

6 Automatická regulace

doc. Ing. Josef Janeček, CSc.

V této kapitole:

- Základní terminologie – historické souvislosti
- Dynamický systém, nástroje a metody jeho analýzy
- Uzavřený regulační obvod
- Technické prostředky automatické regulace
- Nespojité regulátory a nespojitá regulace

Norbert Wiener: „Zpětná vazba je jako slepčova hůl.“

Zkuste se zeptat nějakého zkušeného odborníka na to, co je v jeho oboru nejdůležitější. Který princip, vlastnost nebo pojem. Obvykle je to velmi obtížné říci a většina lidí značně znejistí (až na univerzální mluvky a odborníky na všechno). Zeptáte-li se však někoho, kdo jen trochu rozumí teorii řízení a regulační technice, odpoví vám bez váhání, že to je **zpětná vazba**.



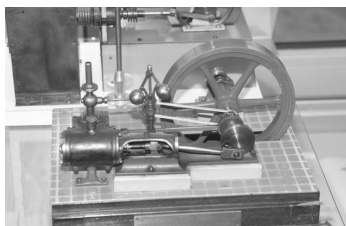
Bez zpětné vazby by nebyl svět světem, nic by nefungovalo tak, jak jsme zvyklí, neplatily by přírodní zákony, zavládl by destruktivní chaos. Zpětné vazbě vděčíme za to, že tu vůbec jsme, že je kolem nás svět se svým řádem a zákonitostmi. Je to prastarý přírodní princip, nám jen přísluší ho pokorně vnímat a ctít. Technika se naučila pouze zpětnou vazbu šikovně využívat.

Příkladů působení zpětné vazby najde každý z nás jistě dost. Nejen ve fyzice, biologii, medicíně, ekologii, ale i ve společenských vědách, ekonomii, finančnictví, estetice...

Vezměte si pro jednoduchý pokus dřevěnou tyč. Postavte si ji na dlaně a zkuste ji udržet v rovnovážné poloze. Většině z nás se to bez problémů podaří. Oči sledují její polohu, náš mozek vyhodnocuje tuto informaci a aktivuje příslušné svaly tak, abychom rovnováhu udrželi. Nic složitějšího, podle stejného principu jsme zvyklí i udržovat rovnováhu svého těla. Zkuste však zavřít oči, tyč na dlaně neudržíte. Přerušili jste zpětnou vazbu a ta přestala fungovat. Proč se ale udržíme na nohou i se zavřenýma očima? Je tomu tak proto, že oči nejsou (na rozdíl od pokusu s tyčí) jediným senzorem polohy našeho těla. Polohu těla vyhodnocují i jemné orgány vnitřního ucha a jejich signály dokáže mozek zpracovat. Dramaticky se však rozpojení zpětné vazby projeví v bezvědomí, kdy se lidské tělo okamžitě kácí k zemi.



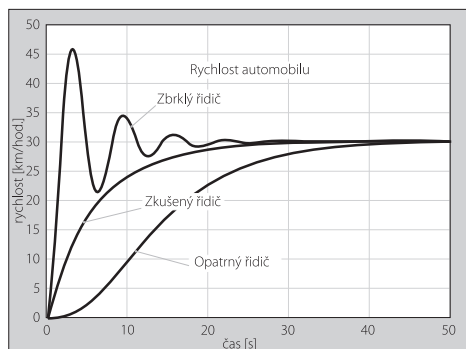
Velmi známým a sugestivním příkladem využití zpětné vazby je Wattův odstředivý regulátor otáček parního stroje. Zvyšující se otáčky parního stroje zvyšují odstředivou sílu rotujících závaží regulátoru a od nich pomocí vahadel odvozená poloha klapky přivírá přívod páry, čímž omezuje otáčky motoru. A naopak. Je to příklad jednoduchého mechanického zařízení, které umožňuje pomocí malých sil regulovat výkonný stroj. Jedná se zde o tzv. *zápornou* zpětnou vazbu, která má *stabilizující charakter* – na rozdíl od tzv. *kladné* zpětné vazby (se



zvyšujícími se otáčkami by se naopak přívod páry zvyšoval), která by vedla k nárůstu otáček, tj. k nestabilnímu regulačnímu pochodu.

Příkladem zpětné vazby, se kterou se určitě setkal téměř každý člověk, je nastavení teploty vody ve sprše. Pokud je voda příliš studená, otevřeme více kohoutek s teplou vodou a naopak. Rychlost nastavení optimální teploty závisí na naší šikovnosti, tedy na kvalitě zpětné vazby. Právě o to v regulaci hlavně jde.

Představte si, že sedíte prvně v autě a učíte se jezdit. Vaším úkolem je rozjet auto a jet konstantní rychlostí. Víte, že aktuální rychlost automobilu odečtete z ručičky tachometru (v regulační technice tomu říkáme **regulovaná veličina**). Sešlápnutím pedálu plynu je možné rychlost zvyšovat a naopak jeho povolením rychlost zmenšovat. Také pro tohle máme svoje označení – **akční veličina**.



Sešlápneme tedy pedál plynu a sledujeme, jak se automobil rozjíždí. V okamžiku, kdy rychlost auta dosáhne požadované hodnoty (tzv. **žádaná hodnota regulované veličiny**), pedál uvolníme a sledujeme, jak automobil zvolňuje. Pak opět trochu přidáme, trochu ubereme a tak dále, až dosáhneme žádané rychlosti. Dokážete si jistě představit to, že jak rychle a jakým způsobem automobil rozjedete, závisí nejen na vlastnostech automobilu, ale i na schopnostech vašich. V případě, že jste opatrný řidič, budete se rozjíždět pomalu a rychlost se bude pozvolna blížit k její žádané hodnotě.

V případě, že jste ale poněkud zbrklý řidič, sešlápnete razantně pedál plynu, auto se rychle rozjede a brzy značně přesáhne žádanou rychlost. Pak rychle uberete a rychlost klesne, atd. V obou případech to není moc dobrý styl jízdy. V prvním případě se rozjíždíte příliš pomalu, v druhém zase příliš rychle a v obou případech poněkud komplikujete provoz na silnici. Kvalitní rozjezd (tzv. **optimální regulační pochod**) je kompromisem mezi oběma krajními případy.

Jistě vás napadne, že **model** automobilu není jen závislost jeho rychlosti na poloze plynového pedálu. Je samozřejmé, že záleží i na dalších faktorech. Může se snadno stát, že s vaším regulátorem v hlavě se ocitnete při příliš agresivní jízdě na mokré nebo zledovatělé vozovce mimo vozovku. Reálný objekt se změnil a váš model tuto informaci nemá. Musíme vzít v potaz nové faktory,



zpřesnit identifikaci a upravit zpětnou vazbu. V regulační technice je vždy přesnost modelu zásadní otázkou. Na jedné straně chceme mít model co nejpřesnější, abychom mohli navrhnout dobrý regulátor. Na druhé straně se nám bude pro příliš složitý model navrhovat regulátor obtížněji. Musíme vždy jít cestou kompromisu, zvolit co nejjednodušší model tak, aby v něm byly zahrnuty všechny podstatné vlastnosti regulovaného objektu.

Tím samozřejmě problémy regulace nekončí, objevují se požadavky na ekonomiku provozu, na bezpečnost a pohodlí, namáhání vozovky, ekologické aspekty atd. Regulátor navrhujeme často intuitivně, na základě zkušeností nebo podle zvolených kritérií a jejich optimalizací.

Současný automobil je složitá soustava s množstvím automatizovaných funkcí. Při jeho konstrukci se výrazně uplatňuje nejen zpětnovazební regulace a řízení, ale i množství dalších metod, postupů i výpočtů, které slouží k zabezpečení spokojenosti zákazníka. Vedle jiných požadavků vystupuje do popředí např. zájem o co nejvyšší výkon a co nejnižší spotřebu paliva při daném obsahu motoru. Je-li tento požadavek aktuální, pak nezbyvá projektantům a konstruktérům motoru, elektronického vstřikování, karoserie i hnací soupravy než využít dostupných optimalizačních metod, aby navrhli tento složitý automatizovaný stroj v souladu s požadovanými kritérii. Podobný problém nastává při vývoji automatického výrobního stroje. Výsledný přínos automatického stroje nespočívá jen v automatizaci všech potřebných funkcí, ale je závislý na kvalitě a vhodnosti výrobní technologie, kterou je stroj vybaven. Technologii vždy řeší jiní odborníci než konstruktéři, zpravidla technologové, ale pro úspěšnou a efektivní automatizaci výrobního procesu je optimalizace technologie naprosto nezbytná.

Při příchodu do garáže nebo na parkoviště očekáváme, že motor našeho automobilu naskočí při prvním startování a potom bude bez problémů sloužit na všech našich cestách. Schopnost automobilu být stále k dispozici se všemi svými funkcemi je spojena s pojmy jakost a spolehlivost. Jakékoli automatické zařízení bez přiměřené míry spolehlivosti je bezcenné, tak jako bude náš automobil, když nenastartuje nebo nám na cestě vypoví často službu. Proto je stále věnována mimořádná pozornost jakosti všech konstrukčních dílců a součástí, a tím i jejich spolehlivosti i spolehlivosti kompletních výrobků. Platí, že bez vysoké nebo alespoň přiměřené jakosti, a tedy i spolehlivosti automatizovaného i automatického výrobku nebude mít naše práce praktický význam a povede spíše ke ztrátám.

Předmět, který začínáme studovat, se zabývá problematikou zpětné vazby. Na technické škole se samozřejmě převážně týká regulace technických a technologických procesů, ale jeho záběr je mnohem širší. Zákonitosti zpětné vazby platí v nejrůznějších oborech.

Při studiu zákonitostí zpětné vazby se neobejdeme bez jisté dávky matematizace problému. Je to nutný základ přesného analytického zkoumání a na technickou školu to bezesporu patří. Nenechte se odradit zdánlivou složitostí. Pokusíme se vám jednoduše přiblížit klasickou metodiku oboru, pomocí níž je možné najít v tomto bludišti nejsnadnější cestu (kterou vymysleli jiní a osvědčila se). Na vás pak bude tuto cestu rozšiřovat nebo hledat cesty jiné. Nabídeme vám způsob myšlení a přístupy, které lze použít i ve zcela odlišných oborech. Budeme se vám snažit v tom pomáhat, snažit se ale musíte hlavně vy...



6.1 Základní terminologie

– historické souvislosti

prof. Ing. Bohumil Šulc, CSc.

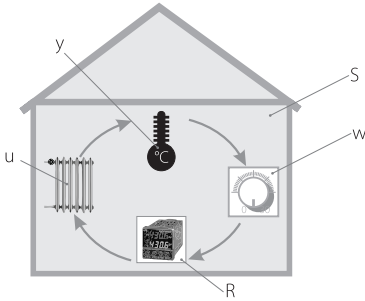
Člověk od pradávna hledá způsoby, jak zajistit svoje potřeby co možná nejefektivněji, to je s vynaložením co možná nejmenšího úsilí. K ulehčení nebo náhradě lidské práce různými nástroji, stroji a zařízeními, k jejichž výrobě a provozu je zapotřebí energie, a tudíž je třeba zajistit její řízený přísun. Tento v své podstatě regulační úkol byl zvládnán intuitivně už ve starověku. Starověké zavlažování a rozvod vody představovaly pozoruhodná díla lidské dovednosti té doby, které později překonávala snad jenom řemeslná zručnost středověkých hodinářů. Způsob, jak nápaditě dokázali kompenzovat vliv teplotních a polohových změn na mechanické oscilátory v časoměrných zařízeních kvůli stabilizaci frekvence kmitů nutné pro zabezpečení přesnosti měření času, je příkladem aplikace regulace, aniž někdo tento termín v té době použil nebo si uvědomoval obecné principy její funkce, jako je např. zpětná vazba, zasahování do látkového nebo energetického toku, zpracování informace atd.

I po výrazném prohloubení znalostí o fyzikální podstatě řady jevů charakteristickém pro období průmyslové revoluce **zůstává realizace regulace jako integrální součásti konstrukce těchto zařízení dlouhou dobu dominujícím principem, který využívá výlučně intuici v kombinaci s empirií.** Teprve ve 20. století, zejména v jeho druhé polovině, nároky na řízení a zajištění bezproblémového provozu komplikovaných zařízení nešlo už opírat o empiricky realizované začlenění regulace jako integrální součásti daného zařízení.

Princip funkce regulačního obvodu byl již znám a zůstal dodnes platný. Je-li požadováno, aby z provozních nebo technických důvodů v nějakém zařízení určitá pro funkci zařízení důležitá veličina, která se nežádoucím způsobem mění v důsledku neovlivnitelně se měnících okolních podmínek, byla automaticky udržována na požadované hodnotě, musíme mít možnost jiným ovlivnitelným a technicky proveditelným působením na objekt nežádoucí vlivy vykompenzovat, případně dosáhnout požadované změny oné důležité veličiny. Protože tento princip funkce regulace je u všech obvodů stejný, a navíc se začalo používat k jejich realizaci univerzálně fungující soupravy regulačních prvků, zavedlo se stejné pojmenování zmíněných veličin. K jejich označení se začaly používat dohodnuté symboly bez ohledu na jejich skutečnou fyzikální podstatu.

Veličina, kvůli jejímuž udržování na požadované hodnotě regulační obvod vlastně vytváříme, se nazývá **regulovaná veličina** $y(t)$. Tuto veličinu mění a nežádoucím způsobem ovlivňují veličiny, které se označují jako **poruchové veličiny** symbolicky značené $d_1(t)$, $d_2(t)$... Aby bylo možné kompenzovat jejich nežádoucí vliv na hodnoty regulované veličiny, musí být k dispozici technicky realizovatelná možnost jak zasahovat do procesů probíhajících uvnitř daného zařízení. Tyto tzv. **akční zásahy** jsou spojeny se změnami hodnot veličiny, která určuje žádoucí změny regulované veličiny a nazývá se **akční veličina** $u(t)$.

Technicky je třeba zajistit **automatické generování akčních zásahů** vhodné velikosti a časového průběhu. To je úkolem regulátoru, který tuto činnost provádí na základě přenosu informací, které jsou mu dodávány prostřednictvím signálů poskytovaných z přístrojového dovybavení daného zařízení, u něhož se má regulovaná veličina udržovat na předepsané hodnotě. Toto dovybavení (**regulátor v širším slova smyslu**) představují v principu tři typy kom-



Obr. 6.1 Regulace teploty v místnosti

ponent, jejichž funkci vystihuje z němčiny přeložené označení *senzorika, procesorika a aktorika*.

Senzorika představuje soubor technických prvků, prostřednictvím nichž se zajišťuje získání informace o aktuální hodnotě měřené veličiny. Různé typy snímačů a principy jejich funkce byly představeny v prvním díle v kapitole 3. Jestliže se jedná o snímače regulované veličiny, je většinou naměřená hodnota spojena s převodem na vhodný (unifikovaný) signál, který umožňuje přenos informací do druhé, procesní komponenty. V ní je signál ze snímače dále zpracován (např. filtrován), ale hlavně porovnán s jiným signálem nesoucím informaci o žádané hodnotě regulované veličiny.

Veličina, prostřednictvím níž je tato informace předávána, se nazývá **řídící veličina** $w(t)$ (nověji se také objevuje označení *žádaná veličina*). Výsledek porovnání (získaný vlastně odečtením hodnot obou signálů) je tzv. **regulační odchylka** $e(t)$. Regulační odchylka je vstupní klíčovou informací pro zpracovatelskou část interpretovatelnou jako **regulátor v užším slova smyslu**, kde se prostřednictvím určitého mechanismu přiřazení tzv. **regulačního algoritmu** (označovaného též regulační funkce, regulační zákon) přepočte na akční zásah patřičné velikosti a orientace, který charakterizuje svými hodnotami **akční veličina** $u(t)$.

Změny hodnot akční veličiny generované regulátorem jsou obvykle změny v hodnotách unifikovaného signálu, které je nutné převést na změny veličiny určující proveditelný zásah do látkového nebo energetického toku. Tento převod a realizaci zásahů zajišťuje třetí komponenta, jejíž označení aktorika je odvozeno z označení **aktuátor**, pro který je v češtině spíše používán termín **akční člen**, případně **pohon**. Ten slouží k manipulaci např. s nastavením otevření regulačních ventilů, které představují nejběžnější způsob jak realizovat akční zásahy do látkového nebo energetického toku. Prostřednictvím akční veličiny a dopadu jejich změn na regulovanou veličinu je uzavřen přenos informace do smyčky. Proto se hovoří o **uzavřeném regulačním smyčce** využívající **zápornou zpětnou vazbu** (při nežádoucím nárůstu regulované veličiny musí být generován akční zásah způsobující její pokles).

Uzavřený regulační obvod realizuje nejenom udržování regulované veličiny, ale zároveň umožňuje realizovat její požadované změny, a to i za přítomnosti poruch. Tím se liší od funkce **řízení v otevřené smyčce**, která nevyužívá zápornou zpětnou vazbu a je použitelné tehdy, pokud nežádoucí vlivy z okolí mají zanedbatelný dopad. Označením **uzavřený regulační obvod** se proto někdy zdůrazňuje skutečnost, že smyčka není rozpojena. Konkretizaci uvedených pojmů ukážeme na příkladu.

Příklad 6.1 Prvky a veličiny regulačního obvodu z pohledu realizace vytápění místností domku

Příklady konkrétního použití uvedených pojmů provedeme popisem možností, jak udržovat tepelnou pohodu v určité místnosti např. rodinného domku. Neuvažujeme použití klimatizační jednotky, tzn. že se omezíme na vytápění, tj. dodávání tepla na pokrytí tepelných ztrát do okolí. Ztráty do okolí $Q_2(t)$ jsou závislé na několika faktorech, jako je např. kolísání venkovní teploty, větrání, působení větru,

slunce atp. Stejně tak nelze vždy zajistit přesné pokrytí potřebným příkonem $Q_1(t)$ ze zdroje tepla. Zdroj v závislosti na svém technickém provedení může sám být ovlivňován dalšími náhodnými jevy (např. změny výhřevnosti, spalovacího poměru atd.). Všechny tyto vlivy patří do kategorie nežádoucího působení, které se odráží na změnách teploty T uvnitř místnosti v čase a dá se popsat např. rovnicí tepelné bilance $T'(t) = (Q_1(t) - Q_2(t))/C$, kde C je tepelná kapacita místnosti vyjadřující míru možnosti v místnosti akumulovat teplo.

Teplota T je na rozdíl od tepelných toků dobře změřitelný údaj poskytující relevantní informaci o stavu vyrovnanosti tepelné bilance. Navíc je hlavním faktorem v hodnocení tepelné pohody. Proto o jejím výběru za regulovanou veličinu, tj. za veličinu, na jejíž průběh jsou kladeny určité požadavky zajišťované regulací, není pochyb. V souladu se zavedenou zobecňující symbolikou je regulovaná veličina na obr. 6.1 označena jako $y(t)$. Mezi všemi veličinami, které charakterizují ovlivňování teploty – regulované veličiny rušivými okolními vlivy musí být k dispozici jedna charakterizující cílevědomě prováděné změny v topném příkonu. Její specifikace závisí na technickém řešení zdroje. U klasického řešení teplovodního samotížného etážového vytápění s kotlem na tuhá paliva není mnoho možností, jak tyto zásahy realizovat. K udržení vyrovnané teploty se využívá přirozené a výrazné tepelné setrvačnosti zdí místnosti, radiátorů a cirkulující vody. Pokud se v takové realizaci vytápění vůbec využívají nějaké automatizační prostředky, jsou použity doplňkové (např. termostatické regulační ventily na radiátorech) nebo plní funkci ručního ovládní, jako je ovlivňování teploty topné vody variabilním nastavením přísunu spalovacího vzduchu, případně paliva spojeného s pohybem roštu.

Mnohem větší možnosti poskytují lokálně regulovatelné zdroje, jako jsou např. elektrické přímotopy s nastavitelnou hodnotou příkonu. Veličinu, jejímiž změnami lze technicky dobře měnit tepelný příkon, nazýváme akční veličinou. V regulačně-technické interpretaci ji obecně označujeme symbolem $u(t)$. K jejím změnám dochází, kdykoliv chceme dosáhnout jiné hodnoty teploty – regulované veličiny nebo je zapotřebí kompenzovat vliv dopadu poruch, tj. změn poruchových veličin; v našem příkladu zmíněné výkyvy venkovní teploty, větrání, osvit atd. Na rozdíl od běžného pojetí neoznačujeme poruchou v regulační technice ztrátu funkčních vlastností, ale běžný vliv změn podmínek působení z vnějšího okolí, který vyvolá nežádoucí dynamickou reakci na regulované veličině. Typickou poruchovou veličinou, dokonce měřitelnou, je v našem příkladu venkovní teplota. Neměřitelnými, resp. obtížně zjistitelnými, jsou dopady osvětlení místnosti sluncem, míra větrání místnosti např. otevřením dveří, oken a přirozenou aerací. Generování změn akční veličiny provádí regulátor na základě vyhodnocení regulační odchylky $e(t)$, která je dána rozdílem mezi zadanou požadovanou hodnotou $w(t)$ regulované veličiny. Žádanou hodnotu regulované veličiny lze zadávat regulátoru manuálně (např. přímo na termostatu) nebo prostřednictvím vzdáleného přenosu informací. Tím lze vlastně celý proces vytápění řídit, a proto se pro označení veličiny, kterou se informace o požadovaných hodnotách zprostředkovává, používá také název řídicí veličina.

Technické prostředky, kterými se vytváří popsaná funkce regulačního obvodu, mohou být velmi různorodé. V principu však zahrnují vždy nějakou formu měření teploty – obecně senzorem teploty. Současně musí být obvod vybaven možností realizovat akční zásahy, tj. změny topného příkonu. Obecně tuto činnost realizuje akční člen na základě informací obdržených z regulátoru teploty. V zmíněném příkladu realizace přímotopy je nejpravděpodobnější spojení těchto prostředků do jedné jednotky dvoupohodového regulátoru prostorového termostatu, velmi často vybavené možností programovat různé topné režimy na každou hodinu a den týdenního cyklu. V obr. 6.1 jsou vyznačeny písmeny S a R dvě základní komponenty regulačního obvodu – (regulovaná) soustava S a regulátor R . Regulovanou soustavou je místnost, v níž se reguluje teplota, často uvažovaná včetně prostředků pro změnění regulované veličiny a dodávky tepla. V regulátoru R v závislosti na použitém technickém řešení se většinou realizuje porovnání regulované veličiny s žádanou hodnotou, tedy zjištění regulační odchylky, a zejména přiřazení hodnot akční veličiny ke zjištěné regulační odchylce.

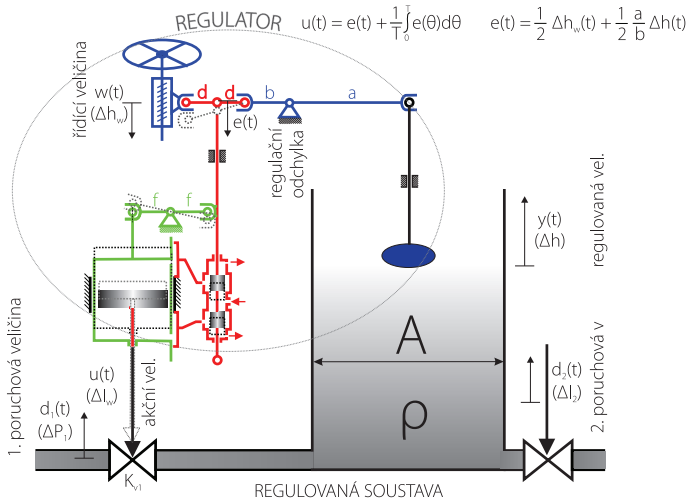
Se složitostí zařízení a v nich probíhajících procesů rostly také nároky na funkci vlastní regulace. Nestačilo zajistit funkci automatického udržování, bylo třeba garantovat její kvalitu, tj. co nejrychlejší dosažení a udržení požadované hodnoty regulované veličiny, ale především **stabilitu regulace**. Nestabilita regulace z provozního pohledu znamená, že nedojde k ustálení regulované veličiny na žádané hodnotě, nýbrž k nekontrolovatelnému růstu jejich odchylek od požadované hodnoty. Stabilita je absolutně prioritní, ve všech provozních situacích vyžadovaný požadavek, který je třeba garantovat před spuštěním celého zařízení, protože může vést k jeho destrukci. Kromě několika klíčových zásad, které byly zjištěny empiricky, rozhodující roli při návrhu regulačního obvodu má **teorie regulace opírající se o modelovou představu o funkci regulačního obvodu**. V této modelové představě se pracuje se zjednodušenou a idealizovanou formulací dynamických vztahů mezi **vstupy** a **výstupy** všech částí regulačního obvodu. Jako **vstupy** jsou brány ty proměnné, které reprezentují fyzikální veličiny způsobující změny jiných na nich závislých veličin – **výstupů**. Vstupy jsou ovlivňujícími faktory (tedy aktivní), zatímco výstupy jsou ty ovlivňované (tedy pasivní), což znamená, že *výstup nikdy nemůže měnit vstup*. Nejčastější matematická forma této systémové představy je nazývána **matematický model**. Ukázka tvorby matematického modelu a jeho využití budou uvedeny v dalším textu spolu s matematickými a experimentálními metodami syntézy a analýzy funkce regulačního obvodu.

Abstraktní popis funkce regulačního obvodu (matematickými) modely přinesl ohromný rozvoj teorie, jejíž největší přínos spočívá v možnosti predikovat chování regulačního obvodu, dříve než je obvod vůbec realizován. Tím se otevřela cesta k řízení velmi složitých komplexů a zvládnutí extrémně náročných regulačních úkolů. Zároveň však rozmach teorie přinesl značné vzdálení od reálných potřeb praxe, ke kterému přispívá i nejednoznačná terminologie. Na příklad termínem regulační obvod není rozlišeno, zda je míněna jeho reálná technická podoba nebo jeho abstraktní představa o této realitě. Převzetím stejného regulačně-technického pojmenování do abstraktních formulací představ teorie se často stává, že se v teorii hovoří o různých vlastnostech, parametrech, charakteristikách tak, jakoby to byly atributy reálného objektu a přitom jsou to záležitosti spojené výlučně s modelovou (abstraktní) představou o tomto objektu. Ta je vždy zjednodušená, idealizovaná a proto závěry teorie mají omezenou podmíněnou platnost, na což se zapomíná.

Aby se zmenšilo nebezpečí takové desinterpretace, pokusíme se v tomto textu reálný objekt, tj. zařízení, v němž probíhají procesy související s udržováním regulované veličiny, odlišovat pojmem **regulovaná soustava** od její abstraktní, modelové představy, pro niž budeme výlučně používat termín **(abstraktní, dynamický) systém**. Problém tohoto způsobu rozlišování je ve slově systém, které je až nadbytečně používáno pro něco, co je složitě provázáno.

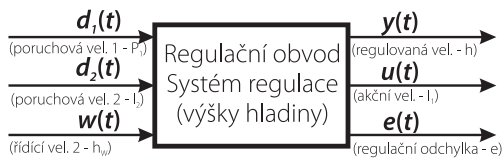
Jedna z nejjednodušších a nejvýstižnějších definic systému charakterizuje systém jako množinu prvků a vazeb mezi nimi, které společně určují vlastnosti celku. Většina technických zařízení je složena z částí vzájemně pospojovaných a ovlivňujících se ve své funkci vazbami fyzikální nebo chemické povahy. Podle uvedené obecné definice systému je i takovéto zařízení systémem.

Toto **technické pojetí systému** se hojně používá i v situaci, kdy je vlastně míněn abstraktní systém. U **abstraktního pojetí systému** jeho prvky tvoří příznaky abstraktní povahy – obvykle představované symboly proměnných přiřazených idealizovaným veličinám a vzájemné vazby mezi nimi jsou charakterizovány grafickými, tabulkovými nebo nejčastěji matematickými prostředky – rovnicemi.



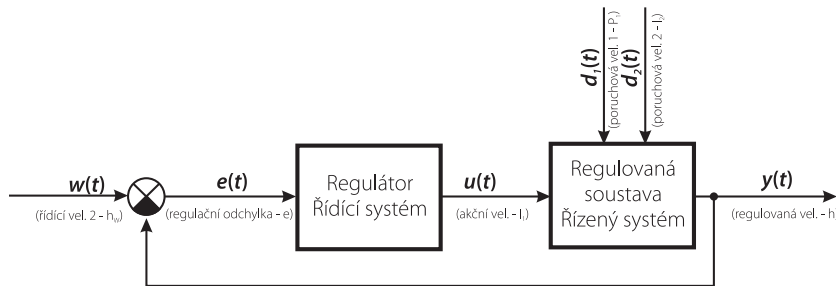
Obr. 6.2 Proporcionálně-integrační regulace výšky hladiny v průtočném zásobníku

Protože znázornění funkce regulačního obvodu tak, jak jej reprezentuje funkční schéma regulace výšky hladiny na obr. 6.2, je náročné a proveditelné pouze v několika specifických realizacích, mnohem častější a univerzálnější je **systémové zobrazení** funkce regulačního obvodu. V interpretaci regulačního obvodu jako (abstraktního) systému je zcela potlačena technická stránka realizace a naopak jsou zdůrazněny aspekty důležité především z hlediska regulace. Jedná se o zvýraznění role veličin reprezentovaných použitými proměnnými, kterou mají z regulačního hlediska. Zásadně se u systému zřetelně rozlišují vstupy a výstupy. Odlišení fyzikální podstaty veličin symboly bývá potlačeno. Způsob rozlišení vstupů od výstupů je různý. V matematickém modelu je to pozice v rovnici (*výstupy jsou nalevo, vstupy napravo*). U přenosu je to rozlišení dáno způsobem definice poměru,



podle které se jedná o **poměr obrazu výstupu (čitatel) k obrazu vstupu (jmenovatel)**. Nejzřetelněji je toto rozlišení realizováno v blokovém schématu, kde vstupy jsou reprezentovány spojnícemi se šipkami mířícími „do“ bloku, zatímco výstupy mají šipkami vyznačenou orientaci „ven“ z bloku.

Obr. 6.3 Blok reprezentující regulační obvod jako celek



Obr. 6.4 Blokové schéma regulačního obvodu

obvody nebylo vůbec možné realizovat nebo provozovat. Jako ilustrativní ukáзка může sloužit bitevník Harrier (obr. 6.6) z kategorie letadel VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*), tj. s kolmým startem a přistáním. Porozuměním teoretických principů regulace lze také účinně zvládat a odstraňovat případné neuspokojivé výsledky činnosti již realizovaných regulačních obvodů.

Prioritním nástrojem teoretické analýzy a syntézy regulačního obvodu je systémový popis jeho chování v čase, který umožňuje zkoumání jeho časových reakcí, tzv. **dynamiky systému**. Zatímco realizovaný regulátor se víceméně dynamicky chová tak, jak určuje regulační algoritmus, dynamické modely regulované soustavy je obvykle třeba odvodit – **identifikovat**. Pro systémovou interpretaci obvodu a jeho komponent (obr. 6.4) je potřeba mít nástroje pro zjišťování reakcí výstupu na vstupní změny. Pro zdůraznění schopnosti, že použitá formulace systému umožňuje tyto odezvy zjišťovat, budeme používat označení **dynamický systém**.

Obecně *dynamický systém nemusí reprezentovat regulovanou soustavu nebo regulátor či jejich spojení do obvodu*. Dynamické vlastnosti je třeba poznat i u zařízení, která nejsou bezprostředně předmětem regulace, ale jsou spojena s nároky na rychlost prováděných operací, případně časovou návaznost a koordinaci. Metody a prostředky, které budou ukázány v dalších odstavcích, mají proto širší obor uplatnění.

6.2 Dynamický systém, nástroje a metody jeho analýzy

doc. Ing. Josef Janeček, CSc.

Svět kolem nás se téměř výhradně skládá z celé řady objektů, které mají svoji dynamiku. Reagují na podněty (buzení) svou reakcí danou jejich fyzikální podstatou, strukturou a vnitřními souvislostmi. Mohou to být neživé i živé objekty. Svou dynamiku mají fyzikální, chemické, biologické, sociální i ekonomické celky.

Dynamickým systémem rozumíme abstraktní, zpravidla matematický model, který popisuje s přijatelnou přesností chování reálného objektu z hlediska jeho reakce na vnější podněty. Nejčastěji, kvůli jednoduchosti popisu, volíme dominantní závislost jediné veličiny, která nás zajímá nebo ji chceme ovlivňovat, na jediné budící veličině, kterou můžeme měnit. Ostatní podněty, které nelze ovlivnit, označujeme jako **poruchy**. Mluvíme pak o systémech s jednou vstupní (budící) a jednou výstupní (vybuzenou) veličinou. Takovéto systémy často označujeme zkratkou SISO (z anglického *Single Input Single Output*) na rozdíl od složitějších modelů MIMO (*Multi Input Multi Output*), které popisují komplikovanější vazby mezi více vstupními a více výstupními veličinami.

V dalším výkladu se budeme zabývat pouze systémy SISO, běžně používanými způsoby práce s nimi, jejich teoretickým popisem a metodami analýzy jejich chování.

6.2.1 Popis dynamického systému

Budeme-li podrobněji zkoumat reakci reálného objektu na jeho buzení, brzy narazíme na nutnost vyjádřit vzájemný vztah mezi oběma fyzikálními veličinami matematickými prostředky. Fyzikální veličina, jejíž změna vyvolává reakci, i veličina, která na tuto změnu reaguje, jsou veličiny, které se v čase obecně mění. Ve většině případů lze tuto závislost vyjádřit tzv. **pohybovou rovnicí**, nejčastěji rovnicí diferenciální, ve které se vyskytují kromě budící a vybuzené funkce i jejich rychlosti, zrychlení atd. (jejich časové derivace).

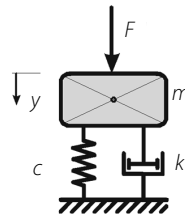
Příklad 6.2 Matematický popis chování zjednodušeného modelu pracovní sedačky řidiče.

Anatomické sedadlo řidiče musí splňovat náročné požadavky, které jsou spojeny s ohledy na jeho zdraví, pohodlí, komfort a bezpečí.

Při zkoumání dynamického chování pracovní sedačky řidiče budeme vycházet z jejího zjednodušeného mechanického modelu. Jedná se v podstatě o pohyb hmoty (zahrnující hmotnost řidiče, sedačky a jejího mechanismu) na tlumeném pružném závěsu.

c ... koeficient tuhosti pružiny [N/m]

k ... koeficient tlumení tlumiče [Ns/m]



Obr. 6.7 Sedačka řidiče a její mechanický model

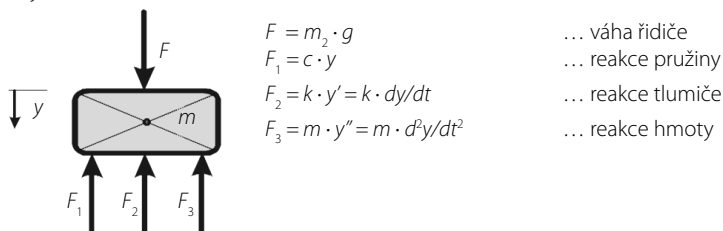
Poloha sedačky je vztažena k ustálenému stavu odpovídajícímu deformaci pružiny vyvolané samotnou její vahou bez vnějšího zatížení. Váhu řidiče lze považovat za vnější sílu F [N] působící na sedačku.

Uvažujme konkrétní hodnoty:

$$\left. \begin{array}{l} m_1 = 20 \text{ kg} \quad \dots \text{ hmotnost sedačky} \\ m_2 = 80 \text{ kg} \quad \dots \text{ hmotnost řidiče} \\ g \approx 10 \text{ m/s}^2 \quad \dots \text{ gravitační zrychlení} \\ c = 8 \cdot 10^3 \text{ N/m} \\ k = 2,4 \cdot 10^3 \text{ Ns/m} \end{array} \right\} m = m_1 + m_2 = 20 + 80 = 100 \text{ kg}$$

$$F = m_2 \cdot g = 80 \cdot 10 = 800 \text{ N}, \quad [\text{N} = \text{kgm/s}^2]$$

Odvození pohybové rovnice je založené na *d'Alembertově principu* rovnováhy sil působících na hmotu m . Rovnováha sil samozřejmě platí v každém okamžiku pro všechny v čase se měnící síly $F = F(t)$, $F_1 = F_1(t)$, $F_2 = F_2(t)$, $F_3 = F_3(t)$. Samozřejmě, i poloha sedačky $y = y(t)$ se s časem mění, vyjadřuje reakci sedačky na vnější buzení.



Obr. 6.8 Princip rovnováhy sil

Vycházíme ze zjednodušené představy hmotnosti m soustředěné do jediného bodu, ve kterém je předpokládané působíště i všech uvedených sil.

$$F_3 + F_2 + F_1 = F$$

$$m \cdot y'' + k \cdot y' + c \cdot y = F \quad \dots \text{ pohybová rovnice}$$

$$y = y(t), \quad y' = y'(t), \quad y'' = y''(t), \quad F = F(t)$$

Získanou pohybovou rovnicí je diferenciální rovnice, jejíž členy mají jasný fyzikální význam:

F ... silové působení váhy řidiče na mechanický systém sedačky [N]

y ... poloha sedačky [m]

y' ... rychlost pohybu sedačky [m/s]

y'' ... zrychlení pohybu sedačky [m/s²]

Funkce F , y , y' , y'' jsou obecně funkcemi času (s časem t se jejich hodnoty mění).

Pro konkrétní zadané hodnoty nabývá rovnice tvar:

$$100 y'' + 2400 y' + 8000 y = F$$



Předpokládejme například, že v ustáleném klidovém stavu sedačky (nulové počáteční podmínky: $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$) řidič náhle dosedne, a vyvolá tak její pohyb. Funkce, která je řešením diferenciální rovnice za těchto podmínek (a s tímto buzením), popisuje časový průběh vyvolaného pohybu.



Poznámka: Povšimněme si, že zavedené fyzikální veličiny mají nejen svou velikost a směr, ale i směr svého vývoje (tzv. smysl, vyjádřený graficky šipkou). Získaná pohybová rovnice je poplatná i tomuto zvolenému smyslu. V tomto případě bude řešení rovnice $y(t)$ kladné, sedačka se však bude pohybovat směrem dolů.

V předcházejícím příkladu je pohybovou rovnicí **lineární** diferenciální rovnice **druhého řádu** (nejvyšší časová derivace vyskytující se v rovnici). Lineární se nazývá proto, že její řešení má lineární charakter v tom smyslu, že bude-li buzení poloviční (resp. n -násobné), bude její řešení také přesně poloviční (resp. n -násobné). Důsledkem je i zajímavá okolnost, že můžeme-li buzení této rovnice rozdělit na dvě nebo více částí (třeba i časově posunutých), lze vyšetřovat reakci na každou zvlášť a dílčí reakce sečíst (tzv. **princip superpozice**).

Lineární dynamický systém s konstantními koeficienty

V dalším textu se omezíme pouze na analýzu lineárních dynamických systémů, které v čase nemění svou dynamiku (jejich koeficienty jsou v čase konstantní). Jsou popsány diferenciálními rovnicemi typu: