

2. Regulované soustavy

11

Největší vliv na průběh regulačního děje mají přenosové vlastnosti regulovaných soustav a ústředních regulačních členů. Při návrhu regulace je třeba znát přenosové vlastnosti regulované soustavy a podle nich volit typ regulátoru. Ten je určen druhem ústředního členu, kterému pak v užším slova smyslu někdy říkáme také regulátor. Výraz „regulátor“ se tedy používá pro označení zařízení, které jako celek slouží k regulování regulované soustavy, ale také pro stručné označení ústředního regulačního členu obsaženého v daném regulačním obvodu.

2.1 Statické a astatické regulované soustavy

1

Regulované soustavy mohou mít charakter některého dynamického členu uvedeného v předchozí kapitole s výjimkou derivačního členu. V praxi se tedy setkáváme se statickými regulovanými soustavami (jejich frekvenční přenos má pro $\omega = 0$ konečnou velikost) a v menší míře i s astatickými regulovanými soustavami (jejich frekvenční přenos je pro $\omega = 0$ nekonečný). Před návrhem regulátoru je třeba danou regulovanou soustavu identifikovat, tzn. určit její přenos. U soustav s pomalou odezvou nejčastěji měříme jejich přechodovou charakteristiku. Z jejího průběhu pak určíme přibližnou hodnotu přenosu. U soustav s rychlou odezvou se lépe uplatňuje měření frekvenčních charakteristik. Z jejich průběhu v logaritmických souřadnicích rovněž určíme přibližnou hodnotu přenosu. Pro jednoduché regulované soustavy je možné sestavit diferenciální rovnici soustavy a z ní vypočítat přenos rozborem podle fyzikálních, popř. chemických zákonů. Nejvyšším stupněm identifikace soustav jsou statistické metody, kdy přenos soustavy určujeme z odezvy na vstupní náhodný signál. Takovým signálem je tzv. šumový signál. Statistické metody jsou velmi náročné, dávají však nejlepší výsledky. Vyžadují znalost vyšší matematiky, popř. použití počítače.

Statické regulované soustavy nultého řádu, nemají žádné zpoždění. Vyskytují se zřídka. Jako příklad uvedme odporovou zátěž stabilizátoru (tj. regulátoru) napětí. K zvětšení odolnosti proti kmitání se u těchto soustav uměle zavádí setrvačnost ve formě elektrolytického kondenzátoru připojeného paralelně k výstupu stabilizátoru.

Setrvačné soustavy prvního řádu se na konstantní hodnotu regulované veličiny regulují velmi dobře, nejsou náchylné ke kmitání a jsou málo citlivé ke krátkodobým poruchám. Mají největší schopnost autoregulace ze všech regulovaných soustav. Tyto jednoduše soustavy jsou typické pro regulaci teploty menších pecí, pro regulaci otáček motorů a tlaku plynů.

Soustavy vyšších řádů tlumíme, abychom potlačili jejich kmitání. Značné fázové posuny způsobené soustavami vyšších řádů velmi znesnadňují regulaci, neboť nedovolují zavedení silné záporné zpětné vazby, protože ta se při celkovém fázovém posunu 180° mění v kladnou zpětnou vazbu. Jsou-li splněny podmínky vzniku oscilací, regulační systém se rozkmitá. kmitavé členy vznikají spojením několika setrvačných členů prvního řádu. Příkladem spojení kapacit různého charakteru je těžké kolo (hmotnost), jehož otáčky jsou regulovány servomotorem přes dlouhý, relativně slabý hřídel (tj. poddajnost). U velkých pecí s mohutnou vyzdívkou se uplatňuje tepelný odpor vyzdívky, rozložený v celém objemu s tepelnou kapacitou vyzdívky, podobně jako elektrické setrvačné členy RC, zapojené ve

velkém počtu za sebou. Taková pec má charakter kmitavého členu vyššího řádu. tím je řád soustavy vyšší, tím je regulace obtížnější. Určíme-li z přechodové charakteristiky soustavy hodnoty doby průtahu T_u a doby náběhu T_n , pak jejich poměr informativně určuje obtížnost regulace soustav

$$\frac{T_u}{T_n} < \frac{1}{10} \quad \text{snadno regulovatelné,}$$

$$\frac{T_u}{T_n} < \frac{1}{6} \quad \text{ještě regulovatelné,}$$

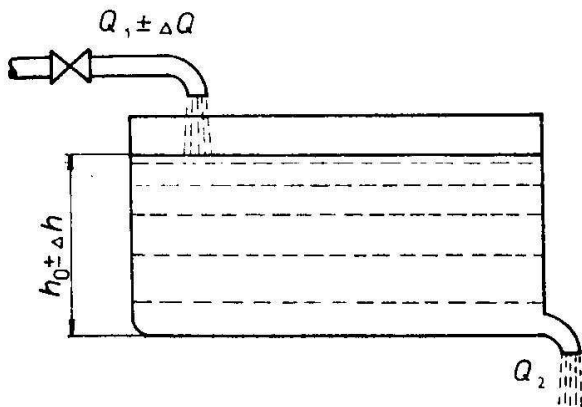
$$\frac{T_u}{T_n} \geq \frac{1}{3} \quad \text{obtížně regulovatelné.}$$

V praxi proto zmenšujeme dobu průtahu, např. cirkulaci vzduchu nebo mícháním ohřívané kapaliny, popř. zvětšujeme dobu náběhu, např. zvětšováním objemu intenzívně míchané ohřívané kapaliny.

Ještě hůře se regulují soustavy s dopravním zpožděním τ . U setrvačných členů prvního řádu s časovou konstantou T můžeme poměr τ/T dosadit do uvedených vztahů místo T_u/T_n , abychom si učinili o obtížnosti regulace přibližnou představu. Dovoluje to podobnost přechodových charakteristik soustav obou typů. V praxi se snažíme zmenšit dopravní zpoždění na minimum a, pokud je to možné, zvětšit setrvačnost soustavy tak, aby časová konstanta byla mnohem větší než dopravní zpoždění.

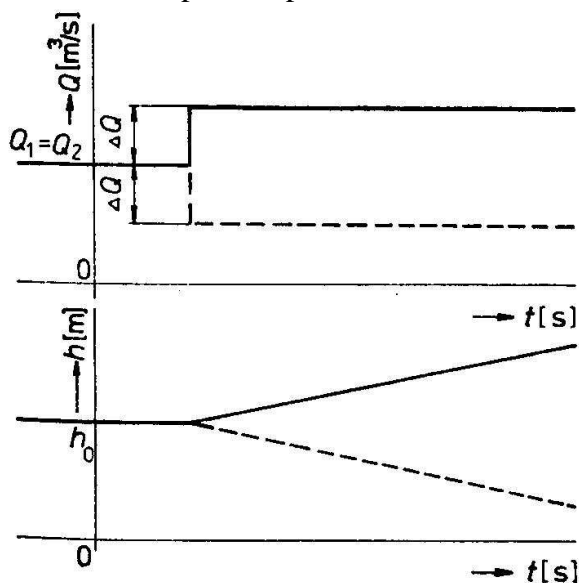
Derivační soustava se v automatizační technice nevyskytuje. Jako příklad z nízkofrekvenční techniky bychom mohli použít reproduktorovou soustavu připojenou k výstupu komplementárního dvoučinného tranzistorového zesilovače přes vazební kondenzátor, přičemž záporná zpětná vazba je odvozena od napětí na samotných reproduktorech (tedy až za kondenzátorem). Regulační schopnost záporné zpětné vazby se v tomto případě neuplatní pro stejnosměrný signál (pro stabilizaci pracovního bodu) a pro střídavý signál s nízkým kmitočtem.

Astatické regulované soustavy jsou soustavy, u kterých se při změně akční veličiny na jejich vstupu (např. v důsledku poruchy) regulovaná veličina na jejich výstupu neustálí. V jejich diferenciálních rovnicích totiž chybějí členy s nulou derivací. Podle toho, kolik koeficientů s nejnižšími indexy je nulových, takový je stupeň astatismu soustavy. Regulují se poměrně obtížně, naštěstí se vyskytují zřídka. Jako příklad uvedete vodní nádrž s odtokem, ve které máme regulovat přítokem výšku hladiny. Je to astatická soustava s astatismem 1. stupně.



Obr. 66. Vodní nádrž jako astatická regulovaná soustava

Na obr. 66 je znázorněn přítok vody Q_1 a odtok Q_2 . Hladina se ustálí na úrovni h_0 pouze v případě, je-li přítok Q_1 stejně velký jako odtok Q_2 . Jestliže přítok vlivem poruchy vzroste nebo klesne o hodnotu ΔQ , hladina bude stoupat, dokud voda nezačne přetékat přes okraj nádrže, nebo bude klesat, dokud se nádrž nevyprázdní. Tuto skutečnost zobrazuje obr. 67. Stejný důsledek bude mít porucha odtoku nádrže. Astatické soustavy tedy nemají autoregulační schopnost. Obtížnost regulace se ještě zvětšuje, uplatňuje-li se v soustavě ještě doba průtahu nebo dopravní zpoždění.



Obr. 67. Výška hladiny h v nádrži v závislosti na přítoku kapaliny $Q_1 \pm \Delta Q$

Jako další příklady astatických soustav je možné ještě uvést dopravní prostředky při řízení směru pohybu a turbíny při regulaci otáček.

2.2 Rozdělení regulátorů

1

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, roztěžníky, převody atd.). Tyto regulátory nejsou příliš přesné ani rychlé, jsou rozměrné a jejich jedinou výhodou je jednoduchost a to, že mohou být snadno opraveny.

b) Pneumatické regulátory jsou vhodné v závodech, kde je realizován rozvod tlakového vzduchu. Vzhledem k velké poddajnosti vzduchu mají měkkou charakteristiku, která může

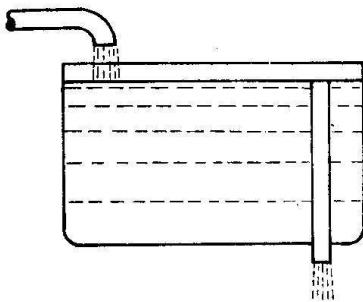
být někdy výhodná. Regulační obvody jsou propojeny trubičkami, porucha se snadno zjistí podle syčení vzduchu. Využívají různých ventilů, membrán, clonek, vzduchových válců, turbínách apod. Jsou provozně nenáročné, přesnost a rychlost vyhovuje pro mírně náročné aplikace.

c) Hydraulické regulátory využívají k napájení tlakový olej. Vzhledem k nestlačitelnosti kapalin mohou vyvinout velkou sílu. Využívají různých ventilů, hydraulických motorů, hydraulických válců apod. Rozvod je realizován tlakovými hadicemi se speciálními koncovkami. U hydraulických systémů je kladen velký důraz na těsnost. Hmotnost kapaliny a pohyblivých součástí zhoršuje dynamické vlastnosti, přesnost regulace je většinou uspokojivá. Předností je velká spolehlivost a snadné provádění oprav. Proto se tyto regulátory často používají v těžkých provozech.

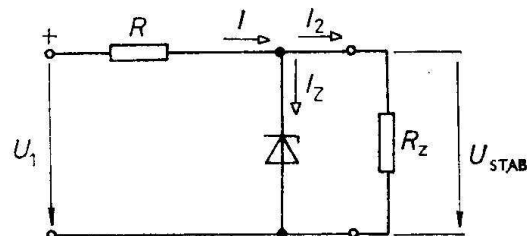
d) Elektrické regulátory používají k napájení elektřinu. Regulační systémy, které jsou dnes již překonané, využívaly různých elektrických strojů (dynam, motorů, točivých a magnetických zesilovačů apod.). Příkladem je Wardovo-Leonardovo soustrojí. Dnes jsou velmi rozšířeny elektronické regulátory využívající nejmodernějších polovodičových součástek (tranzistorů, tyristorů, triaků, integrovaných obvodů apod.). Pouze akční členy jsou elektromechanické (elektromagnety, elektromagnetické ventily, servomotory). 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. Se zavedením integrovaných obvodů a dalších moderních součástek silně vzrostla i spolehlivost těchto systémů, takže k poruchám dochází zřídka. Další nevýhodou je jistá citlivost na poruchy v síti nebo na elektromagnetické pole. Někdy tyto regulátory samy produkují rušivé signály. Nápravou je důkladné odrušení všech zdrojů rušení.

2 Dělení regulátorů podle způsobu napájení

a) Přímé (direktní) regulátory odebírají energii pro svou činnost z regulované soustavy. Jde o jednoduché, nejčastěji mechanické regulátory bez velkých nároků na kvalitu regulace. Nejznámějšími jsou Wattův regulátor otáček s roztěžníkem, používaný dříve u parních strojů, a plovákový regulátor výšky hladiny, používaný například u splachovačů. Zvláštní skupinu přímých regulátorů tvoří systémy s přepadem. Na obr. 68 je regulace výšky hladiny přepadem.



Obr. 68. Přímý regulátor výšky hladiny s přepadem



Obr. 69. Regulátor napětí (stabilizátor) se stabilizační diodou

Stejný princip je použit u varného tlakového (Papinova) hrnce, u něhož je při přebytku tepla udržován stálý tlak jehlovým ventilem, který je uzavírán závažím nebo pružinou. Regulace přepadem je také použita u paralelních stabilizátorů napětí, z nichž nejznámější je stabilizátor se stabilizační diodou (obr. 69). Napájecí napětí U_1 musí být tak velké a odpor rezistoru R tak malý, aby při největším odběru proudu I_2 nezpůsobil úbytek na rezistoru pokles napětí na výstupu pod žádanou hodnotu U_{STAB} , které je určeno Zenerovým napětím diody. Přebytek vstupního proudu I velikostí I_z prochází diodou, která je proto nejvíce zatěžována ztrátovým výkonem při odpojené zátěži R_z . Společným znakem a nevýhodou těchto regulátorů je ztráta části energie, a proto nízká energetická účinnost. Výhodou je neobyčejná jednoduchost a velká spolehlivost. Tento způsob se používá s výhodou k jištění horních mezních hodnot různých veličin.

b) **Nepřímé (indirektní) regulátory** odebírají energii pro svou činnost ze zvláštního napájecího zdroje (elektrického zdroje stejnosměrného napětí, rozvodu tlakového vzduchu, tlakového oleje apod.). Vyznačují se větší složitostí a tomu odpovídající vyšší kvalitou regulace. Podle přenosových dynamických vlastností, tj. podle způsobu zpracování regulační odchylky e , je dělíme na proporcionální (**P**), integrační (**I**), derivační (**D**), proporcionálně integrační (**PI**), proporcionálně derivační (**PD**) a na proporcionálně integračně derivační (**PID**). Jednotlivé druhy nepřímých regulátorů jsou vhodné pro určité druhy regulovaných soustav a dosahuje se jimi různé kvality regulace

3. Dělení regulátorů podle průběhu přenášeného signálu

a) Spojité regulátory pracují se spojitými signály. 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. 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 (jsou to tzv. kvazispojitý regulátory). Nespojitý regulátory jsou velmi perspektivní pro vysokou účinnosti i spolehlivost. Nevýhodou je vznik rušení jako důsledek širokého frekvenčního spektra, způsobeného vyššími harmonickými signály, vznikajícími při spínání energie. Aby rušení nepřevyšovalo přípustnou úroveň, je třeba pečlivě odrušit příslušné elektrické obvody.

Číslicové regulátory jsou realizovány obvykle číslicovým počítačem. Z hlediska způsobu zpracování informace budou zařazeny mezi nespojitý .

4. Dělení regulátorů podle linearity

a) Lineární, popř. kvazilineární regulátory, použité převážně u spojitý regulace. Linearita v daném pracovním rozsahu je dosažena zavedením silné záporné zpětné vazby operačních zesilovačů.

b) Nelineární regulátory jsou typické pro nespojitou regulaci. Typickými prvky jsou spínací tranzistory, různé klopné obvody, číslicové integrované obvody, tyristory a tričky, popř. relé a stykače.

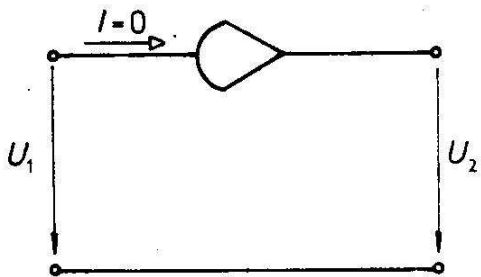
5 Vlastnosti regulátorů

Jak již bylo uvedeno, vlastnosti regulátorů určují kvalitu regulace. Při volbě regulátoru je třeba přihlížet i k přenosovým vlastnostem regulované soustavy. Cílem je, aby se přenos řízení v co nejširším frekvenčním pásmu blížil jedné a přenos poruch nule. Na tomto principu provádíme návrh (syntézu) konkrétního regulačního obvodu, známe-li přenosové vlastnosti regulované soustavy (byla-li provedena identifikace soustavy). Syntézu můžeme provádět čistě matematicky na základě blokové algebry nebo tuto metodu kombinujeme s grafickou syntézou, nejlépe pomocí logaritmických frekvenčních charakteristik.

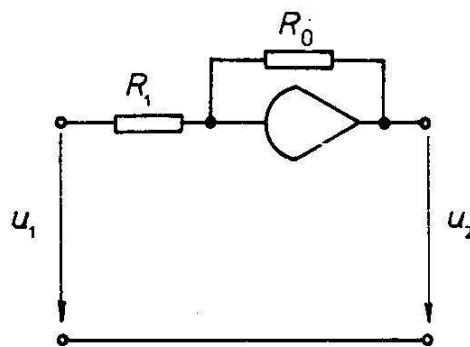
Dále probereme základní typy spojitych lineárních regulátorů s ohledem na, jejich dynamické přenosové vlastnosti.

5.1 Proporciální regulátor P

Regulátor P pouze zesiluje regulační odchylku e , přičemž zesílení je v širokém frekvenčním rozsahu konstantní. Teprve na vysokých frekvencích, které nejsou pro danou regulovanou soustavu podstatné, jeho přenos vlivem setrvačnosti klesá. Jde tedy o proporcionalní člen s konstantním reálným přenosem mnohem větším než jedna. Tento regulátor snadno vytvoříme stejnosměrným invertujícím zesilovačem, který je symbolicky znázorněn na obr. 78.



Obr. 78. Ideální invertující stejnosměrný zesilovač $U_2 = -AU_1$



Obr. 79. Základní zapojení proporcionalního regulátoru, $K = -R_0/R_1$

U ideálního zesilovače předpokládáme nekonečný vstupní odpor, nulový výstupní odpor a nekonečné zesílení A bez zpětné vazby. Pro takový zesilovač můžeme psát

$$U_2 = -AU_1$$

Ideální zesilovač můžeme dobře nahradit skutečným operačním zesilovačem s použitým invertujícím vstupem. Pro vysvětlení vlastností regulátorů budeme pracovat se zjednodušeným ideálním zesilovačem podle obr. 78. Jeho zesílení můžeme velice jednoduše nastavit pomocí záporné zpětné vazby. Schéma proporcionalního regulátoru je na obr. 79.

Výsledný přenos regulátoru je dán převrácenou hodnotou přenosu zpětnovazebního členu, tedy odporového děliče

$$F(p) = -\frac{R_1 + R_0}{R_1}$$

Záporné znaménko vyjadřuje, že použitý zesilovač obrací fázi (invertuje).

Zpravidla nastavujeme zesílení regulátoru mnohem větší než jedna. V tomto případě je R_0 mnohem větší než R_1 , takže v čitateli je možné R_1 vzhledem k R_0 zanedbat. Přenos proporcionálního regulátoru je pak přibližně určen zjednodušeným vztahem

$$F(p) \approx K \approx -\frac{R_0}{R_1}$$

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

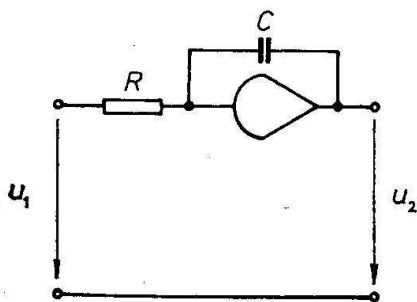
$$K \approx -\frac{R_0}{R_1 + R_G}$$

Přenos proporcionálního regulátoru je tedy určen poměrem odporů ve zpětné vazbě a ve vstupu.

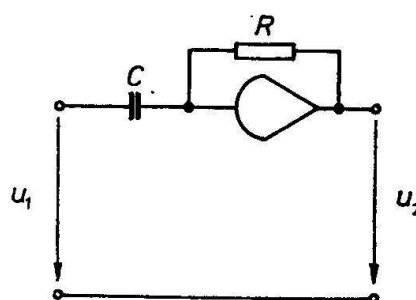
Skutečné proporcionální regulátory nemají přenos ideálně konstantní, tedy nezávislý na frekvenci. Základním znakem těchto regulátorů však je, že se jejich přechodová charakteristika v relativně krátkém čase ustálí na hodnotě K .

5.2 Integrovní regulátor I

Regulátor I jako jediný umožňuje úplné odstranění regulační odchylky e , neboť ta je regulátorem integrována. K jejímu úplnému nulování dochází až za určitý čas. Regulátor I se tedy hodí tam, kde poruchy nejsou příliš časté nebo regulovaná soustava má velkou setrvačnost (velkou odolnost proti krátkodobým poruchám).



Obr. 80. Základní zapojení integračního regulátoru, $F(p) = -1/pCR$



Obr. 81. Základní zapojení derivačního regulátoru, $F(p) = -pRC$

Integrovní regulátor lze rovněž snadno realizovat pomocí stejnosměrného invertujícího zesilovače. Na obr. 80 je základní zapojení tohoto regulátoru. Podobně jako u proporcionálního regulátoru můžeme i zde vyjádřit přenos jako poměr zpětnovazební

impedance a vstupního odporu. Zpětnovazební impedancí je u regulátoru I kapacitní reaktance velikostí

$$X_c(j\omega) = \frac{1}{j\omega C}$$

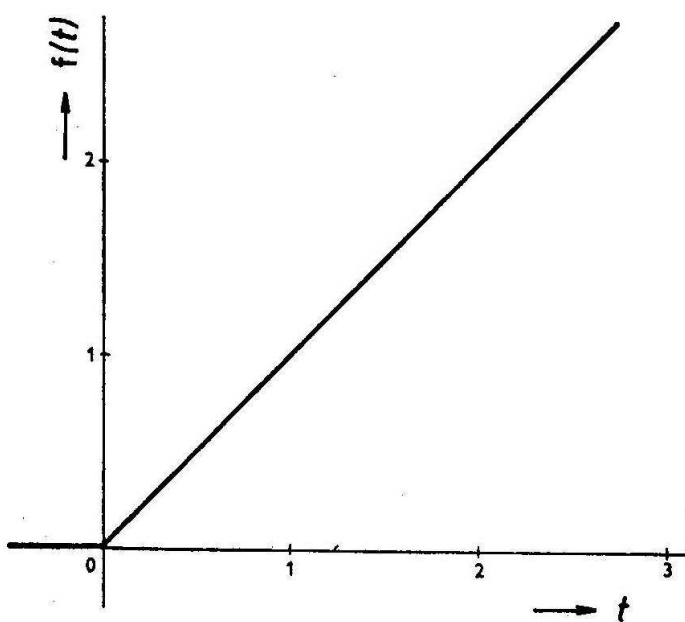
V Laplaceově transformaci má reaktance hodnotu

$$X_c(p) = \frac{1}{pC}$$

Vyjádříme-li poměr reaktance a odporu, získáme přibližnou hodnotu přenosu integračního regulátoru

$$F(p) = -\frac{1}{pCR} = -\frac{1}{pCR}$$

Činnost takového integračního regulátoru je v praxi velmi uspokojivá. Parazitní setrvačnosti se totiž uplatňují až při vyšších frekvencích, kdy je přenos regulátoru I již stejně velmi malý. Velká amplituda přenosu se požaduje při stejnosměrném signálu a střídavých signálech s velmi nízkými frekvencemi. 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 v tomto pracovním rozsahu přímka v úrovni -90° . Přechodová charakteristika je přímka z počátku, jejíž strmost je nepřímo úměrná časové konstantě RC zpětnovazebního děliče. Pro $RC = 1$ s se shoduje s lineární funkcí $t(t)$ na obr. na další straně.



Obr. Lineární funkce $t(t)$

5.3 Derivační regulátor D

Ideální regulátor **D** nelze realizovat. Způsobují to parazitní setrvačnosti, které potlačují přenos při vysokých frekvencích, tj. v oblasti, v níž má být přenos regulátoru největší.

Ideální přenos určuje opět poměr odporu ve zpětné vazbě a impedance ve vstupu

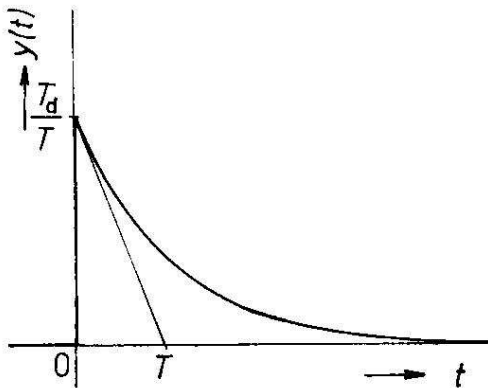
$$F(p) = -\frac{R}{\frac{1}{pC}} = -pRC = -pT_d$$

kde $T_d = RC$ je derivační časová konstanta.

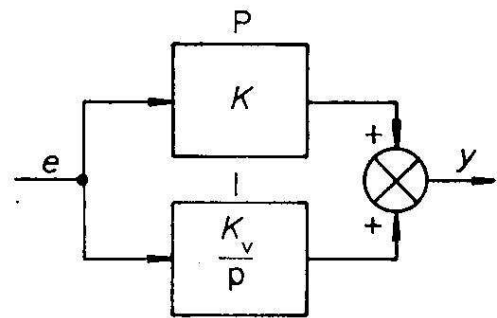
Pokud bychom chtěli vyjádřit přenos skutečného derivačního členu, musíme výraz násobit přenosem parazitního setrvačného členu s časovou konstantou T

$$F(p) = -pRC \frac{1}{Tp+1} = -\frac{pRC}{Tp+1}$$

Amplitudová frekvenční charakteristika protíná úroveň 0 dB při frekvenci $\omega = 1/RC$ a roste se sklonem 20 dB/dek až do frekvence $\omega_1 = 1/T$, kde regulátor přestává derivovat v důsledku parazitní setrvačnosti s časovou konstantou T . Fáze je v rozsahu derivování $+90^\circ$. Přejímová charakteristika v důsledku setrvačnosti vrcholí na hodnotě RC/T a klesá se strmostí určenou velikostí časové konstanty T (obr. 82).



Obr. 82. Přejímová charakteristika skutečného derivačního regulátoru



Obr. 83. Vytvoření regulátoru PI

Derivační regulátor má při nulové frekvenci (pro stejnosměrný signál) nulový přenos. Vyplývá to jak z průběhu amplitudové charakteristiky, tak z průběhu přejímové charakteristiky. Samotný derivační regulátor nezesiluje regulační odchylku, a musí být proto vždy kombinován s proporcionálním, popř. integračním regulátorem. V této kombinaci derivační regulátor zrychluje regulaci, což má velký význam pro odstranění krátkodobých a četných poruch.

Uvedené základní typy regulátorů jsou dynamickými členy s velkým přenosem v požadovaném frekvenčním pásmu. Jejich přenosy a charakteristiky byly podrobně probrány. Amplitudové charakteristiky regulátorů musí ležet nad úrovní 0 dB.

Nyní se zaměříme na kombinace základních typů, které umožňují dosáhnout vyšší kvality než jednoduché regulátory. Tyto kombinované regulátory realizujeme v zásadě třemi způsoby:

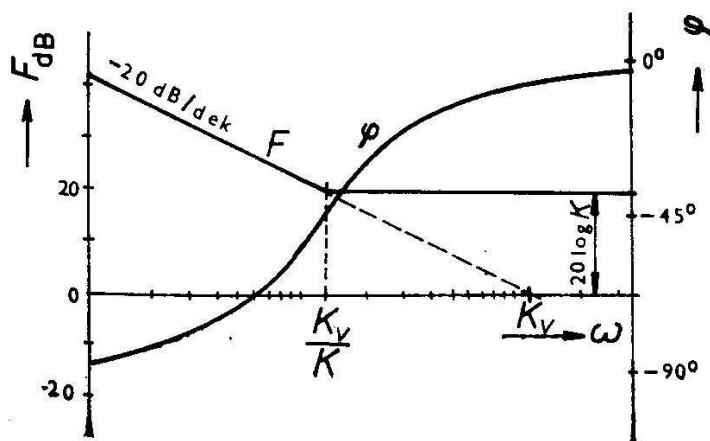
- a) paralelním řazením regulátorů výchozích typů - dosahuje se tak nejlepších výsledků, je však nutný značný počet zesilovačů;
- b) použitím korekčních členů - obsahují zpravidla pouze jeden zesilovač, kvalita je však nižší;
- c) zpětnovazebním zapojením - využívají zpravidla pouze jednoho zesilovače, kvalita je vyhovující. Nevýhodou je, že k nastavování různých konstant regulátoru se používají stejné prvky, a to někdy vede ke vzájemnému ovlivňování konstant a může to znemožnit použití daného regulátoru.

5.4 Proporciálně integrační regulátor PI

Regulátor PI vznikne v elektronické verzi paralelním spojením regulátoru P a I, jak je znázorněno na obr. 83, kde K je přenos regulátoru P a K_0 je rychlostní konstanta regulátoru I. Někdy se zavádí tzv. *integrační časová konstanta* $T_i = RC = 1/K_v$. Přenos regulátoru lze psát pomocí blokové algebry ve tvaru

$$F(p) = K + \frac{K_v}{p} = K + \frac{1}{T_i p}$$

Výsledné logaritmické frekvenční charakteristiky jsou na obr. 84.

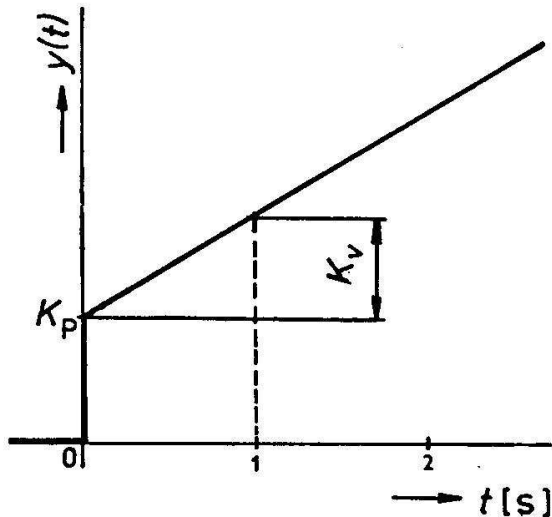


Obr. 84. Frekvenční charakteristiky regulátoru PI

Pokračující amplitudová charakteristika (čárkovaně) protíná úroveň 0 dB při frekvenci, kdy amplituda přenosu se rovná jedné, tedy při $\omega_0 = K_v$. Lom charakteristiky je určen průsečíkem integrační větve se sklonem -20 dB/dek a proporcionální větve v úrovni $20 \log K$. K tomu dochází při frekvenci

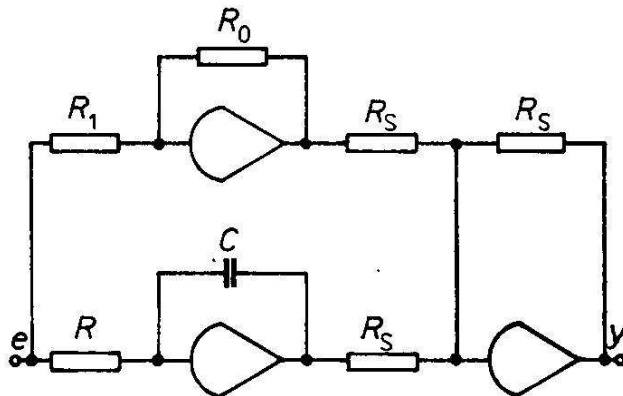
$$\omega_1 = \frac{K_v}{K} = \frac{1}{KT_i}$$

Přechodová charakteristika na obr. 85 vznikne součtem obou dílčích přechodových charakteristik.



Obr. 85. Přechodová charakteristika regulátoru PI

Principiální zapojení regulátoru PI je na obr. 86.



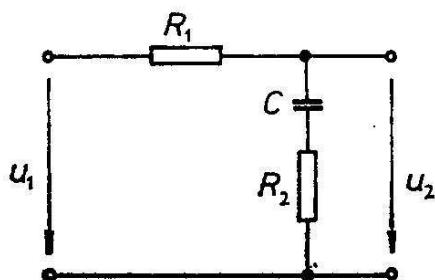
Obr. 86. Zapojení regulátoru PI

Součet signálů se provádí v invertujícím sumátoru (sčítačce), který tvoří tři stejné rezistory R_s a invertující zesilovač. Výstupní signál y je určen vztahem

$$y = -(x_1 + x_2)$$

kde x_1 a x_2 jsou vstupní signály invertujícího sumátoru. Sumátor musí být invertující proto, že jednotlivé regulátory na jeho vstupu obrazejí fázi o 180° , neboť jsou rovněž vytvořeny invertujícími zesilovači. Požadujeme-li, aby invertující sumátor zesiloval např. desetkrát, zvětšíme odpor jeho zpětnovazebního rezistoru rovněž desetkrát, takže jeho velikost bude $10 R_s$.

V některých případech stačí zjednodušený regulátor **PI**, u kterého je integrační složka nahrazena setrvačností s velkou časovou konstantou **T**. Používá se k tomu pasivní korekční člen znázorněný na obr. 87 ve spojení s neinvertujícím stejnosměrným zesilovačem.



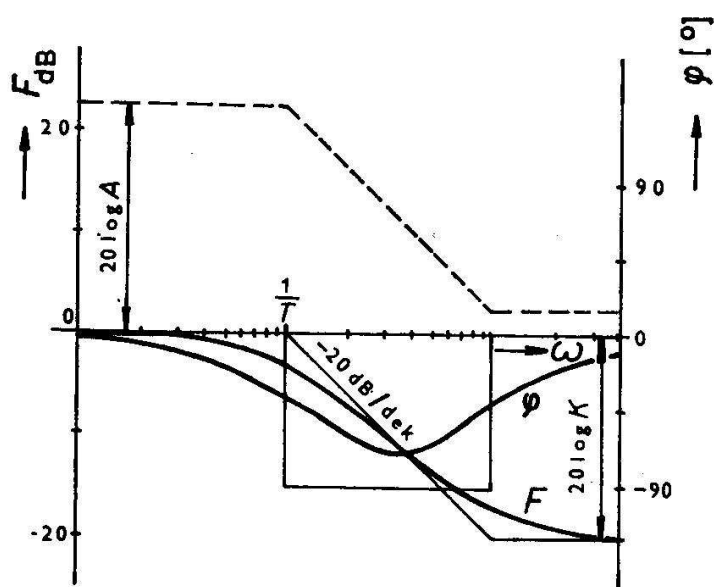
Obr. 87. Korekční člen pro zjednodušený regulátor PI

Na vysokých frekvencích má kondenzátor zanedbatelnou reaktanci, a proto se neuplatňuje. Přenos proporcionální části členu je pak určen přenosem odporového děliče

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

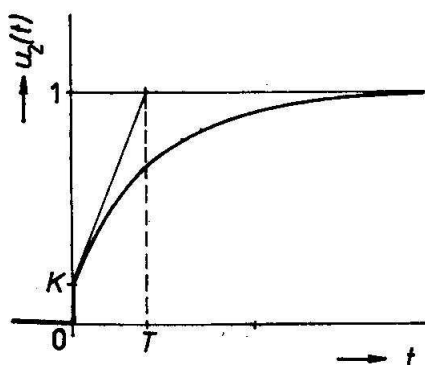
Odporů rezistorů volíme tak, aby přenos **K** byl v rozmezí 1/20 až 1/5. Při nízkých frekvencích se uplatňuje kondenzátor, tvořící s oběma rezistory setrvačný člen s časovou konstantou

$$T = (R_1 + R_2)C$$

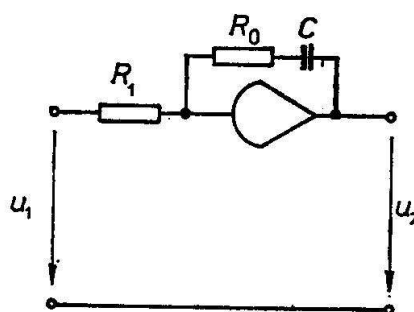


Obr. 88. Logaritmické frekvenční charakteristiky korekčního členu a regulátoru PI po zesílení signálu **A**krát (čárkovaně)

Logaritmické frekvenční charakteristiky korekčního členu jsou na obr. 88. Čárkovaně je vyznačena amplitudová charakteristika regulátoru po doplnění korekčního členu zesilovačem se zesílením **A**. Na obr. 89 je přechodová charakteristika.



Obr. 89. Přejchodová charakteristika korekčního členu PI



Obr. 90. Zpětnovazební regulátor PI

Porovnáme-li obě charakteristiky s charakteristikami dokonalého regulátoru PI, vidíme, že přenos nedosahuje u zjednodušeného regulátoru pro $\omega = 0$ nekonečné velikostí, takže tento regulátor zcela neodstraňuje regulační odchylku e . Pouze ji v porovnání s proporcionálním regulátorem více potlačuje.

Proporcionálně integrační regulátor můžeme vytvořit i zpětnovazebním způsobem. Na obr. 90 je zesilovač se zápornou zpětnou vazbou. Ve zpětnovazební větvi je zapojen člen, který má pro nízké frekvence charakter derivačního členu a pro vysoké frekvence proporcionální charakter. Protože je člen ve zpětné vazbě zesilovače, bude mít celý obvod opačný, tedy proporcionálně integrační charakter. Přenos tohoto regulátoru je dán vztahem

$$F(p) = -\left(K + \frac{K_v}{p}\right)$$

kde

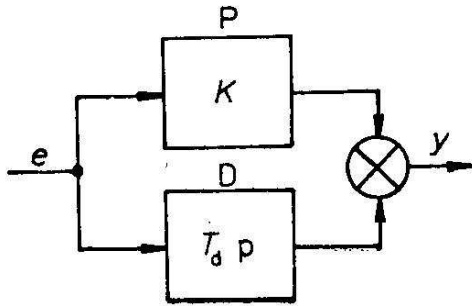
$$K = \frac{R_0}{R_1} \text{ a } K_v = \frac{1}{CR_1}$$

Abychom vyloučili vzájemné ovlivňování (interakci), nastavujeme K změnou R_1 a K_v změnou C .

Proporcionálně integrační regulátory mají oproti integračnímu regulátoru větší přenos na vyšších frekvencích, takže rychleji odstraňují nárazové poruchy. Tento typ regulátoru je často používán pro své výhodné vlastnosti (velké, popř. úplné potlačení regulační odchylky a uspokojivé odstraňování náhlých poruch).

5.5 Proporciálně derivační regulátor

PD

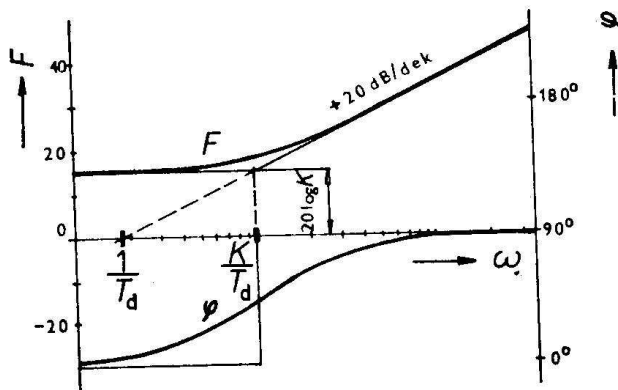


Obr. 91. Vytvoření regulátoru PD

Regulátor PD vznikne paralelním spojením regulátoru P a D (obr. 91), kde K je přenos regulátoru P a $T_d = RC$ je derivační časová konstanta. Přenos regulátoru PD je

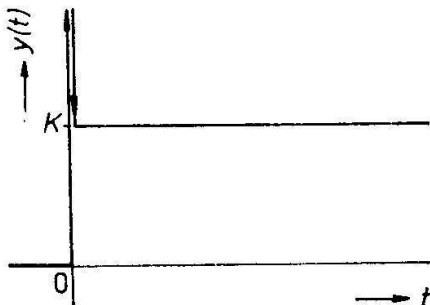
$$F(p) = K + T_d p$$

Logaritmické frekvenční charakteristiky jsou na obr. 92.

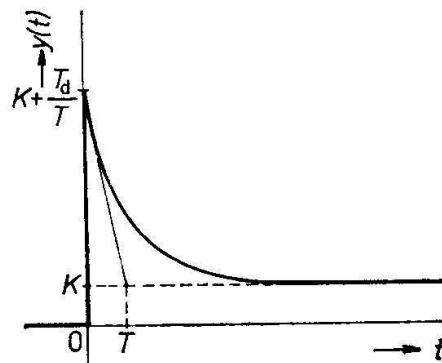


Obr. 92. Frekvenční charakteristiky regulátoru PD

Čárkovaně je naznačen průběh amplitudové charakteristiky samotné derivační složky se strmostí $+20 \text{ dB/dek}$. Tato charakteristika protíná úroveň 0 dB při frekvenci $\omega_1 = 1/T_d$. Frekvence lomu je určena vztahem $\omega_0 = K/T_d$.



Obr. 93. Přejchodová charakteristika ideálního regulátoru PD



Obr. 94. Přejchodová charakteristika skutečného regulátoru PD

Přechodová charakteristika na obr. 93 znázorňuje odezvu ideálního regulátoru PD na jednotkový skok. Skutečný regulátor zatížený setrvačností s časovou konstantou T má přechodovou charakteristiku na obr. 94.

Vznikla sečtením přechodové charakteristiky proporcionálního regulátoru s přenosem K a přechodové charakteristiky skutečného derivačního regulátoru. Principiální zapojení regulátoru PD je na obr. 95.

Použijeme-li korekční člen na obr. 96 ve spojení s neinvertujícím stejnosměrným zesilovačem, získáme zjednodušený regulátor PD. Na nízkých frekvencích má kondenzátor C velkou reaktanci, a proto se neuplatní. Přenos proporcionální části členu je pak určen přenosem odporového děliče