

6 Algebra blokových schémat

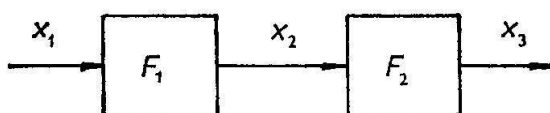
Operátorovým přenosem jsme doposud popisovali chování jednotlivých dynamických členů. Nic nám však nebrání, abychom přenosem popsali dynamické vlastnosti složitějších obvodů, popř. dynamické vlastnosti celého regulačního systému. Takový přenos můžeme určit měřením vstupních a výstupních veličin daných obvodů, a tak určit jejich frekvenční přenos. Druhý možný způsob určení přenosu větších celků předpokládá, že známe dílčí přenosy jednotlivých dynamických členů. K tomu potřebujeme znát pravidla, jak určit přenos většího celku skládajícího se z různě zapojených dynamických členů známých přenosů. Tato pravidla jsou určena tzv. *algebra blokových schémat* neboli *blokovou algebrou*. Jednotlivé dynamické členy jsou v blokových schématech zastoupeny bloky, které jsou určeny známými přenosy. Kromě bloků se v blokových schématech používají součtové a rozdílové členy. Takovým blokovým schématem je i základní regulační schéma.

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). Pro zavedení blokové algebry se předpokládá splnění těchto podmínek:

1. Všechny členy jsou lineární.
2. Člen připojený vstupem k výstupu předcházejícího členu nesmí ovlivňovat přenos předcházejícího členu. Znamená to, že u členů předpokládáme nekonečně velké vstupní odpory, popř. nulové výstupní odpory.
3. Signály v blokovém schématu postupují výhradně ve směru šipek. Nesmíme proto na kreslení šipek zapomínat.

Ve skutečném regulačním obvodu tyto podmínky sice nejsou vždy beze zbytku splněny, ale obvody jsou navrhovány tak, aby se ideálnímu stavu co nejvíce přibližovaly. Bez uvedeného zjednodušení by výpočty byly velmi komplikované a možná neřešitelné.

6.1. Sériové řazení bloků



Obi. 70. Sériové řazení bloků

Na obrázku 70 jsou sériově zapojeny bloky symbolizující dva dynamické členy s přenosy $F_1(p)$ a $F_2(p)$, kde

$$F_1(p) = \frac{x_2(p)}{x_1(p)} \quad F_2(p) = \frac{x_3(p)}{x_2(p)}$$

Celkový přenos $F(p)$ je dán vztahem

$$F(p) = \frac{x_3(p)}{x_1(p)}$$

Čitatele i jmenovatele násobíme hodnotou $x_2(p)$

$$F(p) = \frac{x_3(p)x_2(p)}{x_1(p)x_2(p)} = \frac{x_2(p)}{x_1(p)} \frac{x_3(p)}{x_2(p)}$$

Po dosazení dílčích přenosů získáme vztah mezi celkovým přenosem $F(p)$ a dílčími přenosy $F_1(p)$ a $F_2(p)$

$$F(p) = F_1(p) F_2(p)$$

Podobně bychom mohli odvodit výsledný přenos tří i více sériově zapojených členů. Obecně tedy platí:

Při sériovém řazení členů se celkový přenos obvodu rovná součinu jejich dílčích přenosů

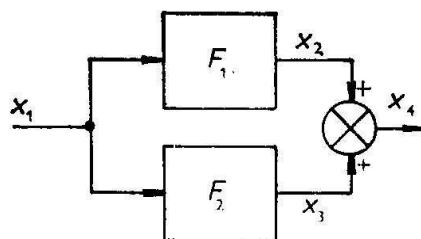
$$F(p) = F_1(p) F_2(p) \dots F_n(p)$$

Vyjádříme-li logaritmické míry frekvenčních přenosů v decibelech, pak výsledná logaritmická míra je dána *součtem* jednotlivých přenosů v decibelech

$$F_{dB} = F_{1dB} + F_{2dB} + F_{ndB}$$

Vyplývá to ze skutečnosti, že logaritmus součinu se rovná součtu logaritmů. Praktickým důsledkem je možnost sčítání amplitudových frekvenčních charakteristik členů zapojených sériově. Fáze jednotlivých členů řazených sériově se pochopitelně také sčítají.

6.2. Paralelní řazení bloků



Obr. 71. Paralelní řazení bloků

Na obrázku 71 jsou paralelně zapojeny bloky s přenosy

$$F_1(p) = \frac{x_2(p)}{x_1(p)} \quad F_2(p) = \frac{x_3(p)}{x_1(p)}$$

Celkový přenos je

$$F_1(p) = \frac{x_4(p)}{x_1(p)}$$

Pro výstupní signál platí

$$x_4(p) = x_2(p) + x_3(p)$$

Po dosazení do vztahu pro celkový přenos můžeme psát

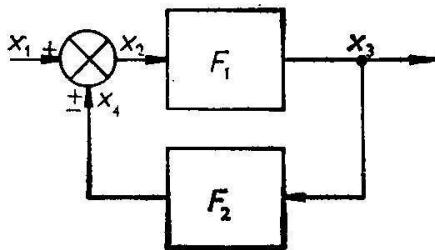
$$F(p) = \frac{x_2(p) + x_3(p)}{x_1(p)} = \frac{x_2(p)}{x_1(p)} + \frac{x_3(p)}{x_1(p)} = F_1(p) + F_2(p)$$

Při paralelním řazení členů se celkový přenos obvodu rovná součtu jejich dílčích přenosů

$$F(p) = F_1(p) + F_2(p) + \dots + F_n(p)$$

Chceme-li nakreslit výslednou amplitudovou frekvenční charakteristiku paralelně zapojených členů, musíme amplitudy přenosů členů zapojených paralelně nejprve sečíst a pak teprve vyjádřit v decibelech. Výslednou fázovou charakteristiku sestrojíme nejraději podle Bodeho pravidla na základě výsledné amplitudové charakteristiky.

6.3. Antiparalelní řazení bloků - zpětnovazební řazení



Obr. 72. Antiparalelní řazení bloků

Na obrázku 72 jsou antiparalelně zapojeny bloky s přenosy $F_1(p)$ a $F_2(p)$. Blokem $F_1(p)$ se signál přenáší zleva doprava, tedy přímo od vstupu k výstupu regulačního obvodu. Část obvodu, kterou se signál přenáší od vstupu k výstupu, nazýváme **přímou větví**. Blokem $F_2(p)$ se signál přenáší zprava doleva, tedy zpětně od výstupu ke vstupu regulačního obvodu. Část obvodu, kterou se signál přenáší zpětně od výstupu ke vstupu, nazýváme **zpětnovazební větví**. Oběma bloky $F_1(p)$ a $F_2(p)$ se signál přenáší v kruhu (ve smyčce). Takovou část obvodu nazýváme **uzavřenou smyčkou**. Jestliže smyčku rozpojíme, nazýváme ji **rozpojenou (otevřenou) smyčkou** nebo **rozpojeným obvodem**. **Přenos otevřené smyčky** (nebo jinak **přenos rozpojeného obvodu**) je vlastně přenosem sériově zapojených členů, který je dán součinem přenosů všech členů, v našem případě $F_1(p) F_2(p)$.

Zpětná vazba je **kladná**, podporuje-li zpětnovazební signál vstupní signál. V našem případě je tomu tak, když se signál x_4 přičítá k signálu x_1 (znaménko plus). Při **záporné** zpětné vazbě zpětnovazební signál působí proti vstupnímu signálu, v našem případě se x_4 odčítá od signálu x_1 (znaménko minus na obr. 72). Pro x_2 proto můžeme psát

$$x_2(p) = x_1(p) \pm x_4(p)$$

Přenos přímé a zpětnovazební větve pak můžeme vyjádřit jako

$$F_1(p) = \frac{x_3(p)}{x_2(p)} = \frac{x_3(p)}{x_1(p) \pm x_4(p)} \quad F_2(p) = \frac{x_4(p)}{x_3(p)}$$

Celkový přenos je dán vztahem

$$F(p) = \frac{x_3(p)}{x_1(p)}$$

Pro odvození výsledného přenosu provedeme následující matematické úpravy. Pro převrácenou hodnotu $F_1(p)$ platí

$$\frac{1}{F_1(p)} = \frac{x_1(p) \pm x_4(p)}{x_3(p)} = \frac{x_1(p)}{x_3(p)} \pm \frac{x_4(p)}{x_3(p)} = \frac{1}{F(p)} \pm F_2(p)$$

$$\frac{1}{F_1(p)} = \frac{1}{F(p)} \pm F_2(p)$$

Odtud vyjádříme převrácenou hodnotu výsledného přenosu

$$\frac{1}{F(p)} = \frac{1}{F_1(p)} \mp F_2(p)$$

Pravou stranu převedeme na společného jmenovatele

$$\frac{1}{F(p)} = \frac{1 \mp F_1(p)F_2(p)}{F_1(p)}$$

Převrácením hodnot levé i pravé strany rovnice získáme výsledný přenos dvou antiparalelně zapojených členů

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{1 \mp F_1(p)F_2(p)}$$

přičemž znaménko minus platí pro kladnou zpětnou vazbu a znaménko plus platí pro zápornou zpětnou vazbu. Pro regulaci má antiparalelní řazení členů se zápornou zpětnou vazbou základní význam. Proto si osvojíme toto pravidlo:

Výsledný přenos členů se zápornou zpětnou vazbou se rovná přenosu přímé větve, vydělenému přenosem otevřené smyčky, který je zvětšen o jednu.

Jestliže je u záporné zpětné vazby přenos otevřené smyčky mnohem větší než 1, můžeme jednotku ve jmenovateli zanedbat. Po vykrácení přenosu přímé větve dostaneme vztah

$$F(p) \approx \frac{1}{F_2(p)}$$

z něhož vyplývá, že přenos obvodu s velkým zesílením a se silnou zápornou zpětnou vazbou je určen převrácenou hodnotou přenosu zpětnovazební větve neboli převrácenou hodnotou zpětnovazebního přenosu. Tohoto zjednodušení tedy můžeme využít, má-li ústřední regulační člen (regulátor) velké zesílení, a to je ve většině případů splněno. Tento vztah se uplatňuje i u zesilovačů se silnou zápornou zpětnou vazbou. Tohoto vztahu můžeme využít při kreslení logaritmických charakteristik. Vycházíme ze vztahu pro amplitudovou charakteristiku, kde platí

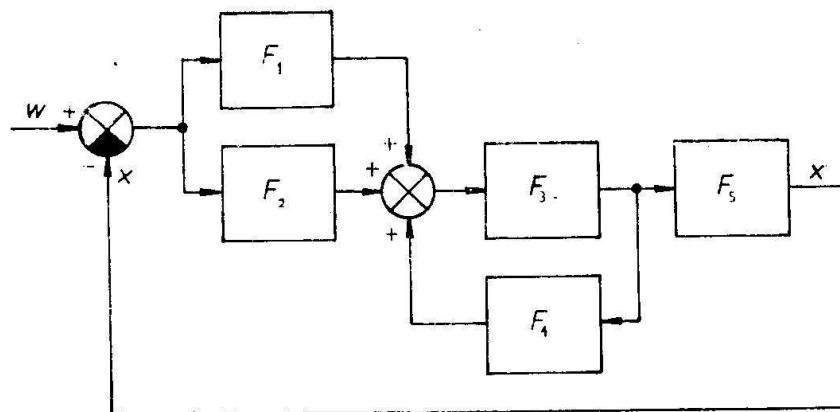
$$F_{dB} \approx 20 \log \frac{1}{|F_2(j\omega)|} = 20 \log 1 - 20 \log |F_2(j\omega)| = 0 - F_{2dB} = -F_{2dB}$$

Amplitudová i fázová charakteristika tedy bude zrcadlovým obrazem charakteristik zpětnovazebního členu. Z toho můžeme vyvodit důležitý závěr:

Zapojením daného členu do obvodu záporné zpětné vazby zesilovače s velkým zesílením získáme nový člen, který má opačné dynamické vlastnosti než člen původní.

Toto pravidlo se uplatňuje i pro statické vlastnosti členů (např. pro daný typ nelinearity).

6.4. Kombinované řazení bloků



Obr. 73. Příklad kombinovaného zapojení

V praxi se často vyskytují zapojení jednotlivých členů, která jsou kombinacemi předešlých základních zapojení. Při výpočtu celkového přenosu takového složitěho obvodu proto obvody postupně zjednodušujeme, až získáme jediný blok. Přitom označujeme přenosy dílčích zjednodušených obvodů pomocí výchozích přenosů. Například zjednodušením obvodu se členy s přenosy $F_1(p)$, $F_2(p)$ získáme člen s přenosem $F_{1,2}(p)$. Zjednodušovat začínáme vždy zevnitř schématu. Jako příklad je uvedeno blokové schéma na obr. 73. Paralelní bloky

F_1, F_2 nahradíme blokem $F_{1,2} = F_1 + F_2$ (obr. 71). V dalším kroku zjednodušíme obvod F_3, F_4 s kladnou zpětnou

$$F_{3,4} = \frac{F_3}{1 - F_3 F_4}$$

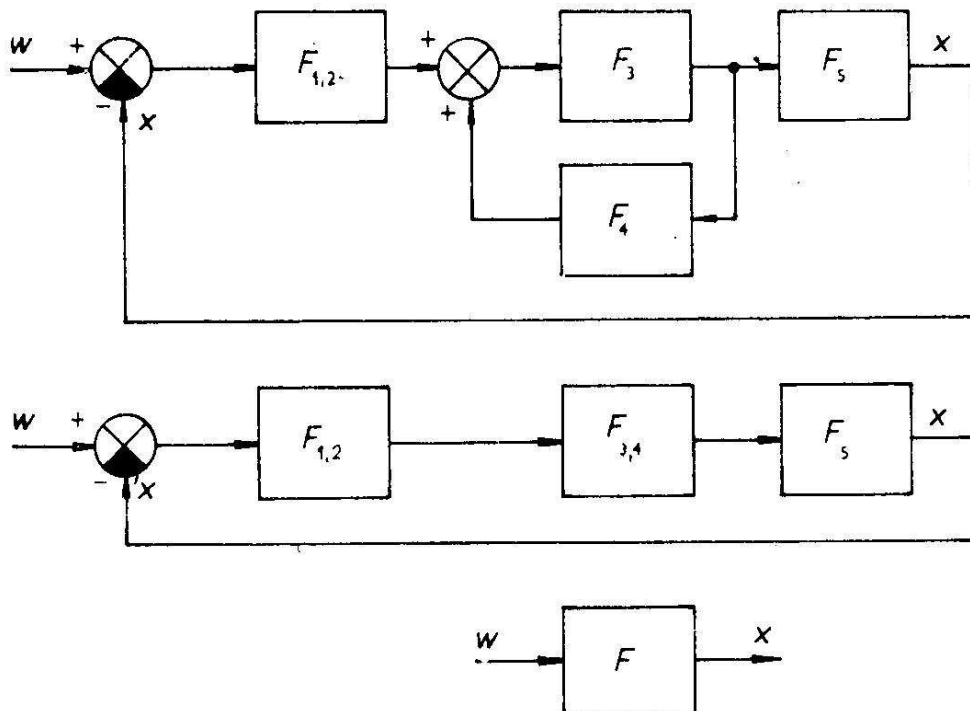
Výsledný přenos tří zbylých členů zapojených v sérii je dán součinem přenosů

$$F_{1,2,3,4,5} = (F_1 + F_2) \frac{F_3}{1 - F_3 F_4} F_5 = \frac{(F_1 + F_2) F_3 F_5}{1 - F_3 F_4}$$

Výsledný přenos obvodu se zápornou zpětnou vazbou, se zpětnovazebním přenosem rovným 1, je dán vztahem

$$F = \frac{\frac{(F_1 + F_2) F_3 F_4}{1 - F_3 F_4}}{1 + \frac{(F_1 + F_2) F_3 F_5}{1 - F_3 F_4}} = \frac{\frac{(F_1 + F_2) F_3 F_5}{1 - F_3 F_4}}{\frac{(1 - F_3 F_4) + (F_1 + F_2) F_3 F_5}{1 - F_3 F_4}} = \frac{F_1 F_3 F_5 + F_2 F_3 F_5}{1 - F_3 F_4 + F_1 F_3 F_5 + F_2 F_3 F_5}$$

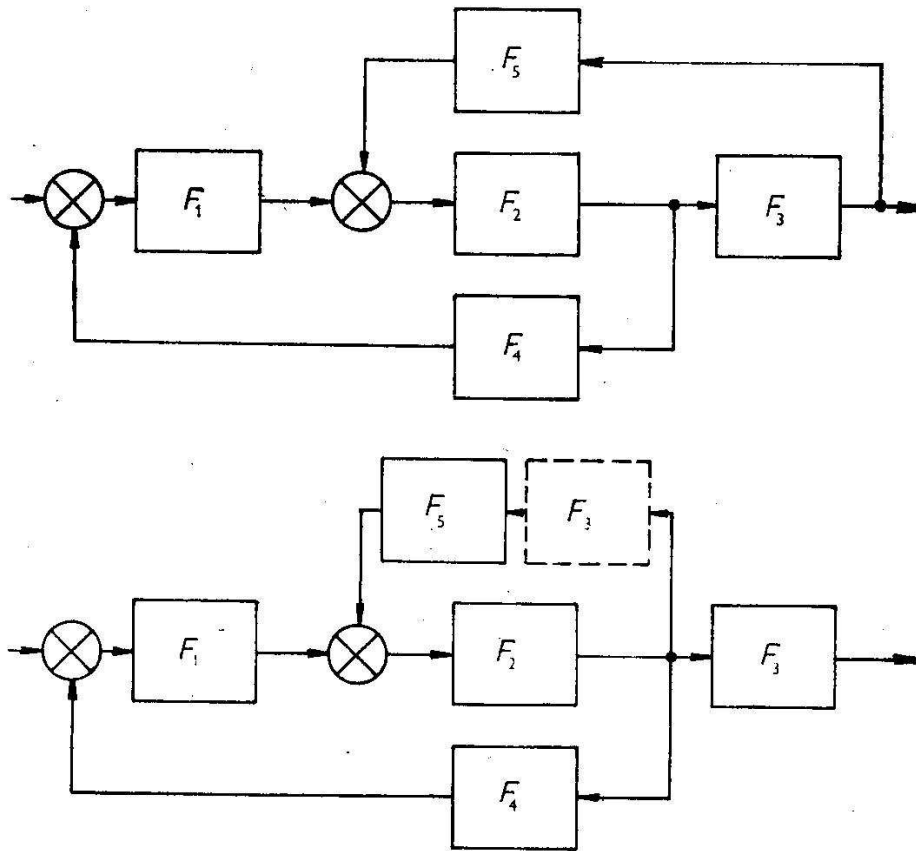
Zjednodušování obvodu je znázorněno na obr. 74.



Obr. 74. Postup při zjednodušování kombinovaných obvodů

Jestliže se ve složitém obvodu kříží zpětné vazby, musíme toto křížení odstranit zařazením takových myšlených členů, které zajišťují, že se přenos obvodu nezmění. Takový

příklad je uveden na obr. 75.



Obr. 75. Odstranění křížení zpětných vazeb myšleným blokem F_3 (čárkovaně)

Kříže

Křížení vazeb jsme odstranili zařazením myšleného přenosu F_3 (čárkovaně). Tím jsme odstranili křížení zpětných vazeb, aniž se změnil přenos. Můžeme tedy obvod zjednodušit na základě uvedených pravidel.

6.5. Přenos řízení a přenos poruch

Pravidla blokové algebry můžeme použít pro obecné regulační schéma. Nejprve si vypočítáme přenos uzavřeného regulačního obvodu, uvažujeme-li, že vstupním signálem je pouze řídicí veličina w , takže do obvodu nevstupují žádné poruchy ($z = 0$). Zapojení takového obvodu je na obr. 76. *Přenos*

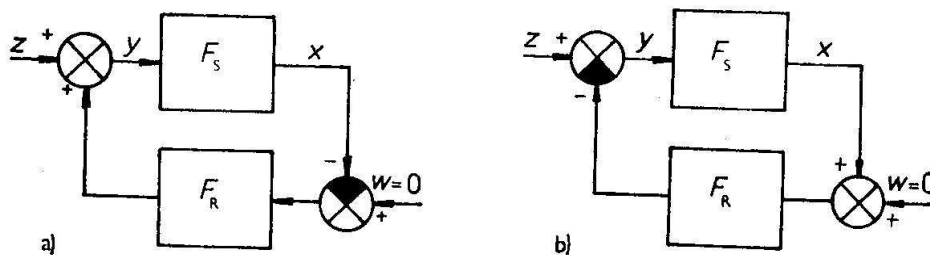
řídicí veličiny w (tj. *přenos řízení*) do regulované soustavy určíme pomocí přenosu regulátoru $F_R(p)$ a přenosu regulované soustavy $F_S(p)$. Předpokládáme, že zpětnovazební přenos se pro jeánoduchost rovná jedné. Výstupní veličinou je regulovaná veličina x .

$$\frac{x(p)}{w(p)} = \frac{F_R(p)F_S(p)}{1 + F_R(p)F_S(p)}$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že vzhledem k velkému zesílení regulátoru $F_R(p)$ můžeme jedničku ve jmenovateli zanedbat, takže přenos řízení se v tomto případě blíží jedné

$$\frac{x(p)}{w(p)} \approx 1$$

Nyní vypočítáme **přenos poruch** do regulované soustavy (opět je to přenos uzavřeného regulačního obvodu). Při tom budeme předpokládat, že řídicí veličina je nulová ($w = 0$). Pro poruchovou veličinu z je situace znázorněna na obr. 77.



Obr. 77. Základní regulační schéma pro zjištění přenosu poruch

Základní schéma na obr. 77a je pomocí komutativního zákona překresleno (obr. 77b). Jde o dvojí změnu znaménka v rozdílovém a součtovém členu. Vzhledem k tomu, že $w = 0$, zůstane přenos nezměněn, takže jej můžeme vyjádřit vztahem pro antiparalelní zapojení se zápornou zpětnou vazbou

$$\frac{x(p)}{w(p)} = \frac{F_S(p)}{1 + F_R(p)F_S(p)}$$

Regulátor má zajistit, aby poruchy reprezentované poruchovou veličinou $z(p)$ co nejméně ovlivňovaly regulovanou veličinu $x(p)$. Jinými slovy, požadujeme, aby přenos poruch byl co nejmenší. Zanedbáme-li opět jedničku ve jmenovateli výrazu, vidíme, že přenos poruch je přibližně určen převrácenou hodnotou přenosu regulátoru

$$\frac{x(p)}{w(p)} \approx \frac{1}{F_R(p)}$$

Snažíme se proto, aby přenos regulátoru byl v potřebném frekvenčním pásmu co největší.