

# Modelování a simulace komplexních systémů\*

RADEK PELÁNEK

## 1 Úvod

S: Podívej, pořídil jsem si novou knihu.

M: Nechápu, proč si v dnešní době ještě kupuješ knihy. Všechno najdeš na internetu.

S: To je ta dnešní mládež, všechno by hledala na internetu. Jenže abys něco našel na internetu, nejdřív potřebuješ vědět, co vlastně máš hledat. Navíc intelektuální stravování na internetu se podobá stravování ve fast-foodu: rychle, levně, nekvalitně a většinou si k tomu dáš nezdravý zákusek, který jsi původně vůbec nechtěl.

M: Přestaň mě poučovat a raději mi řekni, o čem je ta tvoje nová kniha?

S: Jmenuje se „Modelování a simulace komplexních systémů“. Modely určitě znáš: třeba mapa jako model terénu nebo autíčko na hraní jako model reálného auta. Tady v té knize se mluví o výpočetních modelech. Představ si třeba počítačový model pohybu koulí na kulečnickovém stole — model tvoří rovnice popisující pohyb koulí, simulací tohoto modelu dostáváš obrázek na monitoru, který vizualizuje pohyb koulí.

M: A co je na tom komplexního?

S: Správný postřeh. Kdybys mě nechal domluvit, hned bych se k tomu dostal. Kulečnickový stůl je jednoduchý systém, podobně jako třeba soustava kladek. Tady v té knize ale jde o komplexní systémy, což jsou systémy, které se skládají z mnoha vzájemně provázaných částí — například počasí, mozek nebo tvůj oblíbený internet.

M: A proč sis pořídil zrovna tuhle knihu? Co tě na tom láká?

S: Já mám takové jednoduché základní kritérium, jestli se něčím zabývat: mělo by to být současně důležité, aktuální a zajímavé. Tak především člověk by se měl snažit v životě dělat něco důležitého. Samotná důležitost ale nestačí. Studium způsobů šíření moru bylo ve středověku jistě velmi důležité, ale dneska

---

\* Stat' obsahuje úryvky z knihy doc. Mgr. Radka Pelánka, Ph.D., Modelování a simulace komplexních systémů (jak lépe porozumět světu), kterou vydala Masarykova univerzita v loňském roce.

tím svět nezachráníš. Takže je potřeba, aby téma bylo i aktuální. Krom toho je potřeba, aby mi téma přišlo zajímavé. Jinak za chvíli ztratím motivaci a stejně nic moc nevymyslím.

M: Kritérium se mi líbí. A tohle téma jej splňuje?

S: Já myslím, že určitě. Až do nedávna se lidé snažili rozkládat problémy na dílčí podsystémy a řešit tyto dílčí jednoduché systémy. Mnohé z dnešních problémů jsou však ze své podstaty komplexní a nejdou rozložit na podproblémy – změny klimatu, celosvětové epidemie, globální ekonomika. Až do nedávna takové složité problémy ani přímo moc řešit nešly, ale teď máme k dispozici počítače, díky kterým můžeme dělat spoustu nových věcí – třeba simulace. Takže je to důležité a aktuální. Navíc je to rozhodně i zajímavé. Kdybys nevěřil, můžu ti ukázat pár konkrétních simulací.

M: Dobrá, dobrá, docela jsi mě nalákal, jenže teď zrovna nemám čas. Musím psát seminární práci o králících. Náš učitel je navíc nějak podezřele moderní a chce po nás, aby práce byla interdisciplinární a aby obsahovala interaktivní prvky. Tak nevím, co si s tím počnu...

S: Možná by se ti mohlo hodit třeba právě modelování.

M: . . . ale internet mě určitě zachrání.

## 1.1 O tématu

Téma této knihy shrnuje její název: „Modelování a simulace komplexních systémů“. Pojmy uvedené v názvu se však používají v mnoha různých významech, a proto raději hned na začátku upřesníme, v jakém významu jsou používány v této knize.

### Modelování a simulace

S modelováním se každý z nás setkává již od dětství, kdy jsme se zaujetím simulovali srážku dvou aut nebo život v plyšovém pralese. V této knize se však nebudeme zabývat takovýmito fyzickými modely, ale zaměříme se na modely výpočetní, které definují pravidla proveditelná na počítači. Jak uvidíme, provádění simulací na počítači je často téměř tak dobrodružné jako srážky autíček. Navíc využití počítačových modelů nám velmi rozšiřuje možnosti. Málokdo z nás má tak bohaté rodiče, aby mu pořídili malou planetku, kterou by mohl osřelovat asteroidy nebo si na ní zkusit důsledky pomalého ohřívání atmosféry.

Abyste si čtenář udělal představu o tom, čím se kniha zabývá, uvedeme jednoduchý příklad populační dynamika králíků a lišek. Nejjednodušší model můžeme sestavit pomocí matematických rovnic, které popisují vzájemnou závislost celkového počtu králíků a lišek. Rovnice například říká, že když je hodně krá-

líků a málo lišek, tak bude lišek výrazně přibývat (malá konkurence, hodně potravy). Rovnice následně řešíme pomocí počítače a výsledkem řešení je graf, který udává například vývoj celkového počtu králíků v čase.

Další možností je použít model s agenty. Agenti jsou jednotlivá zvířata pohybující se po vymezeném prostoru. Králíci žerou trávu, lišky honí a žerou králíky, všichni se množí a umírají podle svých energetických zisků a stárí. Simulace modelu je grafická – vidíme pohyb jednotlivých tvorů. Výsledky simulace můžeme samozřejmě také číselně zpracovat a vyjádřit třeba opět grafem.

Můžeme vyrobít také evoluční model, ve kterém jedince reprezentujeme řetězcem „genů“ a simulujeme vzájemnou koevoluci králíků a lišek, např. vývoj dlouhých uší králíků jako evoluční přizpůsobení v prostředí, ve kterém lišky loví neopatrné králíky. Výsledky simulace mohou být například statistiky o průměrném zastoupení genů a o nejuspěšnějších jedincích v jednotlivých generacích.

K příkladu s králíky a liškami se detailněji vrátíme v druhé části knihy. Zde pro ukázkou uvádíme ještě obr. 1.1, který ukazuje, jak mohou vypadat výstupy simulace výpočetního modelu (nejen s králíky). Všechny uvedené příklady jsou blíže rozebrány v dalších kapitolách.

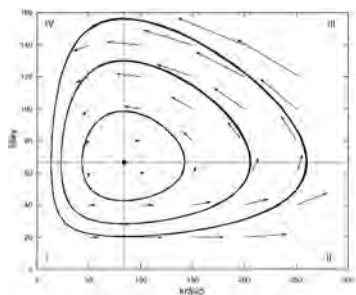
## Komplexní systémy

Komplexní systémy jsou systémy sestávající z mnoha částí, které jsou spolu komplikovaným způsobem provázané a složité se vzájemně ovlivňují. Příklady komplexních systémů jsou třeba mraveniště, mozek, firma, internet nebo počasí.

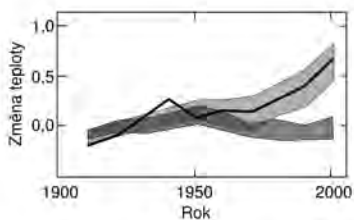
Komplexní systémy jsou všude kolem nás. Přemýšlení o těchto systémech však stále spadá spíše do oblasti filozofie, exaktní vědy se zabývají systémy relativně jednoduchými (k významu slov komplexní a jednoduchý se podrobněji dostaneme v další kapitole). Čím to je? Jeden z Murphyho zákonů říká: „Když máte v ruce kladivo, všechno na světě vám připadá jako hřebík.“ Sofistikovaněji rozebírá tento princip Thomas Kuhn ve své známé knize o paradigmatech (Struktura vědeckých revolucí). Lidé, vědce nevyjímaje, mají tendenci vidět jen problémy, jež jsou schopni pochopit a řešit pomocí nástrojů, které již mají k dispozici.

Hlavním nástrojem, jež si vědci během posledních 2000 let oblíbili, je matematika. Problém zachytíme pomocí matematických rovnic a tyto rovnice analyzujeme. Uvedený nástroj je pro mnoho problémů velice efektivní, ovšem jeho potenciál je omezený – dokážeme analyzovat pouze rovnice, které mají relativně omezený počet proměnných. Tento efektivní nástroj (kladivo) tedy do velké míry určoval problémy, které vědci řeší, případně jak se na problémy dívají (jako na hřebíky).

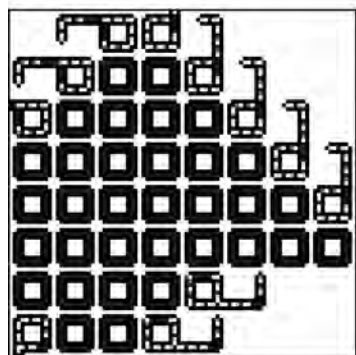
S příchodem počítačů se otevřely nové možnosti, které jednak umožňují lepší práci s klasickými nástroji (počítačová analýza rovnic) a jednak zcela nové přístupy, jako je třeba právě výpočetní modelování a simulace. Tyto přístupy umož-



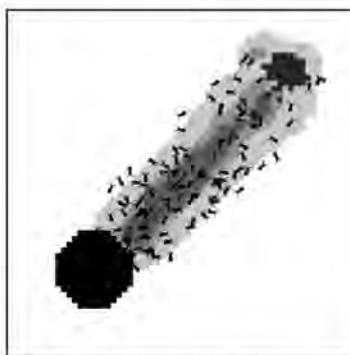
Dynamika populace králíků a lišek



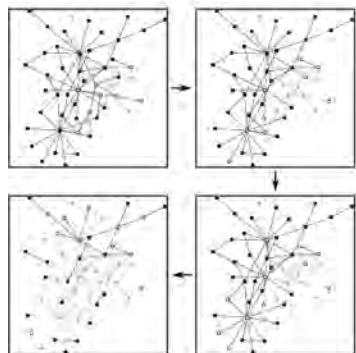
Sumární výstupy z klimatických modelů



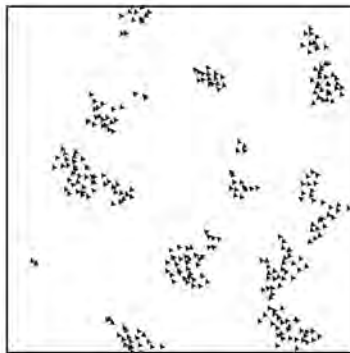
Sebe-reprodukcující se cykly



Mravenci: sběr potravy



Šíření epidemie v sociální síti



Umělé hejno

Obr. 1.1: Ukázky výstupů simulací popsanych v knize

ňují analyzovat výrazně složitější systémy než klasický matematický aparát. A tak vědci najednou zjišťují, že kromě problémů, které dlouhou dobu studovali, tu jsou celé oblasti, jichž si nikdo pořádně nevšiml.

Během posledních pár let se objevuje řada nových oborů, např. generativní sociologie, výpočetní ekonomie, systémová biologie, věda sítí, bioinformatika. Všechny nabízejí nový pohled na tradiční disciplíny pomocí počítačových simulací a analýz. Tyto obory mají také mnoho společného – hledání těchto společných prvků bývá označováno jako věda komplexních systémů.

## 1.2 Proč se modelováním zabývat?

V současnosti stojíme před mnoha problémy, které jsou vzájemně složitě propojeny a nelze je jednoduše zařadit do žádné tradiční vědecké disciplíny: změny klimatu, znečištění životního prostředí, náboženský a národnostní extremismus, rostoucí sociální nerovnosti, epidemie AIDS, ilegální přistěhovalectví, docházející neobnovitelné zdroje. Tyto problémy nelze řešit redukcionisticky rozsekáním na dílčí části a detailní analýzou izolovaných podproblémů nemůžeme studovat změny klimatu či společnosti v Evropě, aniž bychom vzali v potaz ekonomický růst Číny či demografii Afriky. Abychom mohli problémy tohoto typu řešit, potřebujeme se učit přemýšlet o komplexních systémech.

Modelování a simulace jsou velmi užitečné nástroje, které nám k tomu mohou dopomoci. Díky modelům můžeme dělat předpovědi, odhadovat dopad různých zásahů do systémů a lépe plánovat naše akce. Kromě těchto konkrétních výsledků jsou však modely velmi důležité i na mentální úrovni – pouhá práce s modely výrazně ovlivňuje náš způsob myšlení a nahlížení na svět. Modely nás nutí jasně formulovat naše mlhavé představy. Simulace nás konfrontují s důsledky těchto představ. Modelování a simulace také umožňují sdílení myšlenek a tolik potřebné předávání informací mezi odborníky z různých oborů.

Modelování a simulaci používají lidé již dlouho, dříve se však používaly především v technických oborech při řešení relativně jednoduchých problémů (např. návrh součástek, zkoumání statiky mostu). Příchod výpočetní techniky však umožnil rozšíření výzkumných obzorů dvěma způsoby: máme k dispozici daleko víc dat a můžeme je daleko lépe zpracovávat a modelovat. Uvažme takové zákony gravitace. Na jejich objevení musí být člověk velmi chytrý, ale počítače k tomu nepotřebuje: potřebná data si naměří ručně, zapíše do deníku, výsledné rovnice obsahují jen pár proměnných, a tak je lze zvládnout řešit ručně.

Jenže co takové chování lidské společnosti, hejna ptáků nebo počasí? Tyto systémy je potřeba zkoumat v celku, nelze je rozsekát na části a ty samostatně analyzovat. Popsat chování celku je ovšem zapeklitě komplikované, nestačí nám k tomu pár pozorování a rovnice s několika proměnnými. Ke zkoumání těchto systémů jsou počítače nezbytné, a to ze dvou důvodů. Za prvé můžeme pomocí počítačů ve velkém sbírat a zpracovávat data, např. data o vztazích mezi lidmi

na základě telefonátů a e-mailů, data o pohybu ptáků s použitím GPS technologie nebo data o počasí z propojené sítě meteorologických stanic rozestých po celém světě. Za druhé pak můžeme vytvářet rozsáhlé modely těchto systémů.

Počítače, které jsou pro tyto účely dostatečně výkonné a současně dostupné, aby se daly používat pro zkoumání ve velkém, mají lidé k dispozici teprve od konce 20. století. Výzkum v této oblasti je tedy teprve v začátcích – značná část technik a příkladů, kterými se budeme zabývat, pochází z období posledních dvaceti let.

Simulace výpočetních modelů jsou však nejen důležité a aktuální, ale také zajímavé, především svými vizuálními výstupy. Přinejmenším dostáváme grafy, které znázorňují chování systému v čase. Často se nám však přímo před očima odehrává vývoj modelovaného systému, můžeme sledovat postup hurikánu, mravence sbírající potravu, soutěžící agenty, vznik zácpy na silnici nebo vývoj pohybového aparátu imaginárního organismu. Vizuální výstupy jsou pochopitelné i pro laiky. Dobře zpracovaná simulace dává smysl a přináší pochopení i bez detailní znalosti technik, které model využívá.

Dobrý model komplexního systému může přinést překvapivé výsledky, ba i nabourat naše zaběhané stereotypy. Lze ukázat, že i jednoduchá pravidla mnohou vést k velmi složitému chování, náhoda může být základem řádu, hejno nepotřebuje vůdce, segregace může vzniknout i při vysoké toleranci jednotlivců nebo že i pro soutěživé egoisty může být nejvýhodnější spolupráce. Ani dobrý model sám o sobě svět nezmění. Model však může změnit náš pohled na svět. Zbytek už je na nás.

\* \* \*

### 3.1 Intuitivní myšlení

*Dějiny lidstva se stávají čím dál více závodem mezi vzděláním a katastrofou.*  
(H. G. Wells)

Hlavním cílem této kapitoly je přesvědčit čtenáře, že s pouhou intuící nevystačíme a že se vyplatí věnovat pozornost vlastnímu myšlení, hledat v něm chyby a trénovat ho. Intuitivní myšlení (selský rozum) je rozhodně úžasná věc, protože nám umožňuje fungovat v běžném životě a dělat spoustu věcí automaticky. Kdybychom měli nad vším složitě spekulovat, nejspíš bychom se zbláznili a nic nevymysleli. Intuitivní myšlení je nicméně uzpůsobeno pro přemýšlení o jednoduchých systémech. V minulosti to většinou stačilo, člověk se zabýval jednoduchými systémy a případně komplexní systémy, které ho obklopovaly (např. počasí), stejně ovlivnit nemohl, takže moc nevadilo, když o nich přemýšlel scestně.

Dnes se ovšem komplexním systémům nevyhneme, dokonce se ani nevyhneme tomu, abychom je ovlivňovali. Najednou nám intuitivní myšlení přestává dostačovat. Než se vrhneme na přehled alternativních stylů myšlení, pojďme se podívat na několik typických problémů intuitivního myšlení.

## Lineární uvažování

I když skutečné systémy jsou často nelineární, lidé mají přirozenou tendenci extrapolovat trendy a hledat lineární závislosti. Tendence k lineárnímu uvažování byla prokázána i psychologickými výzkumy. Účastníci experimentu dostali sekvenci bodů a měli za úkol odhadnout polohu dalšího bodu v řadě. Lidé měli tendenci proložit body přímkou a podle ní odhadovat polohu následujícího bodu, a to i tehdy, když body ležely na exponenciální křivce (Sterman, 2000). Prakticky si může čtenář ověřit tuto tendenci například sledováním prognóz cen ropy nebo nemovitostí. Ačkoliv tyto ceny jsou značně nestálé a kolísavé, prognózy komentátorů v médiích často odpovídají lineární extrapolaci posledního vývoje.

Tendenci k lineárnímu myšlení pěkně ilustruje známý příklad s řasami na rybníku. Představme si velký rybník. V rybníku se objevily řasy a začaly se rychle množit. Množí se tak rychle, že se jejich počet každý den zdvojnásobí. První den je jich velmi málo, nicméně pokud nedojde k žádnému zásahu, tak během třiceti dní pokryjí celý rybník. Správce rybníku pozoruje, jak se mu postupně na rybníku množí řasy, protože jich však je na začátku málo, tak si říká, že s tím není třeba nic dělat. Pro zásah se rozhodne, až když bude polovina rybníku zamořená řasami. Kolik času mu zbude na řešení problému?

Pokud si člověk pořádně přečte zadání a chvíli se zamyslí, řešení je velmi jednoduché. Úloha sama o sobě tedy není příliš zajímavá, zajímavé je, že většina lidí, stejně jako správce vystupující v zadání, v první chvíli problém podcení a myslí si, že času zbude víc. Podvědomě totiž používáme lineární závislosti, nikoliv exponenciální. „Když 25% nárůst koncentrace  $\text{CO}_2$  v atmosféře způsobil nárůst teploty o  $0,5\text{ }^\circ\text{C}$  a žádné zásadní změny klimatu, tak nárůst o dalších 25 % taky nic moc nezmění.“ To je přece jasné. Nebo ne?

## Krátkodobý výhled

Ve společnosti lovců a sběračů nemělo dlouhodobé plánování příliš význam. V současné době má dlouhodobý výhled význam zásadní, nicméně naše myšlení zůstává často na úrovni lovců a sběračů. Dlouhodobý výhled nám nejde.

Krátkodobý styl myšlení ilustruje známý příběh o žábě. Pokud hodíte žabu do horké vody, rychle vyskočí a nic moc se jí nestane. Pokud ji dáte do studené a pomalu ohříváte, uvaří se, protože ve chvíli, kdy už chtěla z vody vyskočit, má svaly natolik zesláblé, že se jí vyskočit nepodaří. Z biologického pohledu tento příběh není zcela reálný (není nutné, abyste doma vařili žáby a ověřovali pravdivost, již to za vás udělali vědci). Nicméně i tak jde o užitečnou metaforu.

Pro komplexní systémy je charakteristické, že zásahy s pozitivním dlouhodobým efektem často vedou ke krátkodobému zhoršení. Ovšem vzhledem k našemu krátkodobému myšlení a krátkodobému způsobu fungování našich organizací bývá velký problém dlouhodobě výhodná řešení prosadit – konkrétně například prosazování důchodové reformy v demokratických režimech.

## Zjednodušené uvažování o příčinách

Lidé mají rádi jednoduchá vysvětlení. Následky, hlavně ty špatné, si žádají jasné příčiny. Nastalo X, protože Y. Druhá světová válka vypukla, protože Hitler byl schopný demagog. Teplota stoupá, protože stoupá koncentrace CO<sub>2</sub>. Eva opustila Martina, protože Martin příliš pije. Jednoduchá vysvětlení dělají svět pochopitelnějším. My chceme svět chápat.

V uvažování o příčinných vztazích se dopouštíme hned několika chyb. První typickou chybou je uvažování stylu „poté, tedy proto“, odborně nazývané „zaměnění konsekvence za kauzalitu“. Šaman provedl rituál a poté začalo pršet. Dobrá, šamany už jsme prokoukli, takže příliš nevěříme, že by déšť byl důsledkem šamanova rituálu. Ale co když centrální banka sníží úrokovou míru a stav ekonomiky se následnělepší, když fotbalový tým vymění trenéra a následně výsledky jsou mizerné nebo když finanční krize v zemi A následuje po finanční krizi v zemi B? Dokážeme i v těchto situacích dobře rozlišit konsekvenci a kauzalitu a nepodlehnout zjednodušenému vysvětlení?

Další typickou chybou, které se často dopouštějí i vědci, je „zaměňování korelace kauzality“. Pokud dvě veličiny na sobě vykazují závislost při vynesení do grafu (korelace), ještě to vůbec neznamená, že jedna z nich přímo ovlivňuje druhou (kauzalita). Typickými příklady jsou třeba počet zapalovačů v domácnosti a výskyt rakoviny plic nebo kvalita sportovního vybavení a podávaný sportovní výkon. V druhém případě drobná kauzalita jistě existuje, nicméně to není hlavní důvod dobré korelace. Záměna korelace za kauzalitu nás v těchto příkladech může vést k tomu, že v rámci boje proti rakovině plic zakážeme zapalovače a místo tréninku budeme nakupovat. Tyto příklady jsou záměrně naivní, takže chybu uvažování snadno prokoukneme. Avšak ve chvíli, kdy jsou položky trochu složitější, lidé tuto chybu dělají velmi snadno.

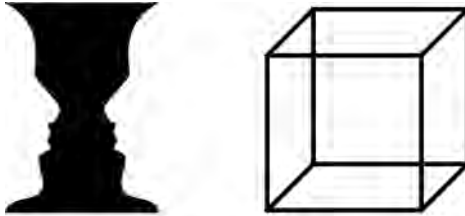
Jednoduché vztahy se však v komplexních systémech vyskytují málokdy. Jednoduchá vysvětlení jsou většinou špatná. Následky mají většinou více různých příčin a tyto příčiny mají různou míru vlivu. Často ani neexistuje jasné rozdělení na příčiny a následky, systém ovládá zpětná vazba. Tají ledovce, protože roste teplota planety, nebo roste teplota planety, protože tají ledovce a tím se snižuje albedo (odrázivost) planety? Zpětné vazby jsou natolik důležité téma, že jim věnujeme celou další kapitolu.

## Ovlivnění paradigmatem

Naše uvažování o světě je založeno na informacích, které získáváme z okolí. Už tyto „vstupní“ informace jsou ovšem často zkreslené. Máme svůj pohled na svět a je pro nás těžké vidět věci, které nejsou v souladu s tímto pohledem. Pohled na svět se často označuje jako „paradigma“ tento termín rozšířil do obecného povědomí T. Kuhn ve své knize *Struktura vědeckých revolucí*, ve které se zabýval vlivem paradigmatu na vývoj vědy.



Paradigma má vliv nejen na vědu, ale i na naše každodenní vnímání. Máme o světě kolem nás svoje představy a očekávání. Vjemy, které z okolí získáváme, podvědomě filtrujeme, aby odpovídaly těmto očekáváním. Názornou ilustrací této tendence jsou známé optické klamy, které mohou znázorňovat dvě různé věci (obr. 3.1), ve kterých však lidé často vidí pouze jednu z nich a je pro ně náročné uvidět druhou možnost.



Obr. 3.1: Váza, nebo dvě tváře? Pohled na krychli je zespodu, nebo shora?

Podobnou tendenci ukázal výzkum s rozpoznáváním karet, ve kterém bylo měřeno, za jak krátký časový interval dokáží účastníci experimentu rozpoznat ukázanou kartu (Bruner, Postman, 1949). Kromě běžně používaných karet byly použity i nestandardní karty, např. černá srdcová. Ve svých odhadech účastníci experimentu pravidelně přizpůsobovali karty svým očekáváním (například místo černé srdcové hlásili červenou srdcovou nebo černou křížovou) a na správné rozpoznání nestandardních karet potřebovali výrazně více času než na rozpoznání standardních.

Dalším problémem, který komplikuje naše objektivní vnímání skutečnosti, je tendence hledat potvrzení toho, čemu věříme, místo potenciálních vyvrácení. Tento princip názorně ukazuje další experiment (Wason, Johnson-Laird, 1972). Představte si, že dostanete čtyři karty. Na každé kartě je z jedné strany písmeno a z druhé číslo. Vaším úkolem je zjistit, zda platí pravidlo, že karty se samohláskou na jedné straně mají sudé číslo na druhé straně. Jsou vám ukázány karty E, K, 4 a 7. Jaký je nejmenší počet karet, které musíte otočit? Které to jsou? Experimenty ukázaly, že drtivá většina lidí zvolí karty E a 4, tj. snaží se hledat potvrzení hypotézy místo toho, aby opravdu prokázali, že hypotéza platí (k čemuž je potřeba otočit karty E a 7).

Naše paradigma, tedy to, čemu věříme, také ovlivňuje, čeho si všímáme a s jakými informacemi pracujeme. Když několik nezávislých měření začalo ukazovat na problém ozónové díry, vědci z NASA začali zkoumat, proč měření z jejich satelitu trend snižující se hladiny ozónu neukázala. Zjistili, že měřicí zařízení bylo naprogramováno tak, aby nízká měření zamítlo. Návrháři přístroje předpokládali, že tak nízký výsledek musí být způsoben chybou měření (Meadows et al., 2004).

Jak je vidět, nejen naše uvažování, ale už naše vnímání skutečnosti může být hodně zkreslující. Co s tím můžeme dělat? Zcela se zkreslení nikdy nevyhneme, ale pokud si jsme hrozícího zkreslení vědomi, můžeme se alespoň snažit mu příliš nepodlehout. Darwin prý u sebe stále nosil deníček, do kterého si zapisoval pozorování, která nebyla v souladu s jeho teoriemi. Všiml si totiž, že má tendenci pamatovat si to, co se mu hodí do teorií, a zapomínat to, co se mu nehodí.

## Neintuitivnost komplexních systémů

*Nemůžeme řešit problémy stejným stylem myšlení, jakým jsme je vytvořili.*

(A. Einstein)

Když porovnáme seznam charakteristik komplexních systémů a častých chyb lidského myšlení, není divu, že komplexní systémy se chovají často velmi neintuitivně a naše zásahy do nich mají nežádoucí důsledky.

Příkladem neintuitivního chování jsou požáry v amerických národních parcích. Správa národních parků se jistý čas snažila požáry systematicky hasit. Přestože cílem tohoto opatření bylo chránit přírodu, výsledný efekt byl spíše opačný. Místní ekosystémy jsou přizpůsobeny pravidelným požárům a například sekvoje požáry potřebují pro vyklíčení svých semen. Díky hašení se navíc kumulovalo velké množství suchého dřeva a jednou za čas vznikl tak velký požár, že jej nebylo možné uhasit. Podobný efekt mají některá protipovodňová opatření, která narušují místní ekosystémy a vedou k méně častým, ale o to silnějším povodním.

Dalším typickým příkladem je budování silnic. Když postavíme více silnic, tak bude méně zácp. To je jasné, ne? Bohužel ne. Budování silnic má více dopadů než jen pouhé zvýšení kapacity. Silnice zvyšují atraktivitu místa a tím přilákají více lidí. Když je víc silnic, tak si víc lidí koupí auto – vidím, že se staví silnice, tak si koupím auto a dům na druhém konci města. Výdaje na silnice mnohou znamenat omezení hromadné dopravy a o to větší nárůst automobilistů. Celkově tedy nové silnice znamenají nejen novou kapacitu, ale i nová auta a nové zácpy. Uvedený popis není (jenom) pesimistický strašák environmentálně laděného cyklisty, ale popis reálného vývoje například v Londýně nebo Los Angeles (Sterman, 2000).

Příklady neintuitivnosti komplexních systémů je kolem nás celá řada: informační technologie a „bezpapírová kancelář“ vedoucí ke zvýšené spotřebě papíru, zařízení šetřící čas vedoucí k nedostatku času, bezpečná auta vedoucí k nebezpečné jízdě, zákaz potratů, který má velmi malý efekt na množství potratů a porodnost.

Situace je o to horší, že lidé nejen často uvažují chybně, ale ještě k tomu mají přílišné sebevědomí a ve své uvažování a odhady pevně věří (Sterman, 2000). Tento fenomén byl důkladně prozkoumán experimenty, ve kterých lidé odpovídali na otázky a odhadovali svoji úspěšnost – výsledky systematicky ukazují, že lidé si věří daleko víc, než je oprávněné. Podle výsledků experi-

mentů se zdá, že jediní, kdo mají realistický odhad, jsou profesionální hazardní hráči a lidé zabývající se předpovědí počasí.

Konkrétní zajímavý příklad přílišného sebevědomí ukazuje průzkum názorů expertů na klimatické změny (Nordhaus, 1994) – experti se měli vyjádřit k pravděpodobnému dopadu klimatických změn na ekonomiku. Výsledky průzkumu ukázaly, že ekonomové odhadují dopad klimatických změn na ekonomiku daleko mírněji než klimatologové. To samo o sobě není až tak překvapivé. Co je překvapivé, je důvěra, jakou zúčastnění experti měli ve svoje odhady. Každý z nich měl určit interval 90% jistoty svého odhadu. Intervaly jistoty byly často natolik úzké, že vylučovaly názory většiny ostatních expertů.

Jakmile máme co do činění s komplexními systémy, musíme tedy být velmi ostražití a nepodlehnout nástrahám našeho příliš zjednodušujícího intuitivního myšlení. Podívejme se tedy trochu podrobněji na to, jak vlastně přemýšlíme...

\* \* \*

## 5.1 Základní myšlenky o modelování

Než se začneme zabývat konkrétními způsoby modelování, proberme ústřední myšlenky, které se k modelování a simulaci váží. Úplně nejdříve si však ujasněme vztah mezi těmito dvěma pojmy. Při modelování vytváříme model. Při simulaci bereme již vytvořený model a uvádíme jej „do pohybu“ a sledujeme jeho chování v různých situacích. Někdy může být smysluplné zabývat se pouze jednou z těchto činností, např. sochu můžeme chápat jako model, se kterým neděláme simulace, simulace dopravních nehod můžeme provádět s reálnými auty (a tedy bez použití modelování). Nicméně v této knize se budeme zabývat vždy modelováním a simulací dohromady a budeme tyto pojmy používat relativně volně.

### Modely jsou špatné

*Všechny modely jsou špatné. Některé modely jsou užitečné.*

(G. Box, W. E. Deming)

Základní myšlenka modelování je vyjádřena výše uvedeným citátem (citát je připisován oběma zmíněným autorům). Co ten citát vlastně říká? Všechny modely jsou špatné. Model je vždy zjednodušením, abstrakcí reality, jinak by to nebyl model. Model tedy nikdy nemůže být úplně dobře. Vždy se něčím od reality liší. Některé modely jsou užitečné. Model může být užitečný právě díky zjednodušením. Dobrý model vybírá důležité aspekty reality a ty nepodstatné skryje, čímž nám pomáhá lépe o realitě uvažovat. Samozřejmě jen některé modely jsou užitečné, zdaleka ne všechny.

Uvedme si konkrétní příklad, který všichni dobře známe: mapa. Mapa je model prostoru. Mapa je špatná, protože je to abstrakce reality: neobsahuje

všechny detaily a dochází u ní ke zkreslení. Jak každý z vlastní zkušenosti jistě potvrdí, sebelepší mapa má řadu chyb. I přesto je mapa velmi užitečná, a to z mnoha důvodů: pochopení reality (mapa jako výuková pomůcka), plánování akcí (kterou cestou se mám vydat) nebo usnadnění komunikace (potkáme se na tomto místě).

Souvislosti: Příklad s mapou je často používaný, více jej rozvádí například Holland (1995).

### Jednoduchost a účel

*Hledej jednoduchost a nevěř jí.* (A. N. Whitehead)

*Všechno by mělo být tak jednoduché, jak je to jen možné, ale ne jednodušší.* (A. Einstein)

*Věda může být popsána jako umění systematického přílišného zjednodušování.* (K. Popper)

Jeden z hlavních principů při modelování zní: Nemodelovat systém, modelovat problém. Aby byl model užitečný, musí mít jasný účel. Pokračujme s příkladem s mapou – máme různé mapy, každou pro specifický účel (např. automapy, cyklomapy, turistické mapy, vodácké mapy), univerzální mapa by byla k ničemu.

Musíme si jasně zvolit účel modelu a potom se snažit udržovat model co nejjednodušší. Jedním z rizik modelování je naivní realismus, snaha udělat model co nejvěrnější a nejpřesnější. V tomto ohledu výkonné počítače modelování občas ztěžují – dříve byl modelář nucen udělat model abstraktní a jednoduchý, dnes mu počítač umožní vytvořit model, který je detailní, složitý, efektně vypadá, ovšem neposkytuje odpověď na žádné otázky.

Snažíme se tedy pracovat s jednoduchými modely, současně však musíme stále pamatovat, že pracujeme pouze s modely, a ne s realitou. Nesmíme zapomínat na zjednodušení, která model nese. Jak praví východní moudrost: Neplést si prst ukazující na měsíc s měsícem samotným. Jde o zdánlivě triviální fakt, který však může být zdrojem mnohých problémů a nedorozumění. Například při plánování cesty na horách snadno zapomeneme, že na mapách nejsou bouřky. Podle novinových titulků to vypadá, že zapomínáme, že HDP je jen zjednodušeným modelem pro měření vyspělosti státu.

### Modelování jako umění

*Umění je lež, která nám pomáhá uvědomit si pravdu.* (P. Picasso)

S modelováním je to podobné jako s uměním. Dobrý model nereprodukuje skutečnost co nejpřesněji, ale naopak ji záměrně zjednodušuje a tím nám pomáhá pochopit alespoň část komplikované reality. Tato spojitost mezi modelováním a uměním není náhodná. Modelování komplexních systémů totiž není jenom věda, ale do značné míry také umění.

Pro ilustraci uvedme citát z vědecké zprávy Mezinárodního panelu pro klimatické změny (IPCC): „Plně uznáváme, že mnohá z uvedených tvrzení jsou do jisté míry založena na subjektivním vědeckém vnímání a obsahují komunitní a osobní vědomosti. Například pouhý výběr proměnných a procesů, které jsou do modelu zahrnuty, je většinou založen pouze na dojmech a zkušenostech modelovací komunity.“

\* \* \*

### III Případové studie

#### 12.3 Samoorganizace

Jedním ze zajímavých principů života je schopnost samoorganizace, která se projevuje na mnoha úrovních. Od jednobuněčných organismů až po skupiny lidí. Se samoorganizací souvisí dále pojmy jako centralizované řízení a emergentní chování. Zde se nebudeme pouštět do podrobnějších rozborů pojmů, zvolíme raději ilustraci na příkladech.

I když se v této části objevují jména živočichů, jsou uvedené modely značně abstraktní a rozhodně neslouží jako věrný popis chování konkrétního druhu. Cílem modelů je pouze ilustrovat aspekty, které se týkají samoorganizace.

#### Mravenci

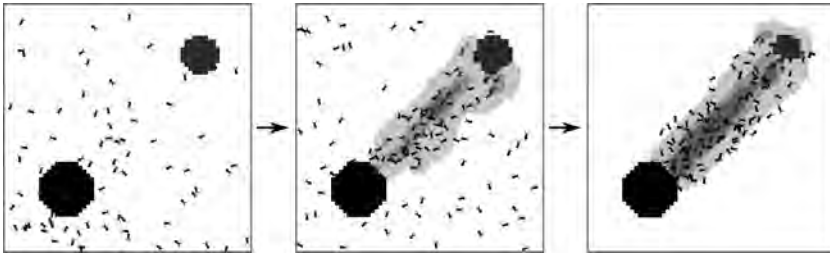
*Jdi k mravenci, dívej se, jak žije, ať zmoudříš. Ač nemá žádného vůdce, dozorce či vládce, opatřuje si v létě pokrm, o žních sklízí svou potravu.*

(Přísloví 6:6 8)

Postupme ve vývojovém žebříčku o krok dále. Mravenci jsou jeden z nejúspěšnějších živočišných druhů a v mnoha ohledech přinejmenším konkurují namyšleným pánům tvorstva, např. obývají téměř celou planetu a tvoří až 15 % biomasy tropických pralesů. Kromě toho, že jsou úspěšní, jsou také velmi zajímaví. Mravenci (a obecněji i sociální hmyz) jsou typickou ukázkou decentralizovaného, samoorganizujícího se systému. Označení mravenčí královna, které připomíná hierarchické uspořádání středověké lidské společnosti, je v tomto případě zavádějící. Mravenčí královna je spíše stroj na kladení vajíček nežli řídicí element.

Mravenci jsou také pěkným námětem pro modelování, konkrétně pro modelování s agenty. Zde popíšeme jednoduchý model sběru potravy. Agenti představují mravence. Jako prostředí používáme dvourozměrnou plochu, ve které je umístěno mraveniště a zdroj potravy. Prostředí může nést feromonové stopy a agenti-mravenci se pohybují náhodně po prostoru a při pohybu upřednostňují směr, ve kterém je vyšší koncentrace feromonu. Pokud mravenec narazí na potravu, tak ji zvedne a vydá se směrem do mraveniště – model zjednodušeně

předpokládá, že mravenec cestu zpět najít umí. Cestou do mraveniště mravenec vypouští feromon, který se postupně vypařuje.



Obr. 12.4: Mravenec a sběr potravy. Velký černý kruh představuje mraveniště, menší tmavě šedý kruh zdroj potravy. Odstíny šedé znázorňují feromonové stopy

Obr. 12.4 ilustruje typické chování modelu. Na začátku chodí mravenec nahodile, jakmile však několik mravenců najde zdroj potravy, rychle se vytvoří „feromonové dálnice“, kterou sledují ostatní mravenec. Jde o typickou pozitivní zpětnou vazbu: čím víc mravenců potravu najde, tím více feromonu je na cestě a tím více mravenců potravu najde. Pokud do modelu přidáme více zdrojů potravy, zjistíme, že chování mraveniště je také „inteligentní“ – potrava je čerpána ze zdrojů podle vzdálenosti. Na tomto modelu můžeme dohře ilustrovat princip emergentního chování. Emergentní chování je chování na úrovni celku, které nemá žádný přímý vzor v chování či pravidlech jednotlivých částí. Jako opak emergentního chování můžeme chápat předepsané chování, což je chování na úrovni celku, které je přímým důsledkem určitého pravidla jednotlivých částí. V uvedeném modelu je tedy hledání cesty do mraveniště předepsaným chováním, protože v modelu je přímo řečeno, že jakmile mravenec najde potravu, má jít přímo zpět do mraveniště. Na tom, že mravenec spořádaně nosí potravu do mraveniště, tedy není nic překvapivého. Naproti tomu efektivní hledání cesty k potravě je emergentní chování, protože cesta k potravě není přímo v pravidlech mravenců zakódovaná. Mravenec pouze mají jednoduchá pravidla týkající se zanechávání feromonu a sledování feromonu, ze kterých není způsob chování celku jednoduše odvoditelný.

Nejen tento model, ale mraveniště obecně jsou typickou ukázkou emergentních vlastností (Gordon, 1999). Přestože jednotliví mravenec jsou velmi jednoduší, žijí krátkou dobu a dokáží zpracovávat jen jednoduché podněty ve svém bezprostředním okolí, mraveniště jako celek přežívá dlouho a má svoji „inteligenci“ a „osobnost“. Například mladé mraveniště je spíše agresivní a expanzivní, kdežto staré mraveniště je poklidné a ustálené, a to i přes to, že průměrné stáří jednotlivých mravenců bude v obou velmi podobné.