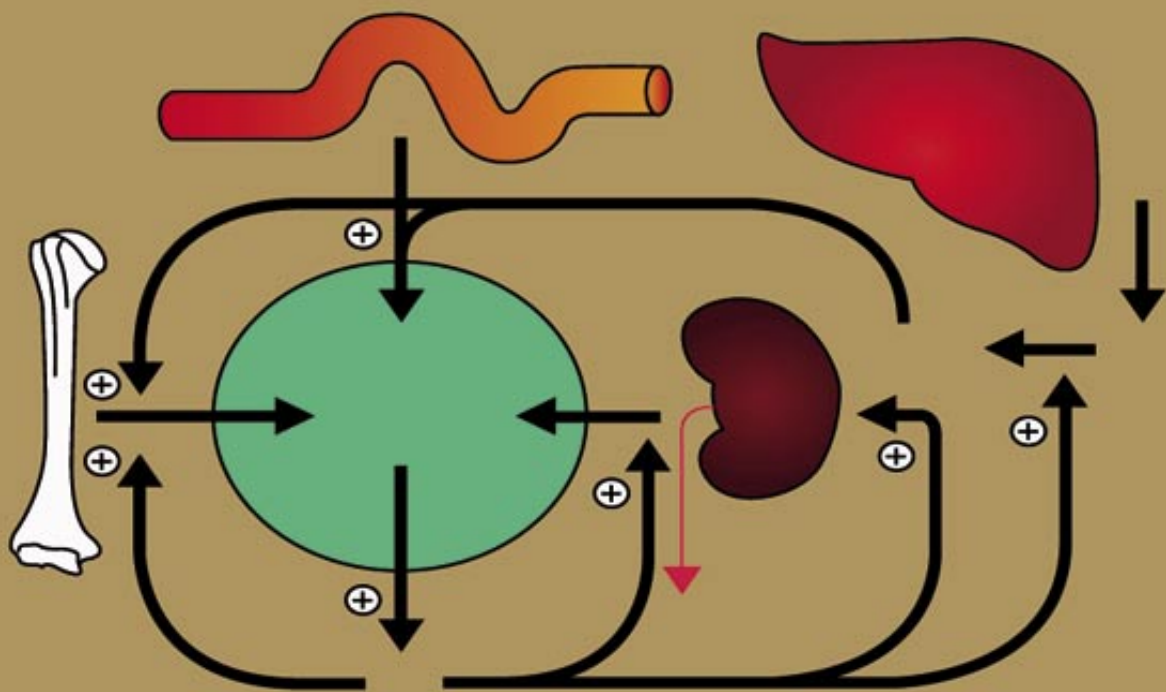


Otomar Kittnar, Mikuláš Mlček

Atlas fyziologických regulací



Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude **trestně stíháno**.

Používání elektronické verze knihy je umožněno jen osobě, která ji legálně nabyla a jen pro její osobní a vnitřní potřeby v rozsahu stanoveném autorským zákonem. Elektronická kniha je datový soubor, který lze užívat pouze v takové formě, v jaké jej lze stáhnout s portálu. Jakékoliv neoprávněné užití elektronické knihy nebo její části, spočívající např. v kopírování, úpravách, prodeji, pronajímání, půjčování, sdělování veřejnosti nebo jakémkoliv druhu obchodování nebo neobchodního šíření je zakázáno! Zejména je zakázána jakákoliv konverze datového souboru nebo extrakce části nebo celého textu, umístování textu na servery, ze kterých je možno tento soubor dále stahovat, přitom není rozhodující, kdo takovéto sdílení umožnil. Je zakázáno sdělování údajů o uživatelském účtu jiným osobám, zasahování do technických prostředků, které chrání elektronickou knihu, případně omezují rozsah jejího užití. Uživatel také není oprávněn jakkoliv testovat, zkoušet či obcházet technické zabezpečení elektronické knihy.





Copyright © Grada Publishing, a.s.

Prof. MUDr. Otomar Kittnar, CSc., MBA, MUDr. Mikuláš Mlček, Ph.D.

ATLAS FYZIOLOGICKÝCH REGULACÍ

Editor:

Prof. MUDr. Otomar Kittnar, CSc., MBA

Autoři:

Prof. MUDr. Otomar Kittnar, CSc., MBA

MUDr. Mikuláš Mlček, Ph.D.

Recenze:

Prof. MUDr. Lubor Vokrouhlický, DrSc.

Doc. MUDr. Jan Mareš, CSc.

© Grada Publishing, a.s., 2009

Obrázek na obálce Miloslava Krédlová

Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2009

© Otomar Kittnar – schémata

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 3790. publikaci

Odpovědný redaktor Mgr. Jan Lomíček

Sazba a zlom Martin Hanslian

Počet stran 320

1. vydání, Praha 2009

Vytiskla tiskárna FINIDR, s.r.o.

Lipová č.p. 1965, Český Těšín

Názvy produktů, firem apod. použité v této knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků, což není zvláštním způsobem vyznačeno.

Postupy a příklady v knize, rovněž tak informace o lécích, jejich formách, dávkování a aplikaci jsou sestaveny s nejlepším vědomím autorů. Z jejich praktického uplatnění ale nevyplývají pro autory ani pro nakladatelství žádné právní důsledky.

Všechna práva vyhrazena. Tato kniha ani její část nesmějí být žádným způsobem reprodukovány, ukládány či rozšiřovány bez písemného souhlasu nakladatelství.

ISBN 978-80-247-2722-6 (tištěná verze)

ISBN 978-80-247-7027-7 (elektronická verze ve formátu PDF)

© Grada Publishing, a.s. 2011

Obsah

Předmluva	7
1 Principy regulací v živých systémech	9
1.1 Systémy	9
1.2 Řízení dynamických systémů	19
1.3 Homeostatické regulační mechanismy	26
2 Obecné fyziologické principy řízení celulárních dějů	32
2.1 Řízení proteosyntézy	33
2.2 Řízení enzymově zprostředkovaných reakcí	35
2.3 Řízení transportu látek přes buněčnou membránu	38
2.4 Přenos informace v řídicích procesech	42
3 Obecná fyziologie nervstva a svalstva	46
3.1 Klidový membránový potenciál	46
3.2 Akční potenciál	48
3.3 Přenos signálu na synapsích	53
3.4 Svalová tkáň	59
4 Fyziologie krve	63
4.1 Erytrocyty	64
4.2 Leukocyty	67
5 Fyziologie imunitního systému	73
6 Fyziologie oběhu krve	79
6.1 Řízení srdeční činnosti	79
6.2 Řízení systémové cirkulace	83
6.3 Místní regulační mechanismy	91
6.4 Celkové regulační mechanismy	92
6.5 Vzájemný vztah celkových a místních regulačních mechanismů	113
7 Fyziologie dýchání	117
7.1 Řízení proudu vzduchu během vdechu a výdechu	117
7.2 Perfuze plic a transport dýchacích plynů krví	122
7.3 Řízení respirace	132
8 Fyziologie trávení a vstřebávání	139
8.1 Hlavní regulační mechanismy	141
8.2 Fáze řízení činnosti zažívacího traktu	146
8.3 Řízení jednotlivých pochodů v GIT	157

9	Řízení metabolických pochodů	167
9.1	Období zpracování přijaté potravy	169
9.2	Období spotřeby zásob	172
9.3	Energetická bilance organismu	177
10	Termoregulace	179
11	Řízení funkcí ledvin	186
11.1	Řízení glomerulární filtrace	187
11.2	Řízení tubulární resorpce	195
11.3	Regulace osmolarity tělesných tekutin	208
11.4	Regulace objemu extracelulární tekutiny	213
11.5	Regulace stálého iontového složení extracelulární tekutiny	217
11.6	Mikce	219
12	Udržování acidobazické rovnováhy	222
13	Hormonální řídicí mechanismy	227
13.1	Řízení sekreční činnosti endokrinní buňky	230
13.2	Řídicí systémy hypotalamo-adenohypofyzární osy	232
13.3	Systémy řízené plazmatickou koncentrací regulované látky	242
14	Řízení reprodukčních funkcí	262
14.1	Řízení mužského reprodukčního systému	262
14.2	Řízení ženského reprodukčního systému	264
14.3	Regulační procesy v průběhu těhotenství a porodu	270
14.4	Řízení laktace	276
14.5	Ontogeneze reprodukčních funkcí	277
15	Účast nervového systému v řídicích funkcích	282
15.1	Příjem informací z periferie	283
15.2	Řízení pohybové aktivity těla	289
15.3	Vegetativní nervový systém	295
15.4	Vyšší funkce CNS	300
	Literatura	307
	Seznam zkratk	308
	Rejstřík	309

Předmluva

Fyziologie člověka, jako věda zabývající se funkcemi lidského organismu, vychází jednak z přirozené potřeby každého myslícího člověka pochopit alespoň základně pochody ve vlastním těle a jednak z potřeby přírodních věd popsat co nejpřesněji podstatu pochodů, které zajišťují život jedince. Definovat fyziologii jako vědní obor je relativně snadné, obtížnější už je ji poznat a porozumět jí. Pokud pojmem fyziologii jako jednu z metod poznání v biomedicínských vědách, pak ji chápeme jako vysvětlení biochemických, fyzikálních a biologických principů jednotlivých dějů v organismu. Popis těchto pochodů na celulární a molekulární úrovni sice usnadní pochopení jejich základní podstaty, často ale vede ke ztrátě vnímání jejich úlohy z „nadhledu“ celého organismu.

Úkolem této knihy je pomoci čtenáři vytvořit si právě takový nadhled, aby porozuměl, jak je možné, že lidský organismus dokáže přežít i za krajně extrémních podmínek: od mrazů Grónska po vedra Rovnickové Guineje, od sucha pouští po absolutní vlhkost deštných pralesů, od modrého světla horských masivů po zelenou temnotu džungle, od pustých lesů po centra velkoměst. Za to všechno je odpovědná schopnost organismu řídit vlastní vnitřní pochody tak, aby se zachovaly uvnitř těla pokud možno optimální podmínky pro život jednotlivých buněk, tkání a orgánů.

Naše dlouholetá zkušenost z výuky lékařské fyziologie potvrzuje, že popisná znalost faktů a fyziologických pochodů ještě nemusí znamenat pochopení mechanismů, které se za těmito fakty a pochody skrývají. Fakta tak často zůstávají v paměti studentů vytržena z kontextu příslušného fyziologického pochodu a v chápání pochodu často chybí jeho kauzalita. Fakt, že zvýšený příjem vody vyvolá polyurii, se tak stává jakýmsi „jednou daným“ axiomem a vysvětlení pochodu, který za tímto faktem stojí, je obvykle zjednodušeno do podivuhodně mystické personifikace: „ledviny vytvářejí více moči, aby zbavily organismus nadbytečné vody“. Podobně bychom mohli například tvrdit, že „naše auto cestou z víkendu zrychlilo, abychom stihli televizní zpravodajství“.

Obdobně jako auto nemůže vědět, jak rychle má jet, ani ledviny nejsou dost „inteligentní“, aby věděly, kolik moči mají vyprodukovat. Za celým pochodem je třeba vidět zpětnovazebný mechanismus, který na základě informací o dané situaci vyrovnává vstup a výstup určitého systému v řadě přesně definovatelných fyziologických kroků. Systém tedy není tvořen jen „výkonným“ orgánem nebo tkání, ale musí zahrnovat i skupinu buněk, které dokáží stav systému monitorovat, jinou skupinu buněk, které výsledek monitorování vyhodnotí a dají příslušné tkáni pokyn ke změně její funkce tak, aby se monitorovaná hodnota vrátila k normě.

Bez správného pochopení podstaty takového mechanismu nelze dost dobře chápat ani jeho případné poruchy, ale ani terapeutické zásahy, kterými v případě poruchy chceme obnovit jeho normální fungování. Cílem této knihy tedy není ani přinášet fakta, ani popisovat fyziologické pochody, ale jednoduše vysvětlit základní mechanismy, které jsou za řídicí pochody v našem těle zodpovědné. Dru-

hým hlavním posláním knihy je zdůraznit a ve schématech zakotvit, že jednotlivé děje, které v organismu probíhají, slouží jeho jednotě, udržují stálost jeho vnitřního prostředí a jsou nedílnou součástí integrovaného celku; že existuje významná jednota mezi všemi systémy organismu.

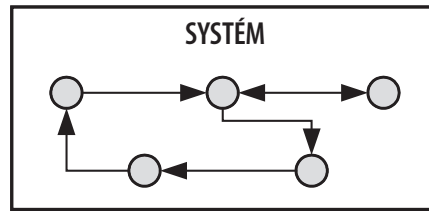
V Praze 31. 8. 2009

Autoři

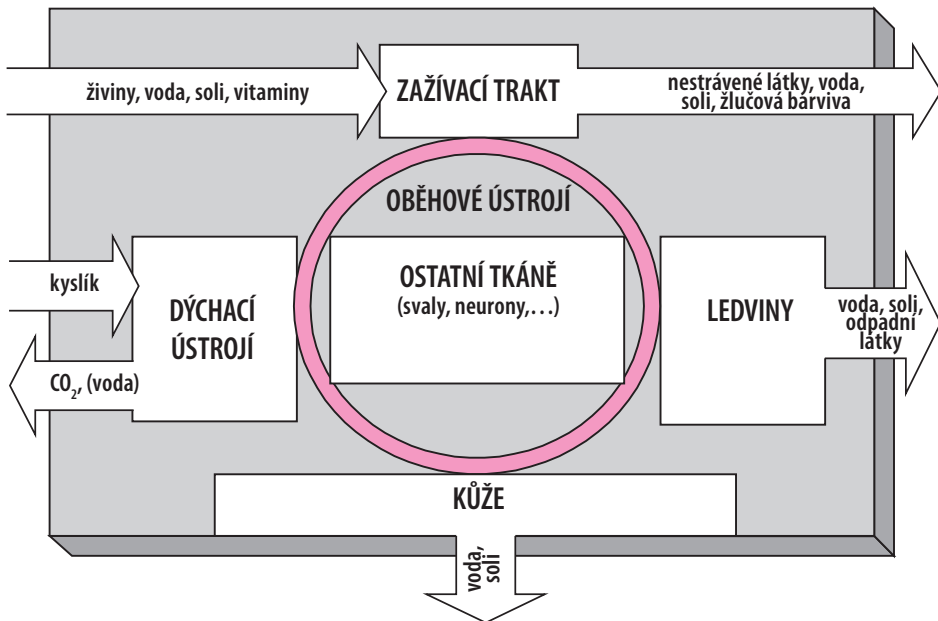
1 Principy regulací v živých systémech

1.1 Systémy

Rychlý rozvoj vědy a potřeba řešení složitých problémů vedly prakticky ve všech oborech k zavedení a rozšíření pojmu systém. Podle obecné definice je systém **množinou prvků, které jsou spolu ve vzájemných vztazích a které tvoří určitý celek**. Systém tedy nezahrnuje pouze své jednodušší skladebné části – prvky, ale také vztahy mezi nimi, kterým říkáme vazby nebo též cizím slovem relace (viz obr. 1.1). Tyto vazby teprve dělají ze skupiny prvků uspořádaný a určitému účelu sloužící celek. Vnitřní uspořádání prvků a vazeb mezi nimi tvoří tzv. **strukturu systému**.



Obr. 1.1 Schematické znázornění systému



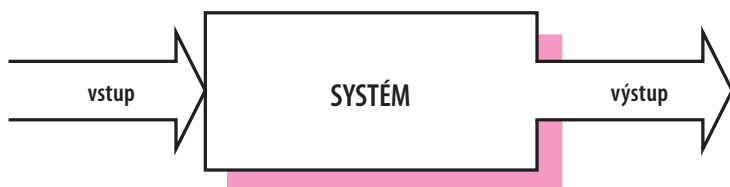
Obr. 1.2 Minimalistické schéma lidského organismu jako otevřeného systému

Při vymezování systému se vždy dopouštíme určitého zjednodušení. Není dost dobře prakticky možné, abychom zkoumali konkrétní reálný objekt najednou v celé jeho komplexnosti. Vybíráme si z něj pouze určitou část, kterou považujeme vzhledem k cílům zkoumání za podstatnou. Jinými slovy: oddělujeme zkoumané vlastnosti a jevy od těch, které nebudeme sledovat. Tímto způsobem oddělujeme systém od jeho okolí, říkáme také, že **systém definujeme (vymezujeme)**. Je třeba zdůraznit význam účelu, pro který systém definujeme. Účel totiž určuje kritéria pro vymezení systému. Podle různých cílů tak můžeme v určitém objektu definovat mnoho různých systémů. Přitom vybereme vždy ty vlastnosti, které jsou z hlediska cílů našeho zkoumání podstatné, a naopak vyloučíme ty, které jsou ze stejného hlediska bezvýznamné. Jak takové zjednodušení může vypadat ve fyziologii, dokumentuje obr. 1.2, který představuje zcela „minimalistické“ vidění lidského těla. Jakkoliv je ovšem tento pohled extrémně zjednodušený, pomůže snadno demonstrovat oddělení zevního a vnitřního prostředí organismu a bariéry, které různé látky musí překonávat při přechodu mezi jednotlivými kompartmenty vodního prostředí těla.

Z mnoha hledisek, podle nichž lze systémy klasifikovat do různých kategorií, uvádíme ta, která jsou v biomedicínských systémech nejdůležitější.

Systémy můžeme rozdělit na **reálné a abstraktní**. Reálný systém je definovaný na reálném objektu, abstraktní systém je systém definovaný např. obrázkem, schématem nebo matematickými vztahy mezi matematickými veličinami. Již uvedený obr. 1.2 je příkladem abstraktního systému, který slouží k pochopení některých dílčích vlastností reálného systému lidského těla.

Systémy můžeme také rozdělit podle jejich interakce s okolím na **otevřené a uzavřené**. U uzavřených systémů nedochází k interakci s okolím, u otevřených systémů dochází k působení okolí na systém a naopak. Vzájemné působení mezi okolím a systémem označujeme jako vstupy a výstupy systému (viz obr. 1.3). Vstup představuje vliv okolí na systém, který může vyvolat odezvu na výstupu nebo měnit jeho funkční vlastnosti (tzv. **stav systému**). Výstup představuje zase vliv, kterým může systém působit na své okolí. Velmi důležitým vztahem je závislost hodnot výstupu na hodnotách vstupu (tzv. **relace V/V = vstup/výstup**), která je určována vlastnostmi systému. Jinými slovy je hodnota výstupní veličiny určována hodnotou vstupní veličiny a okamžitými vlastnostmi (stavem) systému. Když si např. jako systém vymezíme oběhové ústrojí člověka, vstupem může být tělesná zátěž, výstupem hodnota tepové frekvence. Ta bude záviset jednak na veli-



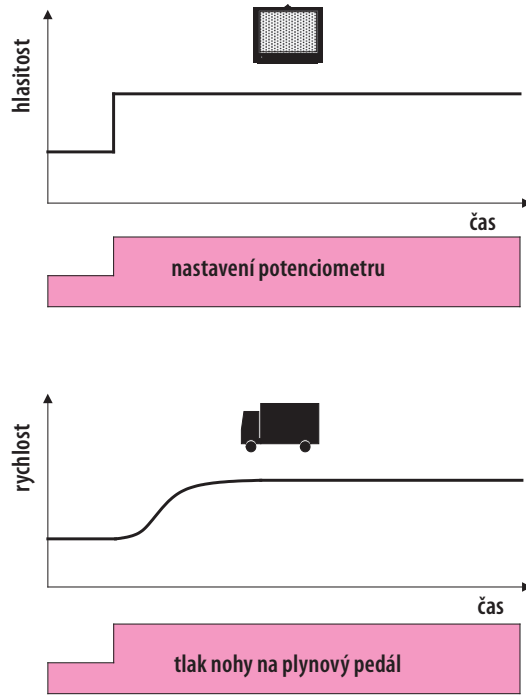
Obr. 1.3 Obecné uspořádání otevřeného systému

kosti a typu zátěže, ale také na trénovanosti, věku, zdravotním stavu a jiných okamžitých vlastnostech objektu. Odpověď systému na změnu hodnoty vstupní veličiny se nazývá **odezva**.

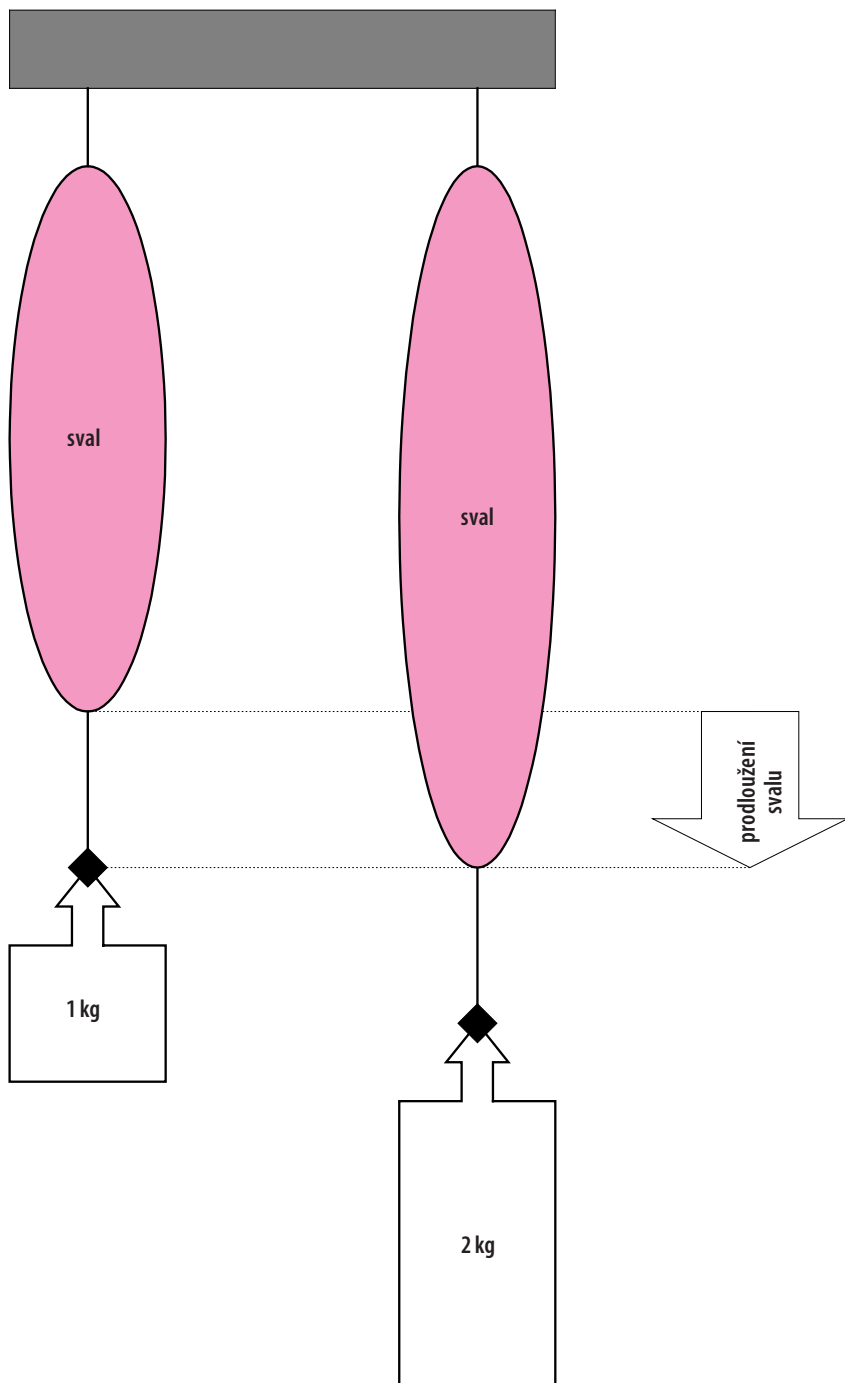
Zvláštním typem vstupní veličiny systému je řídicí veličina. Řídicí veličinou pro systém sinoatriálního uzlu je např. frekvence vzruchů přicházející cestou sympatických nervových vláken. Výstupní veličina systému – tepová frekvence – je pak touto vstupní veličinou (aferencí) řízena. **Systémy**, u kterých je možné identifikovat řídicí veličinu, se nazývají **řízené**. Systémy, které nemají řídicí veličinu, jsou **neřízené** (volné).

Podle toho, zda hodnota výstupní veličiny závisí pouze na okamžité hodnotě vstupní veličiny a vlastnostech systému, nebo navíc i na čase, rozlišujeme **systémy statické a dynamické** (viz obr. 1.4). Zvýšíme-li nastavení dálkového ovladače (vstup) určujícího hlasitost příjmu (výstup) rozhlasového přijímače, hlasitost se zvýší ihned podle nastavení potenciometru nezávisle na čase (statický systém). Sešlápneme-li plynový pedál auta (vstup), rychlost auta (výstup) také vzroste. Změna však bude závislá na čase, rychlost poroste postupně, až dosáhne hodnoty určené mírou sešlápnutí plynového pedálu (dynamický systém). Systémy v lidském organismu jsou výhradně dynamické, protože všechny děje v lidském těle probíhají v čase.

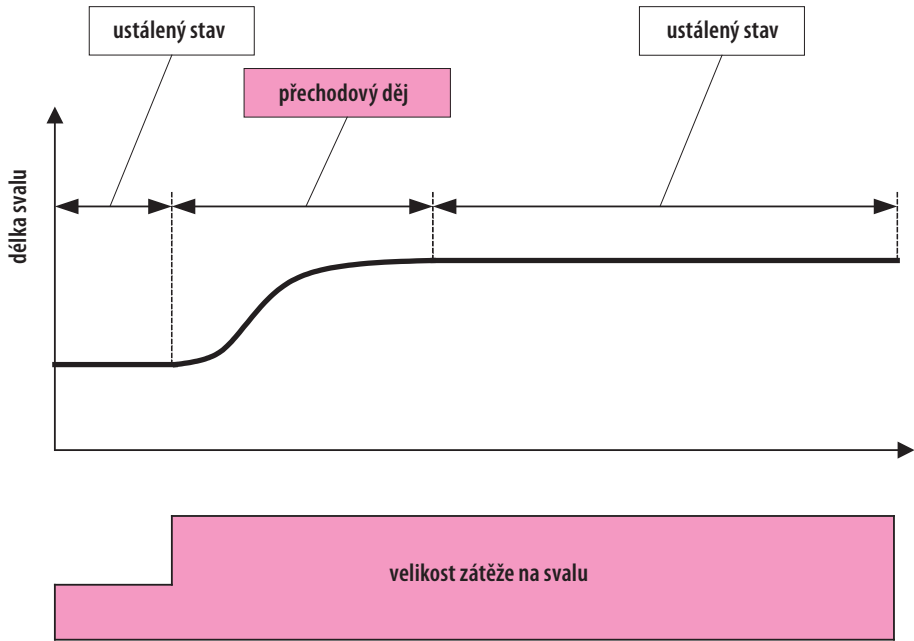
Stav systému je soubor vnitřních vlastností systému v daném okamžiku. Znalost stavu systému spolu se znalostí současných vstupů systému stačí k určení jeho výstupu. Na průběhu výstupní veličiny jako odezvy na průběh vstupní veličiny si můžeme dobře předvést vlastnosti dynamických systémů. Klasickým příkladem systému, na němž lze dobře tyto vlastnosti ozřejmit, je preparát kosterního svalu, zavěšený podle obr. 1.5. Stav, kdy se průběhy vstupní a výstupní veličiny nemění, nazýváme **ustálený stav**. Jeho zvláštní variantou je tzv. počáteční ustálený stav (tj. takový ustálený stav, kdy je hodnota vstupní veličiny rovna nule). V našem příkladu kosterního svalu může být vstupní veličinou velikost zátěže, kterou na sval naložíme. Výstupní veličinou je délka svalu (viz obr. 1.6). Pokud bude velikost zátěže



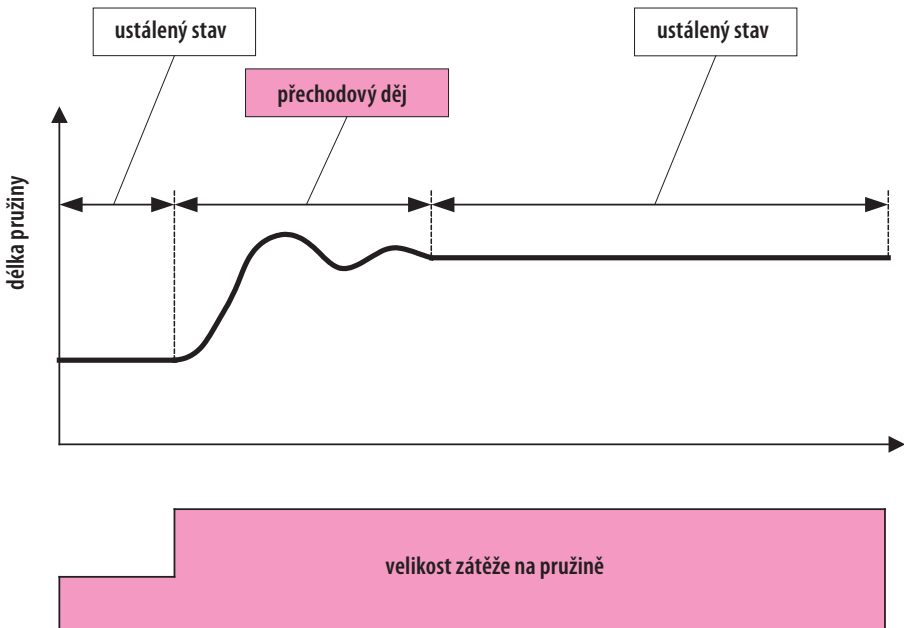
Obr. 1.4 Odezva systému statického (nahore) a dynamického (dole)



Obr. 1.5 Změna délky svalů při změně zátěže

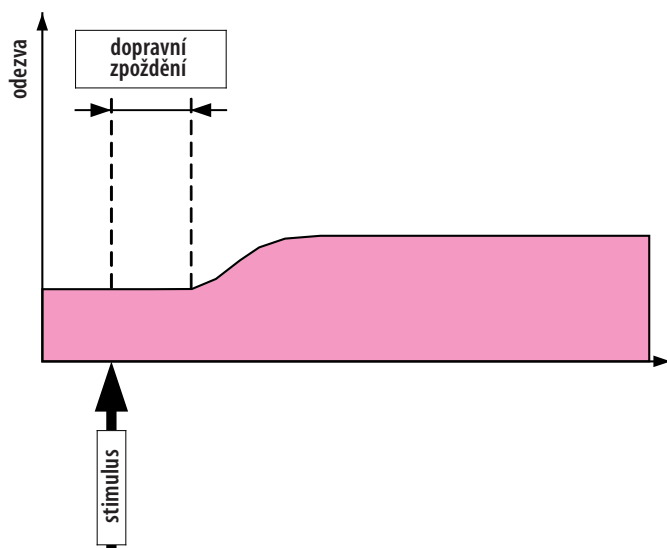


Obr. 1.6 *Ustálený stav a přechodový děj*

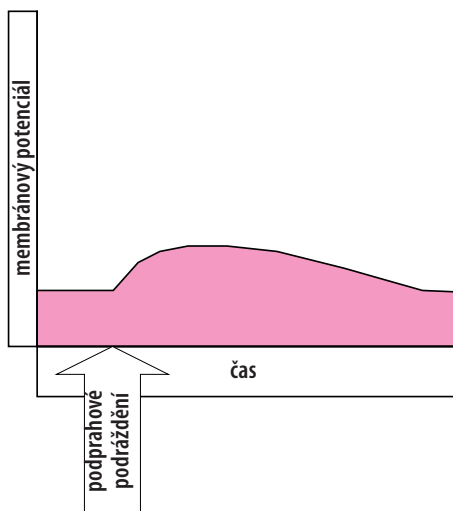


Obr. 1.7 *Jiný příklad přechodového děje*

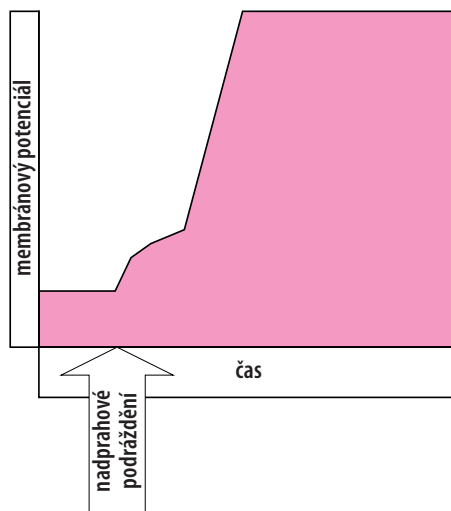
neměnná, ani délka svalu se nemění – systém je v ustáleném stavu. Když zátěž zvýšíme, sval se prodlouží a přejde do nového ustáleného stavu. Průběh odezvy, neboli přechod systému z jednoho ustáleného stavu do druhého, se nazývá **přechodový děj**. Ten je určován hlavně vlastnostmi systému: sval je elastický, tedy se prodlouží, ale rychlost prodloužení bude zpomalena třením. Čím větší bude toto tření, tím déle bude přechodový děj trvat. Použijeme-li místo svalu pružinu, která



Obr. 1.8 Opoždění odpovědi systému na podnět (v lidském organizmu velmi často způsobeno dopravním zpožděním)



Obr. 1.9 Stabilní systém

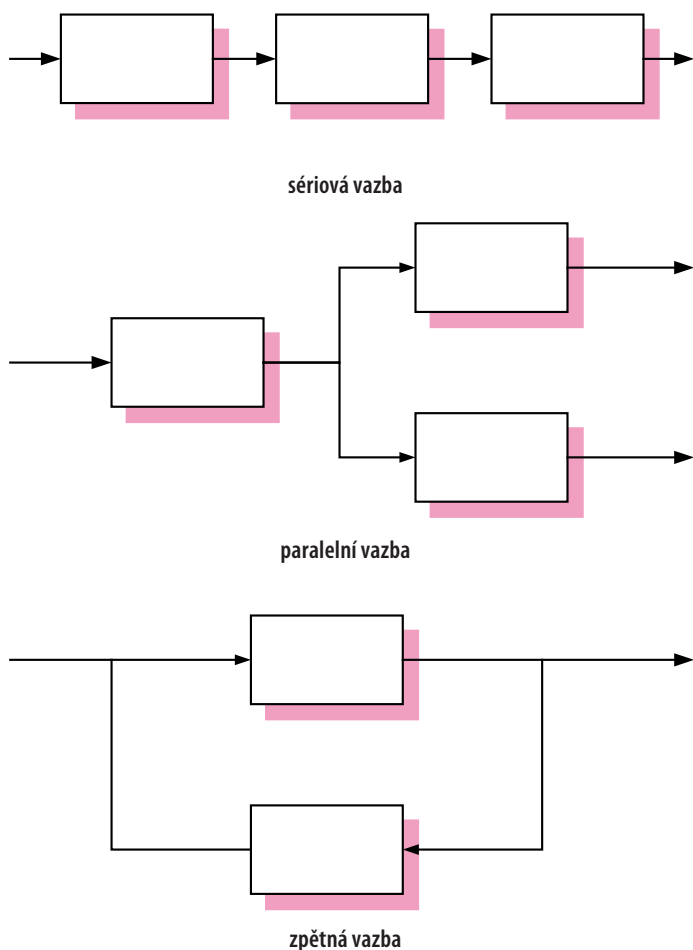


Obr. 1.10 Nestabilní (labilní) systém

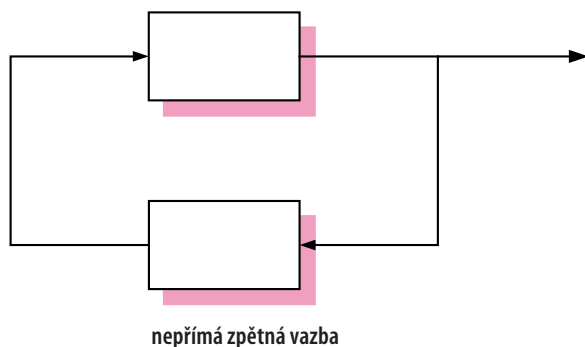
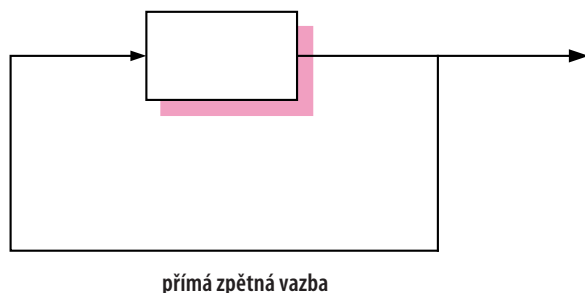
je elastická, ale tření je velmi malé, bude průběh přechodového děje odlišný (viz obr. 1.7), i když změna zátěže povede ke stejné změně délky jako u svalu.

Na obou příkladech je však vidět, že odezva systému se opoždí za změnou vstupu. Toto zpoždění se nazývá **dynamické zpoždění**. Zvláštním typem dynamického zpoždění je dopravní zpoždění. Budeme-li např. sledovat odezvu tlaku krve na podání noradrenalinu, bude začátek přechodového děje vzdálen od okamžiku podání látky o čas, který je potřebný na to, aby mohl být noradrenalin krevním oběhem dopraven k příslušným receptorům v arteriolách (viz obr. 1.8).

Pokud systém reaguje na změnu vstupní veličiny tak, že přejde do ustáleného stavu, říkáme, že je **stabilní**. Naproti tomu **nestabilní** systémy se po vychýlení z ustáleného stavu již neustálí. Řada systémů je stabilních pouze v určitém rozsahu velikosti změny vstupní veličiny a při jejím překročení se stávají nestabilními. Příkladem může být neuronální membrána (viz obr. 1.9, 1.10): vstupem bude



Obr. 1.11 Vazby mezi systémy

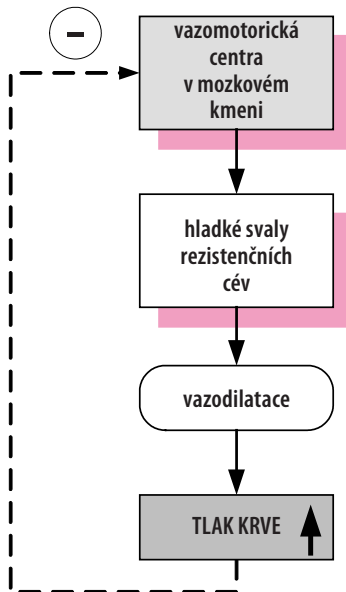
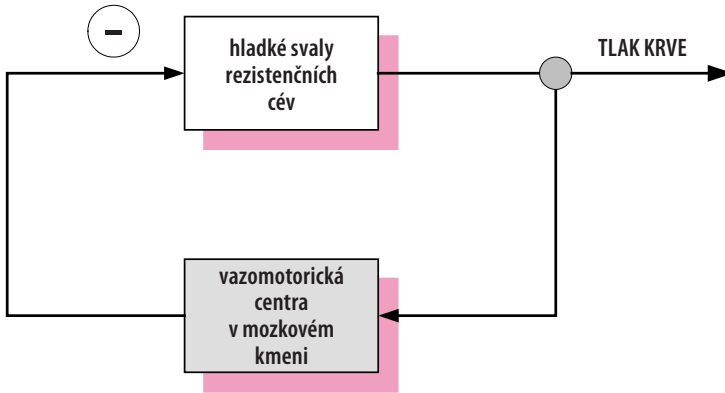


Obr. 1.12 Přímá a nepřímá zpětná vazba

elektrický podnět, výstupem membránový potenciál. Při podprahovém podnětu dochází pouze k lokální změně membránového potenciálu a ten se vrací zpět do ustáleného stavu (viz obr. 1.9) – systém je stabilní. Překročíme-li práh podráždění, začne se hodnota membránového potenciálu v určitém okamžiku vzdalovat od klidové hodnoty stále více (roste labilita systému), až dojde ke vzniku akčního potenciálu (viz obr. 1.10) – systém se stal nestabilním.

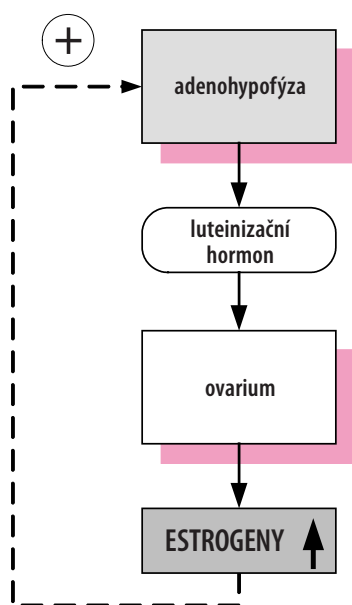
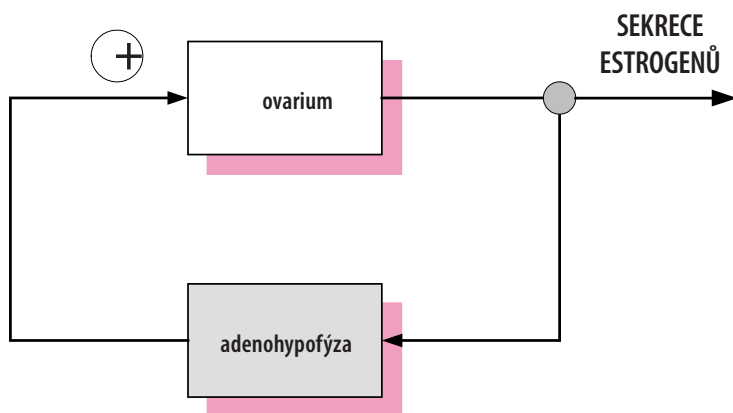
Působí-li systémy na sebe navzájem prostřednictvím svých vstupů a výstupů, hovoříme o tzv. **vazbách mezi systémy**. Ty jsou analogické vazbám mezi prvky systému. To je logické, protože při podrobném zkoumání systému obvykle zjistíme, že jeho prvky mohou být chápány jako jednodušší systémy (subsystémy) a naopak každý systém je vlastně prvkem (subsystémem) systému vyššího.

Základní typy vazeb mezi systémy, popř. subsystémy, jsou **vazba sériová, paralelní a zpětná** (viz obr. 1.11). Z hlediska regulačních mechanismů je nejdůležitějším typem vazby vazba zpětná, kdy působí výstup systému na vstup téhož systému. To může nastat bezprostředně (přímá zpětná vazba), nebo zprostředkovaně dalším systémem (nepřímá zpětná vazba) (viz obr. 1.12). Zpětná vazba může být kladná nebo záporná. **Záporná zpětná vazba** má mezi vazbami určité mimořádné



Obr. 1.13 Schéma zpětnovazebného řízení tlaku krve baroreceptorovým reflexem (příklad záporné zpětné vazby)

postavení, je totiž základní součástí struktury regulačního systému. Její význam spočívá v tom, že kompenzuje jeho výchytky. Typickým příkladem mohou být baroreceptorové reflexy: vzestup tlaku krve je zaznamenán baroreceptory, informace je předána do vazomotorického centra a to vyvolá cestou vegetativního nervstva periferní vazodilataci, která vrátí hodnotu tlaku krve na původní úroveň (viz obr. 1.13).



Obr. 1.14 Schéma zpětnovazebného řízení produkce estrogenů v druhé části folikulární fáze ovariálního cyklu (příklad kladné zpětné vazby)

Kladná zpětná vazba odchylku nekompensuje, ale naopak ji potenceje. Také kladná zpětná vazba má ve fyziologii svůj význam, přestože není tak častá v biologických systémech. Je však nezastupitelná tam, kde potřebujeme, aby malý stimulus vedl k výrazně rychlé odpovědi. Elektrické podráždění membrány neuronu např. vede k lokální změně membránového potenciálu (otevře se jen malé

množství rychlých sodíkových kanálů). Čím větší je podráždění, tím více sodíkových kanálů se otevře a vstup natriových iontů do buňky nakonec vede k další depolarizaci, která otevře další sodíkové kanály. Celý systém fungující jako kladná zpětná vazba vede k tomu, že hodnota membránového potenciálu se nevrací ke klidové hodnotě, naopak se od ní stále rychleji vzdaluje – nastává depolarizace membrány. Zajímavým příkladem kladné zpětné vazby je řízení produkce estrogenů z ovarií, což se děje prostřednictvím luteinizačního hormonu (LH) produkovaného adenohypofýzou (viz obr. 1.14). Za běžných okolností funguje tento obvod jako záporná zpětná vazba, ale za určitých okolností (na konci folikulární fáze ovariálního cyklu, viz kap. 14.2) vzestup hladiny estrogenů vede naopak k dalšímu zvyšování produkce LH, které dále zvyšuje sekreci estrogenů a tak dále do kola – to je základní princip kladné zpětné vazby. Jejím smyslem je vytvořit rychle vysokou hladinu LH a spustit v ovariu ovulaci.

1.2 Řízení dynamických systémů

V lidském organismu se setkáváme s nepřehlednou řadou regulačních systémů, které jsou velmi složitým způsobem navzájem propojeny a provázány. Proto je studium řízení funkcí organismu jako celku pro obrovskou složitost problému natolik obtížné, že je v praxi téměř vyloučeno. Cestou, kterou lze nahlédnout do takového složitého objektu, je právě popsaný systémový přístup. Na objektu řízení funkcí organismu si můžeme nadefinovat řadu systémů, které se starají vždy o řízení jedné veličiny, a zpětnou syntézou získaných poznatků pak dostaneme představu o práci celého objektu.

Systém, který se stará o regulaci nějaké veličiny, se nazývá **regulační systém**. V předchozím textu jsme si řekli, že pro takový systém je typická existence záporné zpětné vazby. Také už víme, že každý systém je souborem prvků (nebo také subsystémů) a vazeb mezi nimi. Pro regulační systém existuje určitá charakteristická struktura jejich uspořádání. Zkusme si nyní na příkladu definovat obecný regulační systém. Jednou z důležitých veličin, které musí být v lidském organismu pečlivě řízeny, je tlak krve. Nás bude v našem uvažovaném systému zajímat účast ledvin na tomto řízení. Můžeme tedy pro naše účely zanedbat mimo jiné i význam srdce pro hodnotu tlaku krve a zůstaneme v periférii oběhové soustavy (provádíme tedy při vymezení systému potřebná zjednodušení). Subsystémem, který je v našem systému odpovědný za hodnotu tlaku krve, je hladká svalovina arteriol (viz obr. 1.15). Ledviny, které potřebují udržet dostatečnou perfuzi glomerulů, zaznamenávají hodnotu tlaku krve ve speciálních vysokotlakých baroreceptorech v aferentních arteriolách. Ty jsou navíc pod stálým vlivem sympatiku (zvýšená aktivita sympatiku vede ke konstrikci aferentních arteriol). Když uvedené baroreceptory zaznamenají snížení perfuzního tlaku krve (např. proto, že klesne tlak krve v celém oběhu), aktivují v modifikované hladké svalovině aferentních a eferentních arteriol zvýšenou sekreci reninu. Ten díky svým enzymatickým vlastnostem štěpí v krvi angiotenzinogen za vzniku