

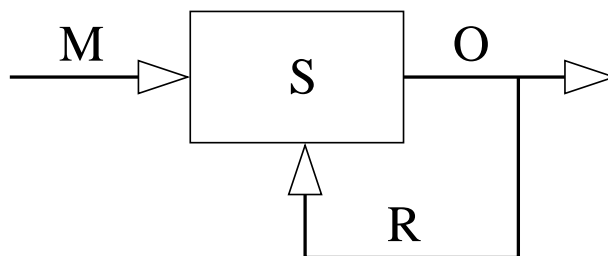
Poglavje 1

REGULACIJSKI SISTEMI

1.1 Sistemi

S pojmom **sistem** imamo opravka pri študiju pojavov v naravi pa tudi na različnih področjih človekovega udejstvovanja. Pod sistemom razumemo sklop med seboj povezanih pojavov, na katere lahko okolje vpliva le preko **vhodne motnje** in pri tem izzove nek **odziv**, ki je deloma usmerjen nazaj v okolje, deloma pa preko regulacije s **povratno zanko** vpliva nazaj na sistem sam (sl. 1.1).

Poznamo sončni sistem, ekonomski sistem, šolski sistem, živčni sistem, itd. Kadar študiramo sončni sistem, nas zanima n. pr. gibanje planetov okrog sonca, kot odziv na sile, ki uravnavajo to gibanje. Pri ekonomskem sistemu nas zanima n. pr. gibanje cen kot odziv na porabo. Pri živčnem sistemu nas zanimajo n. pr. molekularni mehanizmi v živčni celici, s katerimi se le-ta odzove na živčne dražljaje. Pri vsakem od navedenih sistemov smo se omejili na takšen del pojavov,



Slika 1.1: Shema povratne zanke, kjer črke M, S, O in R označujejo motnjo, sistem, odziv in regulacijo.

ki se dogajajo v še večjem sistemu, a so vsaj do neke mere obnašajo neodvisno od okolice.

Pri študiju sistemov nas zanima **stanje sistema**. Stanje sistema praviloma opišemo s parametri, katerih vrednosti se da izmeriti. Pri sistemih nas n. pr. zanima, kako se vrednosti teh parametrov spreminjajo s časom pod vplivom različnih vhodnih spremenljivk okolja. Zanima nas tudi odziv sistema, ki pove, kako se vrednosti parametrov sistema spreminjajo pri spremenjenih razmerah v njegovi okolici. Vedeti moramo torej, kako je sistem povezan (sklopljen) z okolico in seveda tudi poznati parametre, s katerimi popišemo okolico sistema.

Da bi razumeli obnašanje nekega sistema, moramo poznati zakonitosti, ki opisujejo vpliv okolja na sistem in njegovo obnašanje pod tem vplivom. Gibanje sončnega sistema n. pr. razumemo, odkar vemo, kako gravitacijska sila sonca (vhodna motnja) vpliva na gibanje planeta po ekliptiki (odziv).

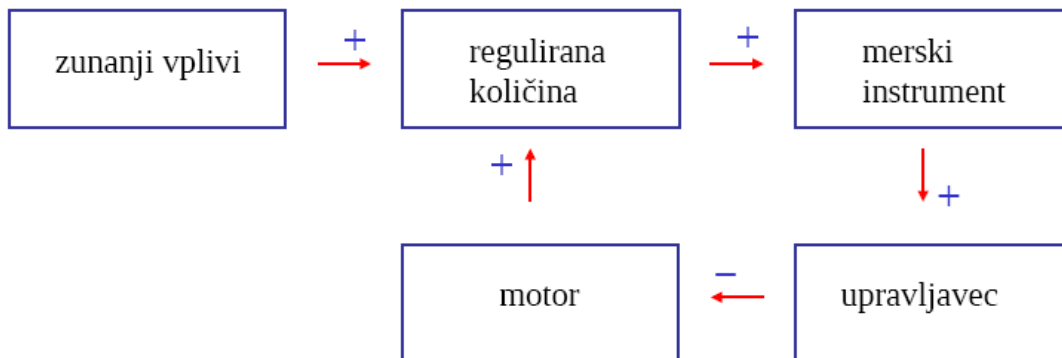
1.2 Značilnosti živih sistemov

Kot živ sistem bomo v nadaljnjem obravnavali posamezen organizem ali del organizma in ne sistem več organizmov skupaj. Ena osnovnih lastnosti živih sistemov je **urejenost**. Posamezni deli organizma so praviloma v točno določenem medsebojnem odnosu. Druga lastnost živih sistemov je, da so zgrajeni tako, da je stanje organizma čim manj odvisno od okolice. To neodvisnost živih sistemov od okolice ponavadi imenujemo **homeostaza**. Obe lastnosti, struktura in vzdrževanje notranjega stanja sta posledica tega, da v živih sistemih deluje vrsta **regulacijskih mehanizmov**. Da razumemo pojave v živih sistemih, moramo zato poleg fizikalnih in kemijskih zakonitosti poznati tudi lastnosti regulacijskih sistemov.

1.3 Kvalitativna analiza regulacijskih sistemov

Pri kvalitativni analizi regulacijskih sistemov bomo predvsem spoznali in definirali pojme, s pomočjo katerih lahko te sisteme opišemo. **Regulacijski sistemi** so sistemi z notranjo strukturo, ki omogoča, da se odzovejo na zunanjo motnjo s čim manjšo spremembo svojega stanja. Veliko primerov iz vsakdanjega življenja in delovanja organizma lahko opišemo kot regulacijski sistem. Ogrevanje in hlajenje prostorov, šofiranje, krmarjenje, hoja, prehranjevanje, odpiranje in zapiranje zenice očesa, itd. Vsi ti primeri vsebujejo iste osnovne elemente.

Oglejmo si **osnovne elemente regulacijskih sistemov** na primeru ogrevanja prostorov. Prostore ogrevamo zato, da bi bila temperatura v njih primerna za bivanje, ne glede na to, da se temperatura okolice spreminja. Vzemimo, da



Slika 1.2: Blok shema negativne povratne zanke.

je temperatura okolice manjša od temperature v prostoru. Potem iz prostora v okolico uhaja toplota, zaradi česar se mu zmanjšuje njegova temperatura. Če pa hočemo vzdrževati stalno temperaturo, moramo toploto prostoru tudi dodajati. Čim večja je temperaturna razlika, tem več časa mora biti električna peč vklopljena. Osnovni elementi tega sistema so torej: temperatura, ki je **regulirana količina**; vrednost temperature, pri kateri želimo imeti prostor, je **regulirana vrednost regulirane količine**. Ugotavljati moramo stalno, ali je temperatura v prostoru večja ali manjša od regulirane vrednosti. Zato moramo imeti **merski instrument** ter nekoga, ki inštrument opazuje in ustrezno ukrepa, to je **upravljavca sistema**. Upravljavec ukrepa tako, da vklopi ali izklopi **motor**, ki je v našem primeru električna peč. Opisani sistem lahko nazorno ponazorimo s tako imenovano blok shemo (sl. 1.2).

Iz sheme je razvidno, da na regulirano količino vpliva dvoje, zunanji vplivi (motnje sistema) in notranji vplivi (motor). Druga značilnost sistema, ki je razvidna iz slike 1.2, je, da sistem predstavlja zaključeno zanko, ki jo imenujemo

povratna zanka. Povratna zanka v sistemu ogrevanja prostora, ki smo ga opisali, je tako imenovana **negativna povratna zanka**. Negativna se imenuje zato, ker je predznak vpliva motorja na regulirano količino nasproten predznaku zunanjih vplivov. Če bi zunanje okoliščine (n. pr. znižanje zunanje temperature) vplivale na znižanje temperature v prostoru, bi upravljavec moral segrevanje ojačiti. Kadar bi pa zunanji vplivi povzročili, da bi se temperatura v prostoru povečala, bi upravljavec moral delovanje peči zmanjšati.

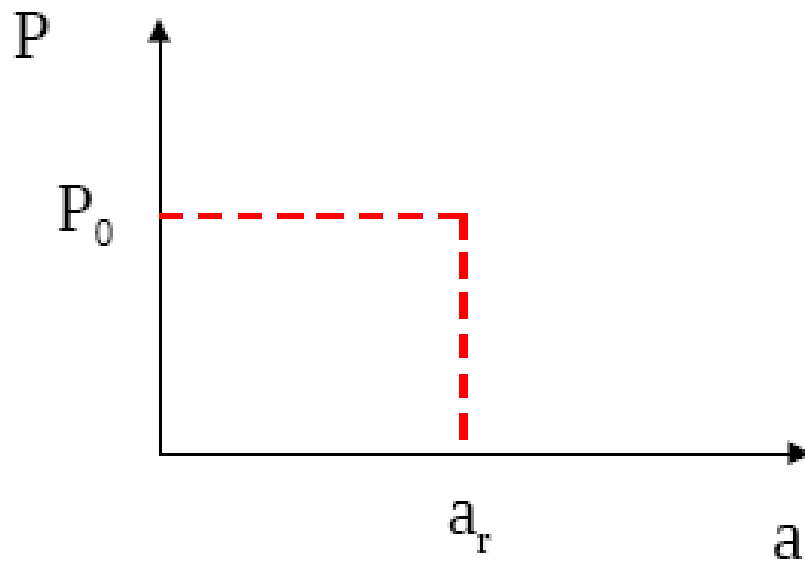
V splošnem, če ima povratna zanka liho število negativnih vplivov, je negativna, pri sodem številu negativnih vplivov ali brez njih pa je pozitivna. Za negativne povratne zanke velja, da vodijo k **stabilnemu obnašanju sistema**. Pozitivne povratne zanke pa so lahko destruktivne, ker lahko privedejo do **nestabilnosti** sistema.

1.4 Tipi kontrole

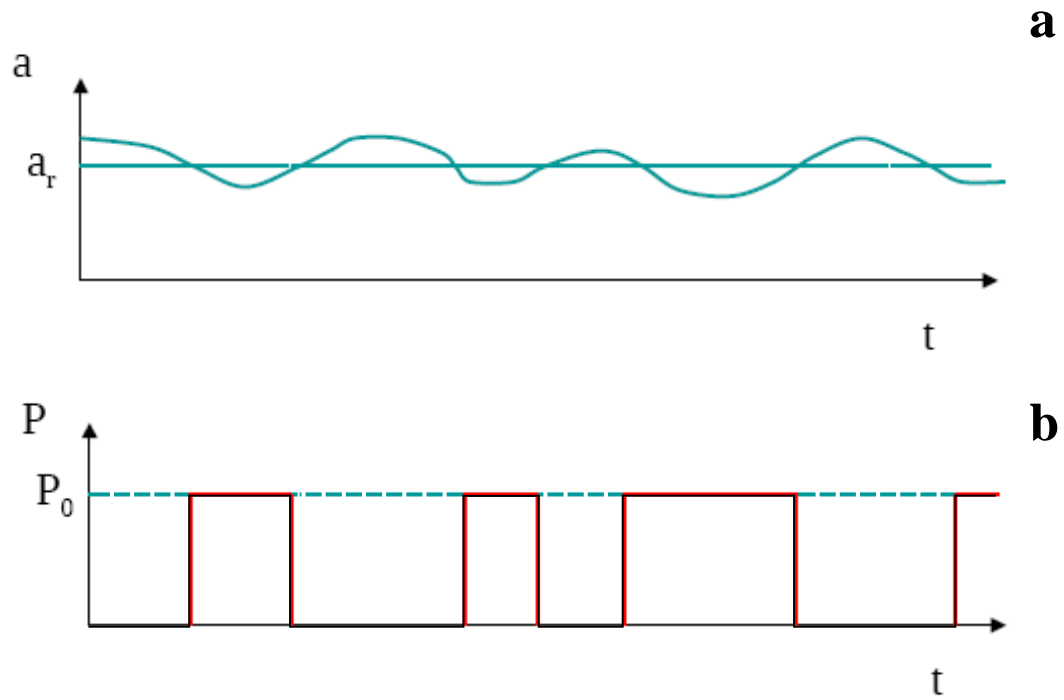
S tipi kontrole označimo razne načine delovanja motorja glede na regulirano vrednost regulirane količine. Obravnavali bomo dva možna tipa: »**vkluči-izkluči**« in **proporcionalno kontrolo**.

Obe navedeni kontroli sta sočasni. Delovanje motorja v nekem trenutku odgovarja vrednosti regulirane količine v istem trenutku. V splošnem je delovanje motorja lahko tudi pogojeno z vrednostjo regulirane količine v kakšnem prejšnjem času, ali pa v določenem predhodnem časovnem intervalu.

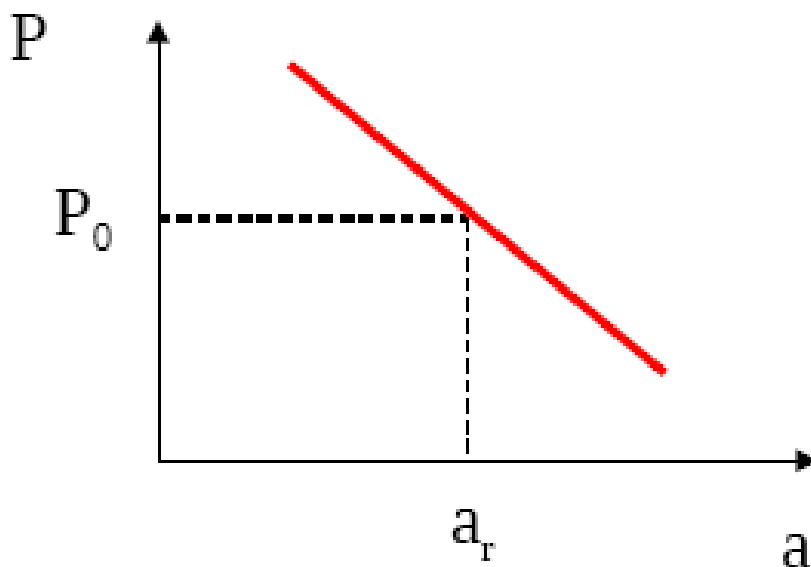
- Kontrola »vkluči-izkluči« (angl. »on-off«): Pri tem tipu kontrole motor bodisi deluje (je vključen) ali ne deluje (je izključen). Delovanje motorja



Slika 1.3: Delovanje motorja pri regulaciji tipa »vključi-izključi«. P je moč in P_0 je moč motorja. a_r je regulirana vrednost regulirane količine (a).



Slika 1.4: Časovni potek delovanje sistema pri regulaciji tipa »vključi-izključi«. (a) Časovni potek vrednosti regulirane količine. (b) Časovni potek delovanja motorja.

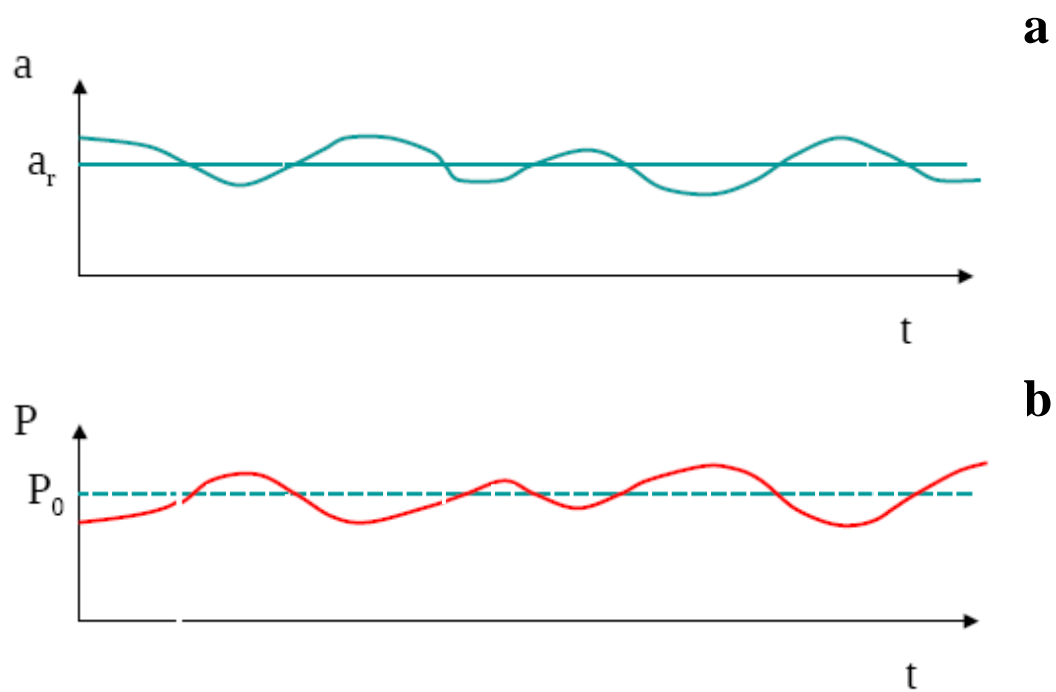


Slika 1.5: Delovanje motorja pri proporcionalni regulaciji. a_r je regulirana vrednost regulirane količine (a).

upravljamo tako, da ga vključimo, če je vrednost regulirane količine manjša od regulirane vrednosti, in izključimo, če je vrednost regulirane količine večja od regulirane vrednosti (kontrola je negativna!) (sl. 1.3). Ker je motor bodisi vklopljen bodisi izklopljen, govorimo o diskretni regulaciji. Časovni potek delovanja takega sistema je ponazorjen na sliki 1.4b.

- Proporcionalna kontrola: Pri proporcionalni kontroli je moč motorja odvisna od trenutnega odmika regulirane količine od njene regulirane vrednosti (sl. 1.5). Časovni potek delovanja takega sistema je prikazan na sliki 1.6.

Kot je prikazano na slikah 1.4a in 1.6a, regulirana količina stalno **fluktuir**a okrog regulirane vrednosti. Ta lastnost je lastna vsem reguliranim sistemom.



Slika 1.6: Časovni potek delovanje sistema pri proporcionalni kontroli.

Fluktuacije regulirane količine ponavadi kvantificiramo s **standardnim odstopanjem** regulirane količine od regulirane vrednosti. Standardno odstopanje fluktuirajoče regulirane količine od regulirane vrednosti (σ) je definirano s kvadratnim korenom povprečne vrednosti kvadrata odmika od regulirane vrednosti. Matematično to zapišemo takole

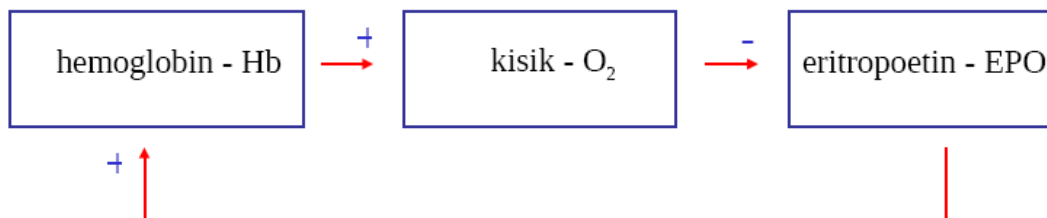
$$\sigma = \sqrt{(a - a_r)^2}. \quad (1.1)$$

Kako velik je povprečni odmik, je odvisno od tipa kontrole in fizikalnih lastnosti sistema. Pri proporcionalni kontroli zaradi zveznega sledenja spremembam v regulirani vrednosti lahko pričakujemo, da bo povprečni odmik manjši, kot je pri kontroli tipa »vključi –izključi«.

1.5 Regulacija v bioloških sistemih

Z zgoraj omenjenimi elementi regulacijskih sistemov lahko analiziramo kar nekaj **regulacijskih mehanizmov v bioloških sistemih**. Tu imamo opravka z neke vrste »meritvijo« neke fizikalne količine in njeno regulacijo. Poskusite ugotoviti, kaj so elementi regulacijskega sistema pri pisanju. V večini primerov regulacije v bioloških sistemih gre za medsebojni vpliv dveh ali več snovi na njuno sintezo ali n. pr. na njun prekomembranski transport. V vseh teh primerih imamo opravka s **povratnimi zankami**.

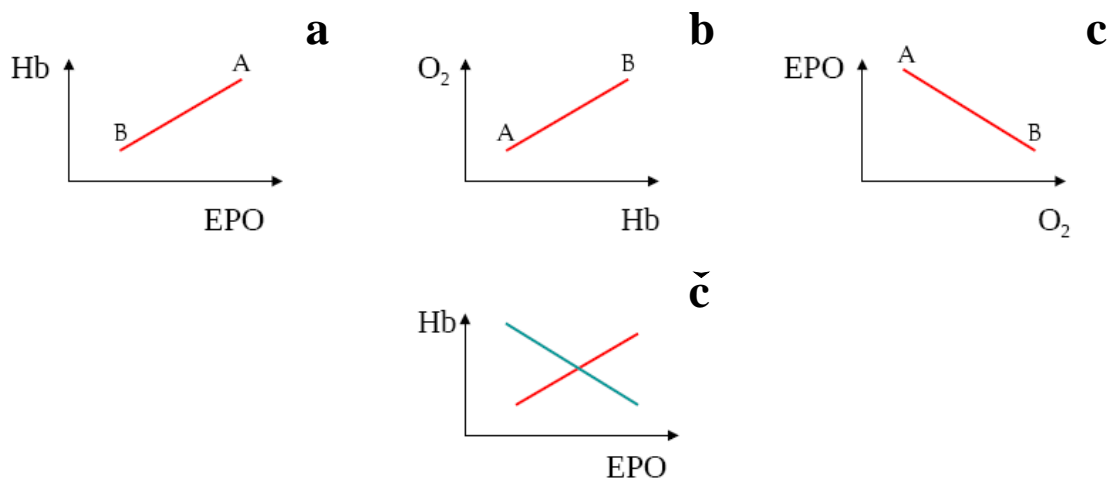
Kot **primer regulacije z negativno povratno zanko** lahko navedemo regulacijo količine hemoglobina v krvi. Hemoglobin (Hb) je beljakovina, na katero se v krvi veže kisik. Čim večja je koncentracija hemoglobina v krvi, tem več kisika lahko kri prenese v tkiva. Hemoglobin nastaja v kostnem mozgu in pre-



Slika 1.7: Povratna zanka.

haja v kri v rdečih krvnih celicah. Na enoto časa nastane določeno število novih rdečih krvnih celic, koliko, pa je odvisno od količine hormona eritropoetina. Količina eritropoetina pa je odvisna od tega, koliko je v nekaterih tkivih (ledvicah) kisika. Čim več je kisika, tem manj je eritropoetina. Povratna zanka hemoglobin – kisik – eritropoetin je prikazana na sliki 1.7. S predznakom pri puščici označimo, kako snov, navedena v prejšnjem pravokotniku, vpliva na nastanek snovi, navedene v naslednjem pravokotniku. Če povečana količina ene snovi vpliva na povečanje količine druge snovi, imamo znak plus, torej **pozitivno kontrolo**, sicer pa minus oziroma **negativno kontrolo**.

Shematično je medsebojni vpliv povratne zanke s slike 1.7 prikazan na diagramih na sliki 1.8. V zgornjem primeru, ko imamo en negativni vpliv, imamo stabilno povratno zanko in pričakujemo, da bo imela regulirana vrednost koncentracije hemoglobina v krvi in eritropoetina v kostnem mozgu vedno končno vrednost. Do tega zaključka lahko pridemo s čisto kvalitativnim razmišljanjem. Če bi imeli n. pr. premalo hemoglobina (točka A na sliki 1.8b), bi to povzročilo, da zaradi manj kisika v krvi dobimo več eritropoetina (točka A na sl. 1.8c). Več eritropoetina povzroči povečanje hemoglobina (točka A na sl. 1.8a). Količina



Slika 1.8: Shema medsebojnega vpliva povratne zanke.

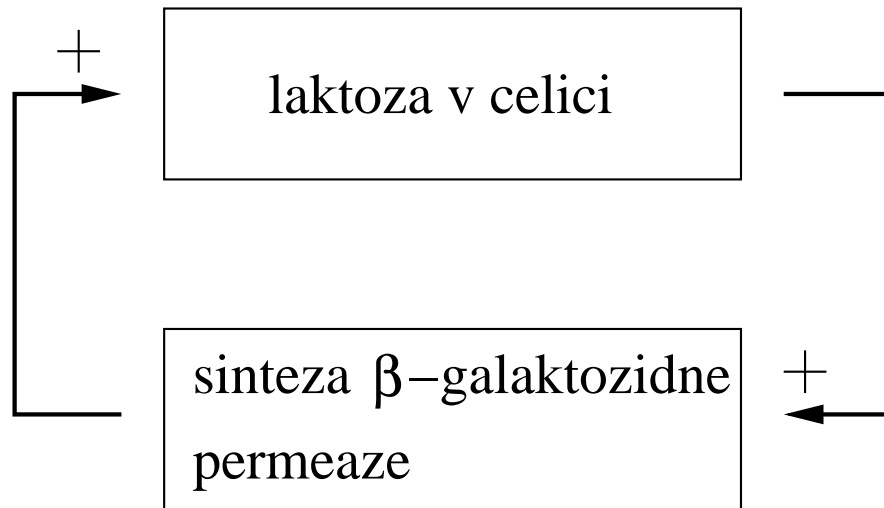
hemoglobina A na sliki 1.8a pa ustreza točki B na sliki 1.8b. Sledi zmanjšanje eritropoetina (sl. 1.8c) in hemoglobina (točka B na sliki 1.8a). Pri natančni obravnavi tega sistema bi ugotovili, da imamo opravka z dušenim nihanjem okrog mirovne lege (pogl. 2.4.4).

Regulirano vrednost hemoglobina in eritropoetina lahko dobimo tudi grafično, če v diagram na sliki 1.8a nanašamo zvezo med hemoglobinom in eritropoetinom, ki jo dobimo, če iz diagramov na slikah 1.8b in 1.8c eliminiramo kisik. V skupnem diagramu (sl. 1.8č) dobimo kontrolirani vrednosti obeh količin na mestu, kjer se obe dobljeni krivulji sekata. Pri tako dobljenih stacionarnih razmerah nastane na enoto časa ravno toliko rdečih krvnih celic kolikor jih tudi odmre.

Navedimo še **primer pozitivne povratne zanke**. V bioloških sistemih zasledimo pojave, kjer imamo opravka s prehodom iz enega v drugo stabilno stanje sistema. Take vrste prehod je n. pr. tako imenovana indukcija sinteze

proteina. V enem stanju neka celica (n. pr. bakterija) določenega proteina ne sintetizira, v drugem stanju pa ga. Kot primer obravnavajmo indukcijo encima β -galaktozidaze in beljakovine β -galaktozidne permeaze pri tako imenovanem lac operonu bakterijskega sistema. Če se bakterija nahaja v mediju, ki vsebuje glukozo, sinteza β -galaktozidaze in β -galaktozidne permeaze v njej ne poteka, ker jo preprečuje vezava določene molekule (represorja) na molekulo DNA. Kadar se bakterija nahaja v mediju brez glukoze in z laktozo, pa preide v stanje, v katerem sinteza β -galaktozidaze in β -galaktozidne permeaze poteka. Do sinteze teh beljakovin pride, ker že omenjeni represor reagira z laktozo, dobljena spojina pa se na DNA ne veže.

Za razumevanje teh pojavov je pomembno poznati delovanje β -galaktozidne permeaze. β -galaktozidna permeaza je membranski protein in služi za aktivni transport laktoze v celico. Ob njeni prisotnosti je zato koncentracija laktoze v celici veliko večja kot zunaj. Opisano stanje sistema je stabilno. Čeprav se laktoza zaradi delovanja β -galaktozidaze v celici presnavlja, je zaradi aktivnega transporta vendarle dovolj, da se spoji z represorjem ter tako posredno dovoljuje sintezo novih β -galaktozidnih permeaz. Opisano pozitivno povratno zanko lahko ponazorimo z blok shemo, prikazano na sliki 1.9. Prvo stabilno stanje sistema je, ko v celici ni niti laktoze niti β -galaktozidne permeaze, drugo pa, ko sta v njej prisotni obe navedeni komponenti.



Slika 1.9: Blok shema pozitivne povratne zanke za primer indukcije sinteze β -galaktozidne permeaze. Znak + pomeni, da je delovanje pozitivno; če je laktoza v celici, se β -galaktozidna permeaza sintetizira; če je β -galaktozidna permeaza v membrani, bomo imeli v celici laktozo.