

## Základní vlastnosti složitých systémů

Systémové vlastnosti zmizí, jakmile je systém rozložen na izolované (neinteragující části).

Systémy vykazují určité hierarchické vnitřní uspořádání, existují v nich subsystémy, aplikace téže představy na různé úrovni systémů pak může vést k obohacujícímu vhledu.

Jednotlivé hierarchické úrovně systémů vykazují různé stupně komplexity.

Komplexitou rozumíme složitost (z lat. *complexus*, objetí, shrnutí), přesněji míru složitosti nějakého komplexního systému. Komplexita se zkoumá například v souvislosti s informačními systémy nebo s evolucí živých organismů.

Na každé úrovni hierarchie složitého systému se objevují vlastnosti, které nelze zaznamenat na úrovních nižších, tyto vlastnosti jsou výsledkem určitého stupně komplexity a nazývají se **emergentní** vlastnosti.

Emergentní vlastnosti je těžké dovodit z vlastností jejich složek.

Systémové myšlení dává jevy do souvislosti s jejich prostředím a ve své podstatě je proto environmentálním myšlením.

To, co nazýváme částí, je pouze uspořádání v neoddělitelném předivu vztahů.

Rovněž v mechanistickém popisu jsou spolu jednotlivé objekty pochopitelně v interakci, ale interakce není to, co utváří povahu těchto objektů.

Systém je definován jako soubor prvků, které jsou ve vzájemné nenáhodné interakci, a má tyto základní vlastnosti:

- Vlastnosti každého prvku v tomto systému ovlivňují skrze síť vzájemných vazeb s ostatními prvky vlastnosti celého systému i těchto prvků.

Např. ve společenstvu savany by snížení únikové rychlosti antilopy vedlo k dočasnému nárůstu populace jejich predátorů a po vymření antilop k rozsáhlým změnám v celém ekosystému.

Organismy samy o sobě představují silně integrované systémy: např. stav kteréhokoliv orgánu v lidském těle silně ovlivňuje chování dalších.

Rovněž stav mykorhizy v lesním ekosystému může velmi silně ovlivnit stav celého lesního ekosystému.

- Úrovně systému jsou takto provázány na všech hierarchiích.
- Systém je tedy více než pouhá suma svých částí.

Pokud se chceme zabývat systémy a jejich vlastnostmi, měli bychom v ideálním případě zvolit takové metody zkoumání (popisu), které umožní postihnout především spojení souvislostí a systém jako celek.

Tento přístup se nazývá holistický a je protikladem přístupu analyticko-mechanistickému, který rozkládá systém na jednotlivé prvky.

V praxi se při empirickém i modelovém popisu systémů zpravidla setkáváme s kombinací těchto přístupů: zaměříme se na určitou skupinu faktorů působících na systém (např. kyselá dešť či eutrofizace) a vliv ostatních parametrů se pokoušíme minimalizovat nebo si zvolíme jeden či skupinu prvků systémů nebo procesů v systému, pomocí, kterých popisujeme vlastnosti celku.

Náročným a dosud nenaplněným cílem systémové teorie je tady překonat analytickou metodu rozkladu skutečnosti.

V přírodě se setkáváme s živými systémy na dvou základních úrovních:

Na úrovni organismu a na úrovni ekosystému

Ekosystém je heterogenní (hybridní) systém složený z biologického subsystému a (obvykle biocenózy) a ze subsystému prostředí (tzv. ekotopu).

Látková výměna organismů s prostředím probíhá v přírodě jedině v rámci ekosystému.

Žádný organismus si nevystačí sám.

Mají-li být vztahy zkoumané v rámci systému přehledně zobrazeny, je vždy nutná aproximace a abstrakce (čili v podstatě redukce).

Z obecné teorie systémů (kterou vypracoval v polovině 20. stol. Ludwig van Bertalanffy) vyplývají dva závěry důležité pro jakékoliv pochopení procesů v systémech:

Funkční propojení částí je důležitější, než tyto části samotné, ty jsou systému a jeho fungování podřízeny.

Části mají význam především na základě toho, jakou plní v systému funkci: regulátor, řídicí veličina, tlumič, hranice, výměník, rezervoár, modifikátor

Jedinečnost systému vyplývá z vlastností vztahů, které propojují jednotlivé jeho prvky.

Některé principiálně nutné funkce (viz výše), musí vždy někdo „zastávat“.

S jistou funkcí je někdy spojená volná nika v ekosystému: vakovlk v Austrálii: KONVERGENCE

Ekologická nika (resp. nika) je termín z obecné ekologie popisující nároky populace určitého druhu v ekosystému.

Odlišnost systémů vyplývá především právě z povahy interakcí mezi jednotlivými částmi:

Například vztahy mutualistické x kompetiční

Pro systémy je charakteristická hierarchie úrovní a to, že na každé úrovni se objevují jisté nové vlastnosti, které na úrovních předešlých nezaznamenáváme.

Tuto hierarchii přírody můžeme pozorovat od elementárních částic a po živé systémy.

Například až od úrovně velkých množství molekul můžeme mluvit o teplotě.

S popisem systémů jsou spjaté jisté, komplementární dvojice vlastností:

stabilita/labilita

stacionární/dynamický

Jak si ukážeme v dalších přednáškách, může být ZACHOVÁNÍ daného živého organismu, ekosystému dosaženo nejrůznějšími prostředky.

Pojmem stabilní/stabilita intuitivně označujeme takovou entitu, která zůstane zachována alespoň po jistou dobu.

Tedy fakt, že něco trvá ve svých podstatných vlastnostech.

U neživých systémů je ve většině případů stabilita vázána na neměnné, izolované subjekty tedy více méně **uzavřené systémy**: krystal soli či minerál, planeta s vychladlým jádrem a atmosférou ve stavu termodynamické rovnováhy

U živých systémů je rovnováha výsledkem dynamických procesů: každý živý systém je závislý na toku látek a energie ze svého prostředí.

O těchto systémech říkáme, že jsou ve stavu dynamické rovnováhy se svým okolím, všechny takové jsou **otevřené systémy**.

Stabilní systémy typu krystalu jsou uzavřené (nevyměňují s okolím látky ani informaci).

I v neživé přírodě nacházíme stabilní systémy, ve kterých je ustálena dynamická rovnováha a tudíž o nich můžeme prohlásit, že jsou stabilní:

kulový blesk

slunce

oscilační chemické reakce

O těchto systémech můžeme prohlásit, že jsou otevřené, avšak „kontakt“ s okolím pro ně není natolik stěžejní, jako pro živé systémy.

U živých systémů, kromě toho, že jsou v optimálním stavu v dynamické rovnováze (rovnovážný stav), nacházíme ještě další charakteristické vlastnosti:

### **Homeostáze**

V nejobecnějším smyslu schopnost udržovat (pomocí vnitřních mechanismů) hodnoty některých důležitých veličin v intervalu hodnot slučitelných s existencí systému. Více se zmíníme v kapitole o zpětných vazbách.

### **Schopnost samoorganizace**

Se samoorganizací se setkáváme již u některých neživých struktur, například Bénardových buněk klasickým příkladem samoorganizace v populacích živočichů jsou například kolonie mravenců: mravenci se řídí několika jednoduchými zákony, které určují jejich interakce s prostředím a ostatními mravenci. Ze vzájemných interakcí mezi mravenci vzniká značně složitá a organizovaná společnost, které má schopnost adaptace na vnější podmínky, mechanismy zpětné vazby a synchronizované jednání. V posledních letech řada vědců z oblastí společenských a počítačových věd studuje chování kolonie mravenců s cílem řešit problémy ve vlastním oboru.

### **Schopnost evoluce a růstu komplexnosti**

Oscilační chemická reakce, kulový blesk, Slunce, bouřkový mrak nebo tornádo se po čas své existence sice udržují ve stavu dynamické rovnováhy, ale jejich složitost v čase nikterak neroste.

Schopnost uchovávat informaci z předešlého vývoje (např. v podobě DNA, učení)

Oproti tomu v živém světě probíhá evoluce, vznikají nové druhy

Vznik nových druhů je záležitostí, která je pro běžného smrtelníka spíše záležitostí učebnicovou, ovšem evoluci živých systémů můžeme sledovat například na vývoji ekosystémů, změříme-li se na staré výsypky, opuštěné střelnice, či zarůstající louky.

Postupem času na těchto stanovištích narůstá síť vztahů mezi jednotlivými druhy a systém se stává více komplexním.

Systémy, které se v čase vyvíjí, existují v nich jisté toky, nazýváme **dynamickými systémy**, všechno živé proto patří mezi dynamické systémy.

Mnohé živé ale i neživé systémy vykazují **fraktální strukturu**.

Fraktální struktura souvisí s tím, že ve struktuře některých systémů se opakují stále stejné motivy a to v různých měřítcích, celý objekt je tak vystaven jakoby na základě stejného, stále se opakujícího motivu.

O fraktálních strukturách říkáme, že jsou sobě-podobné a měřítkově invariantní.

### **Chování složitých systémů v organickém i anorganickém světě**

Mnoho jevů v našem vesmíru nelze vysvětlit pomocí zákonů klasické mechaniky a zákona zachování energie.

Existuje však něco, co bývá označováno jako šipka času. V přírodě totiž pozorujeme děje, které v čase probíhají vždy jedním směrem, hovoříme o **dějích nevratných**: děj proběhne jedním směrem samovolně, ovšem návrat zpět je v intencích samovolného průběhu nemožný.

Pohybové rovnice klasické mechaniky jsou invariantní (neměnné) vůči času, a proto z nich tato nevratnost nevyplývá.

V našem okolí pozorujeme spoustu jevů, které rozhodně vykazují nevratnost v čase:

Můžeme je zaznamenat na úrovni fyzikálních, chemických i biologických jevů (vedení tepla, pád tělesa v gravitačním poli, explozivní reakce, difúze, vyzařování energie slunce, diferenciacce buněk, evoluce živých organismů).

Vidíme, že všechny výše uvedené děje spojuje dosažení rovnováhy: teplo přejde z teplejšího tělesa na chladnější, kámen padající v gravitačním poli dopadne na zem, vysoce reaktivní směs exploduje a vytvoří stabilní produkty, látka přejde z místa s vyšší koncentrací do místa s nižší koncentrací, slunce po vyčerpání vodíku pro termonukleární fúzi vyhasne.

Všechny tyto děje spojuje přítomnost jistého gradientu, nerovnováhy jistých sil, potenciálů. Nerovnováha pak způsobuje děj, který vede k zániku vlastní, děj iniciující diference.

Tedy:

### ***asymetrie je příčinou jevů***

Se zánikem původní diference se vytvoří rovnovážný stav, který je stabilní. Jedná se o speciální a velmi důležitý typ stabilního stavu, který nazýváme **termodynamická rovnováha**.

O výchozím (počátečním) stavu všech výše uvedených systémů s přítomností gradientu říkáme, že příslušné systémy jsou *vzdáleny od termodynamické rovnováhy*.

***Živé organismy jsou typickými příklady otevřených systémů vzdálených od termodynamické rovnováhy.***

Fyzikové 19. století věřili, že jakmile dojde k vymizení gradientů nastane jev, který označili tepelná smrt vesmíru: všechna teplejší tělesa vychladnou, hmota bude homogenně rozprostřena a chemické sloučeniny se budou nacházet ve stabilním stavu, v takovém vesmíru by se v podstatě už nic nedělo.

Jak je to možné? Jak popíšeme toto chování?

Hnací sílu ustalování této termodynamické rovnováhy popíšeme veličinou zvanou **entropie**.

Entropie je veličina, která byla definována při vyčíslování účinnosti parních strojů.

### **Příklady vývoje složitých systémů**

U složitých systémů se setkáváme s některými specifickými znaky jejich chování.

Jak jsme si již řekli, živé systémy se nacházejí ve stavu vzdáleném od termodynamické rovnováhy, pro tyto systémy je typické, že se mohou chovat nelineárně.

***Nelineárním chováním*** rozumíme, že odezva systému (například změna některé pro systém důležité vlastnosti: teploty, tlaku, pH) na změnu jistého parametru (zpravidla parametru prostředí) není obecně úměrná změně tohoto parametru, tzn., že někdy i malá změna parametru, může obecně způsobit velkou změnu systému.

U živých systémů, tedy systémů s autoregulací, se dá nelineární chování vysvětlit jako důsledek pufračních mechanismů: systém se snaží hodnotu důležité interní veličiny uchovat konstantní,

jakmile je však vyčerpána kapacita mechanismů, které toto udržení (pufraci) zajišťují, pak i malá změna řídicího externího parametru, způsobí velkou změnou v systému.

To, že nelineární dynamické systémy v určitých situacích velmi citlivě reagují na změnu externích parametrů, označujeme pojmem **chaos**.

Pojem chaos tedy tvoří protipól k pojmu stabilita.

**Stav systému často popisujeme pomocí jisté trajektorie, dávající např. do souvislosti stavové proměnné (např. teplota, objem, tlak) ve fázovém prostoru.**

**U dynamických systémů s evolucí popisujeme vývoj systému pomocí dynamických proměnných.**

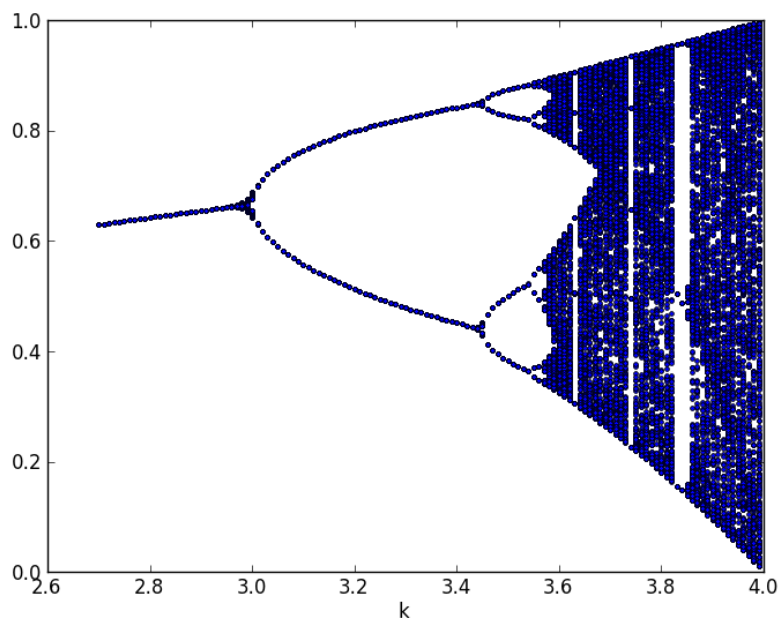
Dynamickými proměnnými může být v případě ekosystému například rychlost respirace, rychlost přírůstku biomasy, rychlost evapotranspirace. Fázový prostor je pak množina všech možných stavů dynamického systému.

Část fázového prostoru nazýváme fázový diagram.

Vývoj dynamického systému je tedy popsán jistou křivkou (trajektorií) ve fázovém prostoru či fázovém diagramu.

Pokud systém pozorujeme od jistého okamžiku  $t_0$ , pak množinu proměnných, popisujících systém v čase  $t_0$ , nazýváme počátečními podmínkami.

**Chaosm označujeme vlastnost některých nelineárních dynamických systémů, které jsou velmi citlivé vůči malé změně počátečních podmínek.**



Tuto citlivost popisujeme **efektem motýlího křídla**.

V dlouhém časovém období chování chaotických systémů nelze předpovědět.

Náhodné chování některých jevů znamená, že jsme dosud neodhalili deterministický základ tohoto chování.

Příkladů nelineárních dynamických systémů lze nalézt velmi mnoho, v živé i neživé přírodě.

S nelineární dynamikou se můžeme setkat například v makroekonomice, na akciovém trhu, u meteorologických jevů, u kolonií mravenců, při zemětřesení, dopravních zácpách, u živých organismů, ekosystémů, epidemií, imunitního systému, říčních sítí, rostlinných porostů v krajině, pruhů a skvrn na kůži některých savců, tvarumořského pobřeží a srdečních rytmtů.

Chaotické chování řady systémů má určité společné vlastnosti, které nám umožňují *do jisté míry* předpovídat jejich budoucí vývoj.

Chaos přináší větvení vývojových trajektorií, přičemž některé vývojové trajektorie mohou obsahovat kolaps.

Co se týče dalšího vývoje systému, někdy dokážeme určit možné vývojové „scénáře“ avšak ne rozhodnout, který z nich to bude.

Pro složité systémy bývá často jistý parametr kritický a překročením jisté kritické hodnoty tohoto parametru nastává **kolaps**.

Kolaps jako specifický druh změny.

### ***Pro kolaps je typická neprediktabilita.***

Kolapsy jsou popsány speciální nelineární dynamikou, ta dokáže vystihnout onu neočekávanost a určit body, ve kterých se chování systému prudce změní.

Dynamika kolapsů je pro člověka zabývajícího se živými systémy (organismy, ekosystémy, globálním ekosystémem), důležitá proto, že kolapsy jsou charakteristickou transiční dynamikou pro složité systémy, ke kterým živé systémy patří.

Člověk nepochybně ovlivnil prostředí a toky látek a energie v organismech i ekosystémech.

Proto lze v některých případech předpokládat kolapsový přechod a tyto případy již byly pozorovány.

Dalším charakteristickým znakem dynamiky složitých systémů je přítomnost jevů *nevratnosti a hystereze*

Nevratnost znamená, že stav například po kolapsu nelze vrátit do stavu před kolapsem, tento jev je typický například pro některá eutrofizovaná jezera.

Někdy v přírodě pozorujeme u jednoho systému, např. ekosystému jezera dva možné (či více) stabilní stavy, které mohou přecházet jeden v druhý, pokud se mění hodnoty některých parametrů, tento jev nazýváme bistabilita.

Pokud se přechod od prvního stavu děje po jiné cestě, než přechod od druhého k prvnímu, setkáváme se s jevem hystereze, ovšem přechod od prvního ke druhému se děje jinak, než přechod od druhého k prvnímu.

Například v podmínkách horských lesů může jistá míra imisní zátěže způsobit rozpad ekosystému a jeho nahrazení méně komplexnějším společenstvem ostružiníku a vrbky, přičemž tento stav je za daných podmínek stabilní.

Ovšem ani pokles imisní zátěže do hodnot před kolapsem nevede k návratu původního lesa. K přepnutí do původního stabilního stavu je tak třeba radikálnější snížení imisní zátěže a regenerace degradovaného půdního prostředí.

To znamená, že dosažení původního stavu se děje po jiné vývojové trajektorii. Chování systému tedy nezáleží pouze na výchozích podmínkách, ale je určeno i jeho historií. Tento jev nazýváme **hystereze**.

Dalším příkladem je dynamika některých ekosystémů.

Například smrkový les v tajze se cyklickou sukcesí po čase střídá s březovým. Ale cesta od smrčiny k březině je dramaticky rychlým kolapsem (smrky stárnou, pak najednou popadají větrem, do polomu nalétnou semena břízy, zatímco cesta od březiny ke smrčině se děje sukcesí: břízy vyrostou, v jejich stínu se uchytlí smrky a ty časem břízu vystrnadí a převezmou vládu.

Tento stav tedy nezávisí pouze na výchozím stavu, ale i na historii vlastního procesu.

Kolaps často souvisí s kumulací menší změn v souladu se známým příslovím „*stokrát nic umořilo osla*“

K pochopení tohoto procesu nám může pomoci model *samoorganizovaného kritična* (autorem je statistický fyzik Per Bak)

Podle tohoto konceptu se složité systémy vyznačují postupnou kumulací drobných změn až do okamžiku, kdy dosáhnou takzvaného kritického stavu, v němž kolabují.

Někdy se systém sesype více, někdy méně, ale obecně zde platí zajímavá závislost, že totiž čím větší kolaps, tím je méně pravděpodobný.

Nejlépe to ilustruje slavný model hromady písku: plynulým přispíváním zrníček na vrcholek hromady písku se dosáhne takového sklonu svahu hromady, kdy další přispívání nezbytně vede ke vzniku různě velkých lavin, četnost těchto lavin má zajímavé statistické rozložení:

Čím větší je lavina, tím má menší frekvenci výskytu. Není přitom možné předpovědět, jak velká lavina se v daném okamžiku uvolní, lze učit pouze pravděpodobnost toho, jak velká bude.

Že tento model dokáže popsat procesy, které reálně nastávají v živých systémech, dokazuje například dynamika požárů v některých typech smrkových lesních ekosystémů.

Tyto smrkové porosty nejsou homogenní, ale mají jistou vnitřní strukturu, která spočívá v tom, že se v nich vyskytují různě stará vývojová stádia a celý ekosystém má v tomto smyslu určitou mozaikovitou strukturu. Jednotlivé díly této mozaiky tedy tvoří jakási zrna.

K požárům dochází až v zrnech jistého stáří, zde po požáru, který můžeme z hlediska jednoho zrna považovat za jakýsi kolaps, nastává fáze obnovy.

Mozaikovitost ekosystému, to že v jednom požáru nevyhoří všechna zrna, tuto obnovu usnadňuje.



Velké požáry jsou tedy díky struktuře ekosystému méně pravděpodobné, než požáry malé, podobně jako rozložení lavin u modelu hromady písku.

V Yellowstonském národním parku správa dlouho hasila ony drobné požáry v dobré víře, že tím prospívá ohraně ekosystému.

Tím ovšem došlo k homogenizaci systému a zániku mozaikovitosti, která v tomto případě měla autoregulační opodstatnění.

Došlo tedy ke kumulaci jistých drobných změn v systému, jednotlivých zrnech, čímž se zvýšila pravděpodobnost kolapsu většího rozměru, jak předpovídá model hromady písku.

Pak v roce 1988 skutečně vypukl nevladatelný požár, kterému podlely velké celky přestárlého lesního ekosystému.

V analogii k modelu hromady písku: větší lavina je sice méně pravděpodobná, ale vede k větší strukturální změně celé hromady písku nebo například lesního ekosystému.

Mezi frekvencí výskytu katastrofy a jejím rozsahem tedy platí nepřímá úměra, ovšem zvláštní v tom smyslu, že shodují řády: tzn. řádový nárůst rozsahu katastrofy, odpovídá řádovému poklesu její frekvence, proto se tato závislost zobrazuje v souřadnicích, kde je osa x i y logaritmická

Navíc zde vidíme zajímavý jev: kolapsová dynamika jednotlivých zrn ekosystému udržuje mozaikovitý ekosystém jako celek stabilní.

### **Důležité závěry z třetí přednášky:**

Systém je více než pouhá suma svých částí

Z termodynamického hlediska dělíme systémy na *otevřené* a *uzavřené*, zvláštním případem uzavřených systémů jsou systémy izolované.

V přírodě se setkáváme s živými systémy na dvou základních úrovních:

- na úrovni organismu
- na úrovni ekosystému

Ekosystém je heterogenní (hybridní) systém složený z biologického subsystému (obvykle biocenózy) a ze subsystému prostředí (tzv. ekotopu).

Žádný organismus si v přírodě nevystačí sám, každý je součástí nějakého ekosystému.

Ekosystémy mají, jako všechny systémy s autoregulací, jistou vnitřní strukturu a nezávisle na konkrétním typu ekosystému lze abstrakcí a redukcí získat schematický model ekosystému, v němž se vyskytují jisté funkce: induktor, regulátor, tlumič, hranice, rezervoár, modifikátor, které jsou spojeny s odpovídajícími nikami.

S tím souvisí pojem ekologické konvergence.

***Živé systémy (organismy a ekosystémy) mají následující důležité a charakteristické vlastnosti:***

- udržují homeostázu
- schopnost samoorganizace
- schopnost evoluce a růstu komplexnosti
- některé vykazují fraktální strukturu

***Živé organismy jsou typickými příklady otevřených systémů vzdálených od termodynamické rovnováhy.***

Pro popis změn a vývoje systémů (jejich dynamiky) je důležité porozumění pojmem  *vratný* a  *nevratný* proces.

Z hlediska samovolnosti průběhu dějů v přírodě (např. vedení tepla, difúze) je nevratnost popsána veličinou zvanou entropie (budeme se jí ještě hodně věnovat).

Samovolně vratné jsou ty děje, při nichž nedochází ke změně entropie.

Vývoj dynamického systému je popsán jistou křivkou (trajektorií) ve fázovém prostoru či fázovém diagramu.

Fázový prostor je množina všech možných stavů dynamického systému.

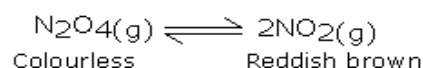
Část fázového prostoru nazýváme fázovým diagramem.

Pokud systém pozorujeme od jistého okamžiku  $t_0$ , pak množinu proměnných, popisujících systém v čase  $t_0$ , nazýváme počátečními podmínkami.

Vztah (eko)systému a jeho prostředí je důležitý pro pochopení vratnosti a nevratnosti jevů v prostředí, kde ještě existují gradienty a jejich změna (což prostředí na Zemi zcela jistě je, jinak by život nebyl možný).

Uvažujme, že se změní podmínky prostředí (z počátečních) a v důsledku toho dojde ke změnám v systému, následně se podmínky vrátí zpět k počátečním, pak pokud:

1. se systém navrátí do původního stavu hovoříme o vratnosti (stav systému určují pouze počáteční a konečné podmínky), viz příklad s oxidem dusičitým:



2. systém se do původního stavu nevrátí, pak hovoříme o nevratnosti

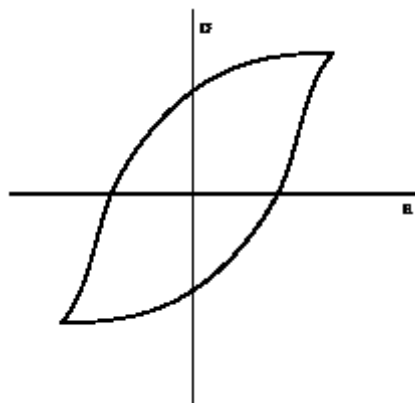
Další typickou vlastností složitých systémů je nelineární chování. Nelinearita přináší některé specifické druhy chování složitých systémů: **chaos, kolaps a hysterezi**.

**Chaosem** označujeme vlastnost některých nelineárních dynamických systémů, které jsou velmi citlivé vůči malé změně počátečních podmínek. Chaos přináší náhlé zmnožení možných vývojových trajektorií systému. O tom, po které z těchto možných trajektorií se bude systém dále ubírat, rozhoduje i nepatrná změna vnějších podmínek. Tuto citlivost popisujeme **efektem motýlího křídla**.

**Kolaps** je specifický druh velmi prudké změny v systému, může jít například o náhlou redukci biomasy, snížení úživnosti půdy. Příznačná je ona náhlost a skokový charakter změny důležité veličiny popisující systém.

Vzhledem ke změnám v životním prostředí způsobených antropogenní činností, lze v některých případech silně ovlivněných ekosystémů předpokládat kolapsovou transitní dynamiku.

Pro demonstraci jevu **hystereze** uvažujeme fázový diagram popisující systém, který má dva stabilní stavy: pak pokud se přechodové trajektorie z jednoho stavu systému do druhého různí, hovoříme o hysterezi, aktuální stav systému totiž neurčují pouze počáteční podmínky, ale i jeho historie.



Uvedli jsme si několik příkladů hystereze u živých systémů.

Složité systémy se mohou vyznačovat postupnou kumulací drobných změn až do okamžiku, kdy dosáhnou takzvaného kritického stavu, v něm kolabují, což přibližuje například model hromady písku.