informačních systémů.

- **SSADM (STRUCTURED System Analysis and Design Method)**

Ve Velké Británii udržovaná a rozšiřovaná National Computing Centre for Information Technology Manchester. Ve státním sektoru ustanovená jako závazný standard a od roku 1993 zavedená jako britský státní standard.

- **VORGEHENSMODEL (tzv. V-model)**

Je v Německu zavedená povinně v oblasti návrhu IS ministerstva obrany a postupně je rozšiřována její působnost i na civilní sektor. Přebírají ji organizace ostatních především východoevropských zemí, které přichází s německými státními a soukromými společnostmi do styku.

- **SYSTEMUTVECKLINK**

Je ve Švédsku vypracovaný státní standard, zavedený nejen ve státní administrativě pro vývoj informačních systémů již od roku 1975, ale i u řady státních a soukromých průmyslových firem. Obsahuje členění vývoje systému na etapy a definuje obsah základních standardizovaných dokumentů, používaných jako výstupy z těchto etap.

- **EUROMETHOD**

Společné úsilí států Evropského společenství pro jednotný vývoj informačních systémů byl soustředěn kolem metody EUROMETHOD v letech 1988 až 1999. V současné době jsou práce zaměřeny na vývoj a rozšíření metody ISPL (Information System Procurement Library), kterou rozpracovává pracoviště FAST pro aplikovanou softwarovou technologii v Mnichově.

8.4. Situace v ČR

Vyvinuté metody se používají v těch českých softwarových firmách, kde v důsledku většinového vlivu západního kapitálu prosadili cizí manažeři jejich používání a firmy je aplikují při zavádění informačních systémů u našich zákazníků. Díky nezanedbatelnému vlivu německému kapitálu je to především metoda V-model.

Zvýšená pozornost je metodám projektování také věnována na některých pracovištích našich vysokých škol, kde se návrh AIŘS vyučuje. K podobnému vývoji ve využívání metod projektování jako v západních zemích v ČR bohužel nedošlo.

Vstup naší země do Evropské unie přinesl i konfrontaci našich firem se zahraniční konkurencí. Přitom vysoká jakost výroby je nezbytnou složkou konkurenceschopnosti. Na tuto skutečnost by české firmy nesmí zapomínat a měly by náležitou pozornost věnovat zavedení metod projektování do své každodenní praxe.

Zastaralou, ale v praxi stále používanou metodou projektování, je rozdělení projektu na úvodní projekt a prováděcí projekt. Tato metoda vychází z překonané praxe státních podniků řízených státním plánem, ale dosud je možné se s ní setkat.

8.4.1. Úvodní projekt

Úvodní projekt je první etapou projektu při projektování v tradičním slova smyslu. Úvodní projekt vychází z blokového schématu, jehož členy respektují typový soubor přístrojů. Rozhodující je struktura systému, počty a druh vstupních signálů a volba koncových výstupních členů. Úvodní projekt se skládá z průvodní zprávy, výkresové dokumentace, seznamu strojů a zařízení a rozpočtové části.

a) Průvodní zpráva obsahuje:

- popis AIŘS včetně popisu úrovně automatizace, struktury a funkcí, popis řešení jeho jednotlivých částí (subsystémů), popis řešení jejich vazeb s řízeným objektem a s navazujícími AIŘS,
- charakteristiku provozu a prostředí,
- charakteristické údaje o snímačích, měřených a řízených mediích a údaje o hlavních konstrukčních materiálech,
- popis algoritmů řízení s podmínkami jejich realizace nebo požadavků na programové vybavení,
- popis napájení AIŘS.

b) Výkresová dokumentace obsahuje:

- kopie přehledových schémat strojů a zařízení s vyznačením tras přenosu informací,
- kopie přehledových schémat s vyznačením měřících míst nebo samostatná schémata složitých měřících a řídicích obvodů,
- schémata umístění řídicích center, panelů, ovládacích pultů, pracovišť operátorů a rozvodných skříní a jejich hlavní rozměry,

- schéma a popis toku informací mezi jednotlivými uzly AIŘS,
- grafické vyjádření algoritmu řízení (podle potřeby).

c) Seznam strojů a zařízení obsahuje:

- seznam přenosných, měřících a řídicích obvodů,
- stručnou specifikaci přístrojů v jednotlivých typech obvodů,
- stručnou specifikaci řídicích subsystémů, panelů, pultů, skříní a ostatního zařízení investičního charakteru.

d) Rozpočtová část obsahuje nejen veškeré náklady na pořízení strojů a zařízení, ale i náklady nutné na montáž a uvedení zařízení do provozu.

8.4.2. Prováděcí projekt

Prováděcí projekt je druhou etapou projektu. Jednoznačně a detailně určuje způsob propojení jednotlivých přístrojů, jejich prostorové rozložení v daném technologickém objektu a způsob a provedení montáže. Nedílnou součástí jsou podklady pro realizaci kabelových tras, řídicích center a jednotlivých rozváděčů určených k řízení nebo kontrole chodu dílčích částí technologického zařízení. Obsahuje stejné části jako úvodní projekt, je však mnohem podrobnější

a) Průvodní zpráva vychází z průvodní zprávy úvodního projektu, zpřesňuje ji a doplňuje ji. Také vysvětluje a zdůvodňuje odchylky od úvodního projektu.

b) Výkresová dokumentace obsahuje:

- schéma měřících míst pro informační systém, u složitých zařízení může samostatnou část tvořit schéma regulačních obvodů,
- schémata výrobních zařízení se zakreslením snímačů a přístrojů normalizovanými značkami a s označením čísel položek seznamu strojů a zařízení (jen u speciálních případů),
- vývojové diagramy programů,
- výkresy přístrojových skříněk, desek a rozváděčů, obsahující vnější rozměry, zvláštní požadavky, čísla položek seznamu strojů a zařízení nebo i typy, rozsahy a pohledy,
- schémata elektrických a neelektrických obvodů se zapojením jednotlivých prvků AIŘS uvnitř i vně rozváděčů s uvedením druhů vodičů, celkovým schéma napájení systému, jeho jištění, zemnění apod.,
- schémata kombinovaných obvodů (např. elektropneumatické),
- přehledové schéma strojů a zařízení doplněné o umístění odběrů, snímačů a přístrojů s označením čísel položek seznamu strojů a zařízení, s vyznačením hlavních tras informačních a řídicích obvodů, míst vyústění rozvodu vody, vzduchu, el. energie, včetně protipožárních opatření na kabelových trasách,
- detaily styčných nebo upevňovacích bodů mezi řídicím systémem, strojním zařízením a stavební konstrukcí (upevnění rozváděčů, snímačů, výkresy průchozích otvorů, odběrů, jímek, ukončení regulačních orgánů s příslušnými připojovacími rozměry).

c) Seznam strojů a zařízení obsahuje specifikaci všech měřících, signalizačních a řídicích přístrojů a jejich příslušenství. U každé položky se uvádí její číslo, název a charakteristické údaje, protokol o výpočtech, s údaji o umístění vzhledem k výrobnímu zařízení, odvolávkou na zajištění úpravy výr. zařízení pro montáž snímačů nebo regulačních přístrojů a popř. čísla výkresů.

d) Rozpočtová část je zpracována stejně jako v úvodním projektu, jen podrobněji.

8.5. Životní cyklus automatizačního projektu

Životní cyklus projektu je časový úsek, který se kryje s dobou existence AIŘS tzn. od záměru realizace až po ukončení jeho užívání.

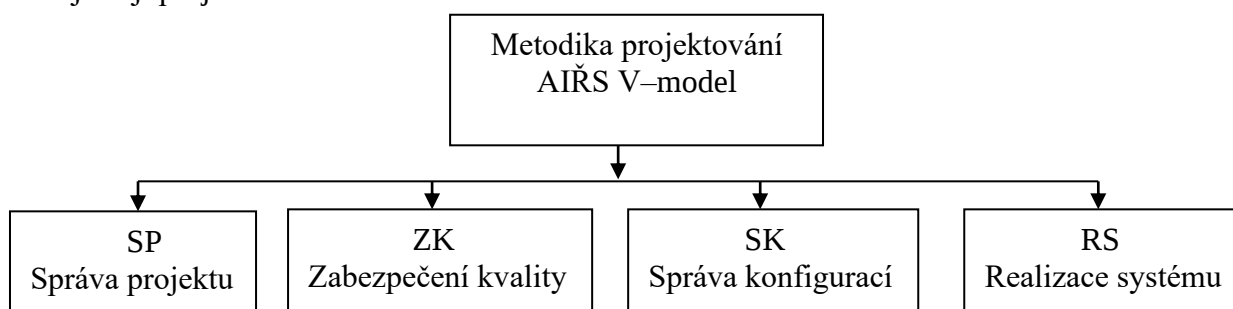
Životní cyklus AIŘS se může rozdělit do následujících kroků:

- zadání,
- systémová analýza,
 - analýza systému,
 - analýza současného stavu,
 - analýza požadovaných funkcí,
 - hrubý návrh systému,
 - analýza spolehlivosti,
 - analýza dalšího rozvoje systému,
 - návrh způsobu testování,
 - návrh způsobu integrace a uvádění do provozu,
 - časový plán a personální zabezpečení,
- závazná systémová specifikace,
- podrobný návrh systému,
- zkoušení a integrace systému,
- souhrnný test systému,
- uvádění do provozu,
- přejímací zkouška,
- provoz.

8.6. Metoda V–model – základní struktura projektu

V–model (z němčiny Vorgehensmodel – česky schéma postupu) je metoda založená na předchozím schématu životního cyklu projektu. Tento typ metod se vyvíjel již od poloviny 70. let.

V moderních metodách projektování má základní význam dokonalá dokumentace projektu a závaznost jejího obsahu. To platí i pro V–model. Všechny činnosti projektu jsou důsledně a s přiměřenou podrobností dokumentovány. Metoda je rozložena do čtyř dílčích metod, které vcelku zajišťují projekt.



Obr. 90. Základní dílčí metody metodiky V–model

Každý submodel se člení na jednotlivé části. Každá činnost zpracovává informace, které získává z dokumentace a dalších zdrojů (programy, technické a programové prostředky).

8.7. Vliv metod projektování AIŘS na jakost projektů

- **Metody a jakost:** Metody zvyšují jakost software několikerým způsobem. Kladou důraz na včasné odhalení chyby. Náklady na odstranění chyby rostou s dobou jejího pozdějšího odhalení přibližně exponenciálním způsobem. Metody se proto snaží jasnou formulací zadání a důkladnou analýzou odstranit nedostatky co nejdříve, a tak snižovat náklady na tvorbu software.

Jakost projektů bude stále více prosazována. Do tvorby AIŘS jsou investovány velké finanční prostředky a investoři chtějí snížit riziko neúspěchu na přijatelnou míru. AIŘS se staly zbožím a zákazníci chtějí být chráněni před nejakostními produkty stejně, jako je tomu u jiných produktů (potraviny, el. spotřebiče atd.). Pozornost na jakost projektů je také vynucena skutečností, že narůstá použití AIŘS tam, kde v důsledku chyby mohou vyniknout velké škody (jaderné elektrárny, kosmické lodě, mezikontinentální rakety, léčení rakovinových nádorů ozařováním, automatické přistávání letadel atd.). Význam metod pro zvýšení jakosti AIŘS ukázal i model dokonalosti tvorby software CMM-SW (Capability Maturity Model for Software), který popsal americký institut softwarového inženýrství (SEI) na Carnegie Mellon university v Pittsburghu.

Metody mají explicitně stanoveny kroky zajišťující jakost (Quality Assurance Step) zatímco při intuitivní analýze a návrhu jsou činnosti, které směřují k zajištění jakosti, prováděny náhodně nebo často nejsou prováděny vůbec. Metody obsahují velmi dobře propracované postupy pro plánování a provádění testů.

- **Využívání produktů CASE:** Efektivní používání metod si vynucuje používání produktů CASE, které mohou využít principu automatické kontroly řady souvislostí a skutečností při návrhu a tvorbě software včetně možnosti bezchybného generování výsledného kódu aplikace na základě výsledků analýzy a návrhu. Počet chyb v tomto případě klesá až o řád.

- **Stanovení zodpovědnosti za jakost:** Metodické postupy obsahují jasně stanovené přiřazení činností zajišťující jakost jednotlivým pracovním místům a určení, kdy se mají provádět. To je podkladem pro stanovení osobní odpovědnosti za jakost prováděných činností při tvorbě software, jak to vyžaduje systém řízení jakosti podle zásad norem ISO řady 9000.

- **Vazba na certifikaci podle ISO 9000:** Systémy řízení jakosti podle řady norem ISO 9000 (zejména ISO 9001) vyžadují, aby činnosti při návrhu byly přesně popsány, dokumentovány a dodržovány. Proto ty firmy, které usilují o získání certifikátu pro oblast tvorby software, musí založit tvorbu software na některé uznávané, nejlépe certifikované metodě, pokud nemají být postaveny před požadavek vlastního vypracování takové metody.

8.8. Softwarové prostředky pro přípravu a řízení projektů

Příprava projektu v dnešní době předpokládá použití některého z celé řady prostředků počítačové podpory a automatizace projekčních prací. Řada uživatelů využívá pro sestavení a znázornění plánu projektu produkt Microsoft Project. S výhodou lze použít software in-Step, jehož součástí jsou modely procesů několika standardních metod projektování včetně metody **V-model**. Výrobcem systému **in-Step** je německá společnost **microTOOL GmbH** (www.microtool.de). Obdobně jako model procesu lze i projekt graficky znázornit ve formě síťového grafu s využitím produktu Microsoft Visio. Koncepce současných softwarových systémů je založena na stále větším stupni otevřenosti a její míra je jedním z kritérií jejich hodnocení. Pomocí takzvaných nástrojových adaptérů je umožněna spolupráce s produkty balíku Microsoft Office (Word, Excel, Outlook) a již zmíněnými produkty **Microsoft Project** a **Microsoft Visio**. Samozřejmostí je integrace systému in-Step s dalšími produkty společnosti microTOOL, s CASE systémy case/4/0 pro oblast strukturované analýzy a produktem **ObjectiF** pro oblast analýzy objektově-orientované. Mnohé nástroje poskytují uživatelům nástrojový adaptér pro připojení produktů uložených v externích systémech správy konfigurací, které poskytují rozhraní **Microsoft SCC** (Source Code Control).

Název:	Automatizace 2
Autor:	Ing. M. Rampas, Ing. J. Madaj
Nakladatel:	SPŠ a VOŠ Chomutov
Rok vydání:	2024
Počet stran:	110
Podpis předsedy předmětové komise:	Ing. P. Kadeřábek
Podpis zástupce ředitele:	Mgr. D. Žižková
Podpis ředitele:	Ing. J. Lacina