

The background of the entire cover is a light, warm orange color. Scattered across this background are numerous black silhouettes of birds in flight, likely swans or geese, shown from various angles and positions, creating a sense of movement and a natural, complex system.

RADEK PELÁNEK

# MODELOVÁNÍ A SIMULACE KOMPLEXNÍCH SYSTÉMŮ

JAK LÉPE POROZUMĚT SVĚTU

MASARYKOVA UNIVERZITA

**RADEK PELÁNEK**  
**MODELOVÁNÍ A SIMULACE KOMPLEXNÍCH SYSTÉMŮ**

Knihu recenzovali:  
Mgr. Cyril Brom, Ph.D.  
Ing. Robert Grepl, Ph.D.

RADEK PELÁNEK

# MODELOVÁNÍ A SIMULACE KOMPLEXNÍCH SYSTÉMŮ

JAK LÉPE POROZUMĚT SVĚTU

MASARYKOVA UNIVERZITA  
BRNO 2011

ISBN 978-80-210-5807-1  
ISBN 978-80-210-5318-2 (brož. vaz.)  
© 2011 Radek Pelánek  
© 2011 Masarykova univerzita  
© 2011 Layout Eva Lufferová

# Obsah

Předmluva	9
<b>Část I      Obecné principy</b>	<b>11</b>
<b>1   Úvod</b>	<b>13</b>
1.1 O tématu . . . . .	14
1.2 Proč se modelováním zabývat? . . . . .	15
1.3 O knize . . . . .	18
<b>2   Komplexní systémy</b>	<b>21</b>
2.1 Jednoduché a složité . . . . .	22
2.2 Charakteristiky komplexních systémů . . . . .	24
2.3 Studium komplexních systémů . . . . .	27
2.4 Shrnutí . . . . .	29
<b>3   Uvažování o systémech</b>	<b>31</b>
3.1 Intuitivní myšlení . . . . .	32
3.2 Systémové myšlení . . . . .	36
3.3 Induktivní a deduktivní myšlení . . . . .	38
3.4 Decentralizované myšlení . . . . .	39
3.5 Shrnutí . . . . .	40
<b>4   Zpětná vazba</b>	<b>41</b>
4.1 Základní zpětné vazby . . . . .	42
4.2 Kombinace zpětných vazeb . . . . .	45
4.3 Shrnutí . . . . .	46
<b>5   Modelování a simulace</b>	<b>47</b>
5.1 Základní myšlenky o modelování . . . . .	48
5.2 Cíle modelování a simulace . . . . .	49
5.3 Typy modelů . . . . .	51
5.4 Specifika výpočetních modelů . . . . .	52

5.5	Fáze modelování . . . . .	54
5.6	Shrnutí . . . . .	57
<b>Část II Metody modelování a simulace</b>		<b>59</b>
<b>6</b>	<b>Matematické modelování a systémová dynamika</b>	<b>61</b>
6.1	Matematické modelování pomocí rovnic . . . . .	62
6.2	Systémová dynamika . . . . .	67
6.3	Základní vzory chování . . . . .	70
6.4	Shrnutí . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Buněčné automaty a modelování založené na agentech</b>	<b>73</b>
7.1	Buněčné automaty . . . . .	74
7.2	Příklady buněčných automatů . . . . .	77
7.3	Modelování založené na agentech . . . . .	80
7.4	Příklady modelů založených na agentech . . . . .	82
7.5	Shrnutí . . . . .	83
<b>8</b>	<b>Modelování myšlení a vývoje</b>	<b>85</b>
8.1	Teorie her a racionální uvažování . . . . .	86
8.2	Modelování induktivního myšlení . . . . .	88
8.3	Simulovaná evoluce . . . . .	93
8.4	Shrnutí . . . . .	96
<b>9</b>	<b>Komplexní sítě</b>	<b>97</b>
9.1	Úvodní poznámky . . . . .	98
9.2	Vlastnosti komplexních sítí . . . . .	99
9.3	Modely komplexních sítí . . . . .	102
9.4	Procesy na sítích . . . . .	104
9.5	Shrnutí . . . . .	106
<b>10</b>	<b>Metody analýzy modelů</b>	<b>107</b>
10.1	Úvodní poznámky . . . . .	108
10.2	Verifikace a validace modelu . . . . .	109
10.3	Zobrazení chování modelu . . . . .	110
10.4	Analýza citlivosti . . . . .	115
10.5	Experimenty s modelem . . . . .	118
10.6	Shrnutí . . . . .	119
<b>Část III Případové studie</b>		<b>121</b>
<b>11</b>	<b>Epidemie</b>	<b>123</b>
11.1	Základní koncepty . . . . .	124

11.2	Jednoduché modely SIR epidemie . . . . .	126
11.3	Rozšíření základních modelů . . . . .	129
11.4	Příklady studií a nástrojů . . . . .	132
11.5	Shrnutí . . . . .	133
<b>12</b>	<b>Základní principy života</b>	<b>135</b>
12.1	Sebe-reprodukce a vznik života . . . . .	136
12.2	Evoluce . . . . .	140
12.3	Samo-organizace . . . . .	142
12.4	Homeostáza . . . . .	146
12.5	Shrnutí . . . . .	149
<b>13</b>	<b>Modelování sociálních a ekonomických systémů</b>	<b>151</b>
13.1	Pozitivní zpětná vazba v ekonomii . . . . .	152
13.2	Modelování trhu . . . . .	155
13.3	Umělé společnosti . . . . .	157
13.4	Shrnutí . . . . .	161
<b>14</b>	<b>Spolupráce a soutěžení</b>	<b>163</b>
14.1	Dilema vězně . . . . .	164
14.2	Turnaje počítačových strategií . . . . .	166
14.3	Modelování vzniku norem . . . . .	171
14.4	Altruismus . . . . .	173
14.5	Shrnutí . . . . .	175
<b>15</b>	<b>Meze růstu</b>	<b>177</b>
15.1	Úvodní poznámky . . . . .	177
15.2	Model World3 . . . . .	179
15.3	Analýza modelu . . . . .	181
15.4	Závěry a souvislosti . . . . .	182
15.5	Shrnutí . . . . .	184
<b>16</b>	<b>Příklady aplikací modelování</b>	<b>185</b>
16.1	Modelování počasí a klimatu . . . . .	186
16.2	Modelování dopravy . . . . .	189
16.3	Systémová biologie . . . . .	192
16.4	Shrnutí . . . . .	194
<b>17</b>	<b>Pákové body</b>	<b>195</b>
17.1	Hierarchie pákových bodů . . . . .	196
17.2	Paretův princip . . . . .	199
17.3	Příklady . . . . .	200
17.4	Shrnutí . . . . .	202
	<b>Závěr</b>	<b>203</b>



---

<b>Literatura</b>	<b>205</b>
<b>A Slovníček pojmů</b>	<b>211</b>
<b>B Přehled modelů</b>	<b>215</b>
<b>C Softwarové nástroje</b>	<b>217</b>
<b>D Náměty na cvičení a projekty</b>	<b>221</b>
D.1 Epidemie . . . . .	221
D.2 Populační dynamika . . . . .	223
D.3 Obecné náměty . . . . .	225
<b>E Návodné otázky</b>	<b>229</b>
<b>Rejstřík</b>	<b>231</b>

# Předmluva

*Mysl není nádoba, kterou je potřeba naplnit, ale oheň, který je potřeba zapálit.* (Plutarchos)

*Vše, co můžeme udělat, je lidi inspirovat.* (Instruktoři Brno)

Hlavním cílem této knihy není předat čtenářům konkrétní informace, ale alespoň trochu změnit jejich pohled na svět. Za klíčový považuji nikoliv konkrétní obsah knihy, ale její styl. Tento styl je do velké míry ovlivněn mým napojením na organizaci Instruktoři Brno.

Instruktoři Brno pořádají zážitkové akce pro dospělé – většinou pro lidi nadprůměrně inteligentní, schopné a samostatné. Akce Instruktorů Brno a celkové fungování této organizace vychází z přesvědčení, že takové lidi není možné ani žádoucí přímo vychovávat, vodit je za ruku a říkat jim, co mají dělat, ale že nejúčinnější je lidi inspirovat, ukázat jim možné cesty a nechat je vybrat si, co je zaujme a pro co se rozhodnou. Schopný člověk, když se pro něco nadchne, toho dokáže velmi mnoho a nepotřebuje, aby jej někdo vodil za ruku.

Podobný přístup – především inspirovat, nikoliv přímo vychovávat a vyučovat – se snažím používat i při výuce a také v této knize. Není klíčové, aby si studenti (čtenáři) odnesli konkrétní vědomosti, ale aby měli možnost vidět nové a zajímavé obzory, o kterých dříve nevěděli, a aby měli dostatečný odrazový můstek pustit se do vlastního prozkoumávání těch obzorů, které je zaujmou.

Po obsahové stránce sahají prameny knihy do dob mého studia na Fakultě informatiky Masarykovy univerzity, kdy jsem ze zájmu procházel různé knihy a texty o komplexních systémech, chaosu, fraktálech, komplexitě a podobných tématech. Jako doktorský student jsem se později dostal i na letní školu, která se zabývala těmito tématy. Když jsem se pln nadšení vrátil, navrhl jsem, že by se na naší fakultě mohl vyučovat předmět o komplexních systémech. Mé nadšení sice nebylo úplně sdíleno, ale shodou okolností zrovna odešel přednášející předmětu Simulace a bylo mi řečeno, že nový předmět by být mohl, kdyby se mi podařilo zkombinovat témata komplexních systémů a simulace. Zpětně považuji tento vývoj za velmi šťastný – sice jsem se vzdálil od zajímavých témat, jako je chaos a fraktály, ale důraz na modelování a simulaci přidal tématu na důležitosti a uspokojil moji potřebu alespoň občas trochu „zachraňovat svět“.

Kniha tedy do velké míry vychází z mé výuky, konkrétně z přednášek „Modelování a simulace“ a ze „Semináře o komplexních systémech“. Protože se snažím o vedení výuky v duchu výše uvedených citátů, vyžadují po studentech samostatnou aktivitu – vytváření vlastních modelů, tvorbu projektů, psaní stručných článků a čtenářských deníků. Kromě toho, že věřím v pedagogickou účinnost takových aktivit, poskytují mi výtvořky studentů novou inspiraci na zdroje a také zpětnou vazbu o tom, co lidi zajímá. Cenným materiálem jsou pro mne také špatné modely, které studenti občas v rámci projektů vytvoří, protože nad špatným modelem si toho mnohdy uvědomíme o metodologických otázkách více než nad dobrým. V literatuře však najdeme jen příklady dobrých modelů a chyby ve svých vlastních modelech je velmi těžké vidět (ať už se jedná o modely mentální nebo počítačové). První poděkování tedy patří všem studentům, kteří v letech 2006–2010 prošli mými kurzy a kteří tak, vesměs nevědomky, přispěli ke vzniku a obsahu této knihy.

Poděkování dále patří všem, kdo svými připomínkami k pracovním verzím přispěli k finální podobě knihy: Janu Strejčkovi, Radanu Květovi, Robertu Greplovi, Pavlu Krčálovi, Ondřeji Krčálovi a Davidu Šafránkovi. Speciální dík patří Cyrilu Bromovi za jeho důkladný a konstruktivní posudek. Děkuji také Aleně Mizerové, Radce Vyskočilové a Evě Strnadové z Nakladatelství Masarykovy univerzity za spolupráci při finálních úpravách knihy.

Konečně velký dík patří mojí ženě Barče, která mě v průběhu přípravy knihy morálně podporovala, trpělivě reagovala na časté prosby „mohla by sis přečíst tohle a říct mi, jak ti to připadá“ a měla řadu připomínek a návrhů.

*Radek Pelánek*

# Část I

## Obecné principy

*Segregace, 1971.* Thomas Schelling popsal velice jednoduchý a abstraktní model, který ukazuje, jak může dojít k vysokému stupni segregace mezi obyvateli různé barvy pleti i v případě, že jednotlivci jsou tolerantní. Schelling použil k simulaci svého modelu mince rozmístěné na papíře. Přístup, který svým modelem nastínil, se však o 20 let později stal základem „modelování s agenty“, při kterém se simulace provádí na výkonných počítačích.

*Meze růstu, 1972.* Jak bude vypadat interakce rostoucí globální ekonomiky a limitů planety? Čtveřice vědeckých pracovníků se pokusila nastínit odpověď na tuto otázku s využitím počítačového modelu World3. Kniha založená na analýzách tohoto modelu se stala světovým bestsellerem a výrazně ovlivnila rodící se environmentální hnutí.

*Evoluce spolupráce, 1984.* Robert Axelrod uspořádal turnaje počítačových strategií ve hře Dilema vězně, což je modelová situace popisující rozhodování mezi spoluprací a soutěží. Výsledky počítačových simulací ukázaly, jak se může spolupráce vyvinout i ve skupině egoistických jedinců. Kniha ovlivnila tisíce čtenářů v tom, jak přemýšlí o spolupráci a soutěžení, a podnítila velké množství dalšího výzkumu především v humanitních vědách.

*Umělé hejno, 1986.* Craig Reynolds představil model umělého hejna. Model obsahuje umělé tvory, kteří se pohybují po prostoru a dodržují tři jednoduchá pravidla pohybu. I přes jednoduchost pravidel připomíná výsledná simulace chování skutečného ptačího hejna. Reynoldsova pravidla se stala základem mnoha dalších modelů, které se využívají například v počítačové grafice.

*Epidemie nemoci šílených krav, 2001.* Když v roce 2001 zasáhla Velkou Británii epidemie nemoci BSE. V rámci ochrany proti nemoci byla přijata drastická preventivní opatření, která spočívala mimo jiné ve vybití zdravých stád nacházejících se v okolí postižených farem. Tato opatření byla přijata mimo jiné i na základě analýz, které byly provedeny pomocí výpočetních modelů šíření epidemie.

*Hadž, 2005.* Miliony poutníků se každoročně vydávají do Mekky, aby vykonaly posvátnou pouť, jeden z pěti pilířů islámu. Při Hadži putují společně velké davy lidí

a často dochází ke katastrofám, při kterých zahynou vlivem nehod a ušlapání až stovky lidí. Uspořádání mostu Jamarat, jednoho z kritických míst trasy, bylo v roce 2005 pozměněno na základě výsledků simulací.

*Zprávy IPCC, 2007.* Mezinárodní panel pro klimatické změny (IPCC) obdržel Nobelovu cenu za svůj podíl na šíření vědomostí o klimatických změnách. IPCC tohoto cíle dosahuje především pomocí vydávání rozsáhlých souhrnných zpráv (v roce 2007 vyšla čtvrtá zpráva). Zprávy IPCC jsou do velké míry založeny na výsledcích rozsáhlých modelů klimatu.

Co mají tyto příběhy společného? Vypráví o komplexních systémech, tedy o systémech, které se skládají z mnoha složitě propletených částí a jež nedokážeme naprosto přesně uchopit. Ve všech příbězích se také využívá modelování a simulace. Příběhy tak uvádí konkrétní příklady toho, o čem je celá tato kniha – o modelování komplexních systémů a o tom, k čemu všemu nám to může posloužit.

# 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 počasi, 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 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 pod-systémy 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 ostřelovat asteroidy nebo si na ní zkoušet důsledky pomalého ohřívání atmosféry.

Aby 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 králíků 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 stáří. Simulace modelu je grafická – vidíme pohyb jednotlivých tvorů. Výsledky simulace můžeme samozřejmě také číselně zpracovat a vyjádřit třeba opět grafem.

Můžeme vyrobit 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 nejúspěšnějších 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 složitě se vzájemně ovlivňují. Příklady komplexních systémů jsou třeba mraveniště, mozek, firma, internet nebo počítač.

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).

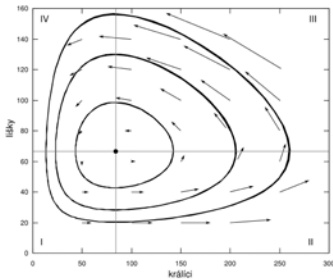
S příchodem počítačů se otevřely nové možnosti, které jednak umožňují lepší práci s klasickými nástroji (počítačová analýza rovnic) a jednak zcela nové přístupy, jako je třeba právě výpočetní modelování a simulace. Tyto přístupy umožňují analyzovat výrazně složitější systémy než klasický matematický 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.

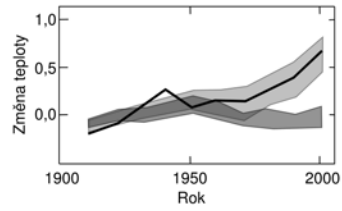
## 1.2 Proč se modelováním zabývat?

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

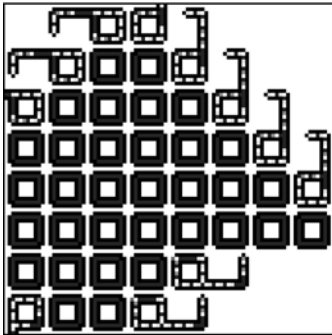




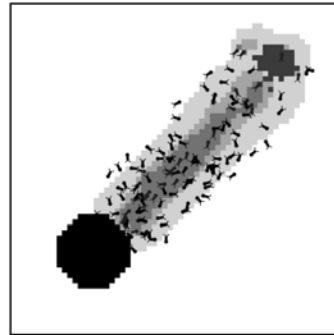
Dynamika populace  
králíků a lišek



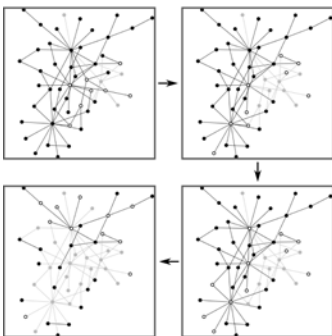
Sumární výstupy  
z klimatických modelů



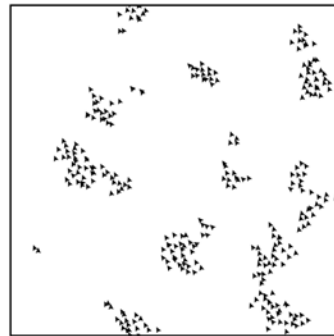
Sebe-reprodukcující se cykly



Mravenci: sběr potravy



Šíření epidemie v sociální síti



Umělé hejno

Obr. 1.1: Příklady výstupů simulací.

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 součástí, 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 rozestetých 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. Ukázat, že i jednoduchá pravidla mohou 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.

### 1.3 O knize

Pokud předchozí řádky čtenáře pro modelování navnadili, je načase prozradit, co nabízí tato kniha.

#### Základní koncepce

Většina knih o modelování rozebírá detailně jeden modelovací přístup, případně se zaměřuje na jednu aplikační oblast. V této knize přistupujeme k tématu jinak – jde o přehled různých přístupů ilustrovaný na příkladech z mnoha oblastí. V žádném tématu nezacházíme do úplných detailů, spíše se snažíme ukázat souvislosti. Účelem knihy je shromáždit zajímavé myšlenky, navnadit a inspirovat. Detaily může čtenář dohledat v uvedených zdrojích.

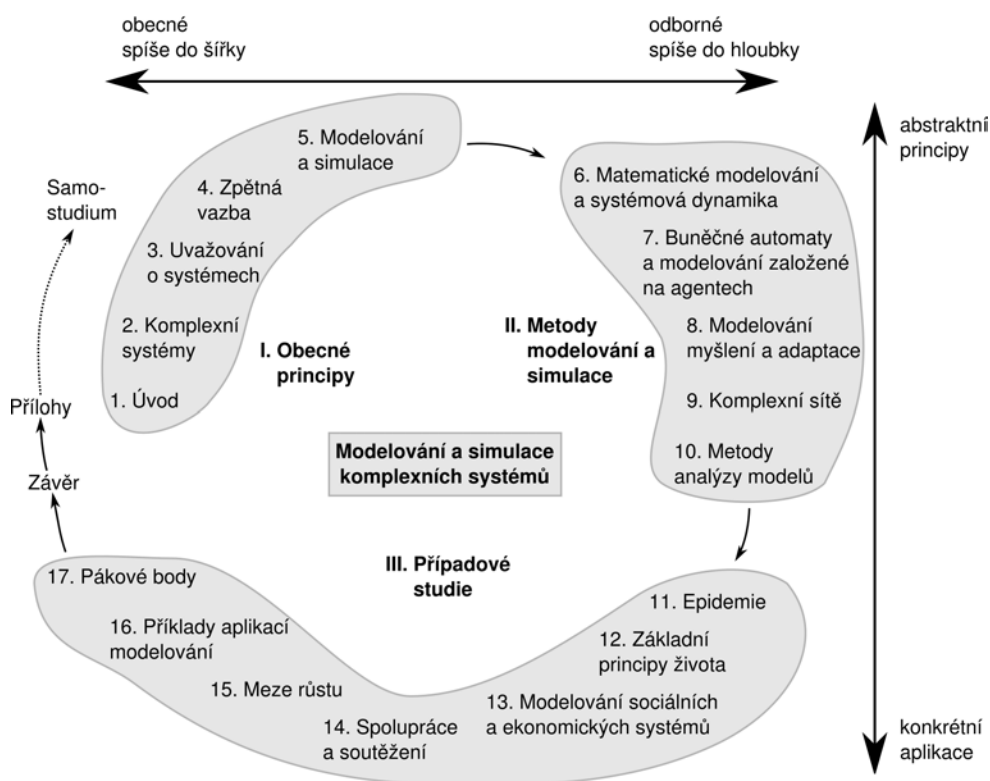
Proč tento přístup? Stejně jako ve většině jiných oblastí lidského činění ani v modelování neexistuje žádná „stříbrná kulka“, nástroj, který by byl opravdu univerzální a vždy fungoval. Každý modelovací přístup má svoje výhody a nevýhody, každý se hodí na jiný typ problémů. Vyplatí se znát pestrou paletu přístupů a být schopen pro konkrétní aplikaci vybrat ten vhodný. Doučit se potřebné detaily už není takový problém.

Klademe také důraz na použití příkladů – často místo detailního rozebírání technických a metodických aspektů volíme ilustraci na příkladu. Příklady jsou daleko čitelnější a zábavnější, čtenář z nich často pochopí základní principy lépe než z abstraktních úvah. I pro vlastní modelování, stejně jako pro mnoho jiných činností, je lepší imitovat konkrétní dobré postupy než snažit se dodržovat obecné metodické rady.

#### Uspořádání knihy

Celkové uspořádání knihy naznačuje obr. 1.2. Výklad začíná obecnými principy, následuje odbornější úvod do modelovacích technik a rozbor případových studií. Případové studie nejdříve popisujeme po technické stránce a na konci se opět vracíme k obecnému, netechnickému stylu. Postup studia by tak měl tvořit kružnici, nebo spíše spirálu – po dočtení knihy by čtenář měl být schopen absolvovat další „kolečka“ samostudiem.

Knihy je rozdělena do tří částí. První část podávající úvod do oblasti studia je napsána vyloženě populárně. Vysvětluje obecné pojmy a popisuje základní metodické principy, které jsou společné různým modelovacím přístupům. Příklady v této části jsou popsány pouze slovně a neformálně.



Obr. 1.2: Struktura knihy.

Druhá část je techničtější, obsahuje přehled modelovacích přístupů a technik použitelných pro modelování komplexních systémů. Techniky stručně popisujeme a ilustrujeme na jednoduchých příkladech. Pro možnost srovnání a lepší pochopení v celé části používáme především příklady z oblasti populační dynamiky.

Třetí část obsahuje konkrétní aplikace technik popsaných v druhé části. V rámci těchto studií se většinou kombinuje několik technik popsaných v druhé části textu, případně se tyto techniky dále rozvíjejí. Třetí část knihy slouží k lepšímu pochopení technik, k předvedení dobrých modelů, které dokáží měnit náš pohled na svět, a také k získání realistických představ o modelech komplexních systémů.

Aby čtenář opravdu pronikl do modelování, nestačí jen číst, je třeba se činit a samostatně si modelování vyzkoušet. V přílohách je uveden seznam rámcových námětů na cvičení a samostatné projekty a také tipy na nástroje, které je možné použít. V hlavním textu rozebíráme pouze obecné principy, konkrétní nástroje a programy – což je informace, která rychle zastarává – uvádíme pouze v příloze.

## Uspořádání kapitol

*„Co je do knížky, když v ní nejsou žádné obrázky a nic se tam nepovídá,“  
řekla si Alenka. (L. Carrol)*

Pro lepší pochopení obsahuje každá kapitola kromě vlastního výkladu také úvodní rozhovor a závěrečné shrnutí. Důležité myšlenky jsou tedy v knize sděleny nejméně třikrát (rozhovor, vlastní kapitola, shrnutí), pokaždé však jiným způsobem.

Rozhovory na sebe rámcově navazují, takže pro získání obecné představy o obsahu knihy si lze nejprve přečíst všechny rozhovory. Rozhovory vedou dva bratři pojmenovaní iniciálami M a S. M je mladší bratr, zvědavý středoškolák, který zrovna píše seminární práci o králících. S je starší bratr, vysokoškolák, který se zajímá o modelování a simulaci komplexních systémů.

## Souvislosti a zdroje

Vzhledem k přehledovému charakteru knihy klademe důraz na souvislosti. Upozornění na souvislosti, které je typograficky odlišeno od běžného textu, informuje o zdrojích, ze kterých výklad čerpá a v nichž lze najít podrobnější informace, a také upozorňuje na související části knihy.

Mnohé partie knihy čerpají z velkého množství vzájemně se překrývajících zdrojů. V těchto případech je vždy k jedné delší partii uveden samostatný blok „souvislosti“, který stručně komentuje dostupnou literaturu k danému tématu. Vzhledem k učebnicovému a přehledovému charakteru této knihy uvádíme primárně zdroje, jež jsou relativně dostupné a přístupně zpracované, a nikoliv původní vědecké studie zabývající se daným tématem. V seznamu literatury jsou nejzajímavější zdroje okomentovány, aby čtenář snáze našel zdroje, které jsou pro něj zajímavé.

V knize se používá české názvosloví, nicméně drtivá většina zdrojů je psána anglicky a mnohé pojmy nemají ustálené české ekvivalenty. Proto je v příloze uveden slovníček.

## 2 Komplexní systémy

S: Tak co tvoje seminární práce o králících?

M: Hledal jsem na internetu a mám spoustu zajímavých podnětů. Zjistil jsem třeba, že králíci často vystupují v mytologii. Například podle korejských mýtů králíci obývají Měsíc a vyrábějí tam koláčky. Ale třeba o králíčím mozku jsem toho moc nenašel, a to je škoda, protože by mě zajímalo, co se honí králíkovi hlavou. Jak jsem o tom přemýšlel, tak mě napadlo – dokážeme dopravit člověka statisíce kilometrů vzduchoprázdnem až na Měsíc, abychom ověřili, zda tam opravdu králíci pečou koláčky, ale přitom pořádně nerozumíme rozdílů mezi naším a králíčím mozkiem. Nepřijde ti to zvláštní?

S: To je jasné. Dostat člověka na Měsíc je náročný úkol, ale dá se rozložit na sérii dílčích úkolů, které jdou řešit samostatně. Kdežto fungování mozku nemůžeš rozdělit na části a ty studovat samostatně. Mozek je komplexní systém a pochopit komplexní systém je daleko náročnější.

M: Myslíš si, že použiješ odborný termín, já se zaleknu a ty se vyvlečeš z odpovědi? Kdepak. Co to znamená komplexní systém?

S: Na tuto otázku ti bohužel nedám žádnou jednoduchou jednovětnou odpověď. Stručně a polooborně řečeno, komplexní systém se skládá z velkého počtu částí, které mají mezi sebou velké množství vztahů a vzájemně se ovlivňují složitým způsobem.

M: To je mi pěkně mlhavá definice. Co je to část, velké množství a složitý způsob?

S: Než zabředávat do definic, raději ti uvedu příklady – mraveniště, počasí, firma, ekosystém nebo organismus. To vše jsou komplexní systémy, protože mají hodně částí, které jsou spolu složitě propojeny. Kdežto třeba páka je jednoduchý systém – má jen pár částí a jejich vztahy není těžké popsat.

M: Ale když se na páku podívám dostatečně detailně, zjistím, že se skládá z dílčích částí a možná i u ní bych nakonec našel složité vztahy.

S: U páky by se ti složité vztahy hledaly těžko – samozřejmě bys mohl jít až na úroveň atomů, ale tam už je těch částí tolik, že můžeme počítat s průměrným chováním a uvažovat o systému pomocí statistiky. Nicméně máš částečně pravdu. Co je to systém, část či složitý vztah, závisí mimo jiné i na úhlu pohledu, na míře detailu a na časovém horizontu, s jakým svět kolem sebe zrovna studujeme. Vem si takový systém „člověk“: můžeme ho

studovat jako jeden samostatný komplexní systém, kde části jsou orgány, nebo jako dílčí část v komplexním systému, například ve firmě, nebo jako jednoduchou součást relativně neorganizovaného a nekomplexního systému, kterým je plynulý proud lidí na ulici.

M: To je mi tedy zvláštní pojem. Takže když chci, napasuji do něj skoro cokoliv. K čemu je takový pojem?

S: To není až tak zvláštní situace – vezmi si takový pojem „život“. Přesně definovat, co znamená život, by bylo také značně komplikované a přitom většina biologů se studiem života intenzivně zabývá a žádnou definici k tomu nepotřebuje. Mimochodem, moje oblíbená definice života je od Dawa Berryho: „Živý tvor je cokoliv, co umře, když do toho pořádně praštíte.“

M: V tom případě navrhuji definici: „Komplexní systém je cokoliv, čemu nerozumíme.“ Mně se to nezdá. Zavání to řečmi „všechno souvisí se vším“, „celek je víc než součet částí“ a „musíme se na to dívat holisticky“. To je teď populární, ale podle mě dost o ničem.

S: Máš pravdu, že pojem komplexní systém se často zneužívá. Nicméně studium komplexních systémů má perspektivu přinášet konkrétní výsledky. Existují univerzální metody a nástroje pro analýzu komplexních systémů, tyto nástroje navíc facilitují interdisciplinární pohled, který je pro studium komplexních systémů nezbytný. . .

M: Brzdí, používáš příliš mnoho cizích slov – to znamená, že tomu asi moc nerozumíš. Víš co, raději si to sám pořádně rozmysli, já jdu zatím hledat podklady o králících. Třeba najdu něco o komplexně systémových králících.

## 2.1 Jednoduché a složité

V rozhovoru zazněla definice: „Komplexní systém se skládá z velkého počtu částí, které mají mezi sebou velké množství vztahů a vzájemně se ovlivňují složitým způsobem.“ Pojdme se na tuto definici podívat podrobněji. Upřesnění potřebuje především pojem „složitý“. Co to znamená, že je něco složité?

Pojem „složitý“ má mnoho různých významů, zde jej budeme používat ve smyslu, v jakém se používá v oblasti komplexních systémů, viz například Weinberg (1975), Gell-Mann (2002). Tento význam ilustrujeme pomocí příkladu – komunikačního cvičení pro dva hráče. První hráč vidí obrázek, druhý hráč obrázek nevidí, ale zato má papír a tužku. První hráč musí obrázek popsat tak, aby druhý hráč nakreslil obrázek co nejpodobnější originálu. Důležité je, že cílem není, aby výsledný obrázek byl naprosto identický s původním, ale aby na první pohled působil stejným dojmem jako originál.

Příklady zadání pro toto cvičení jsou na obr. 2.1. Všechny tři obrázky jsou tvořeny pouze z kružnic, celkový počet kružnic je řádově stejný. Který obrázek je nejsložitější na překreslení? Obrázek nalevo je „jednoduchý“ – má pravidelnou strukturu a můžeme jej díky tomu snadno popsat: „Nakresli 49 stejně velkých kružnic uspořádaných do pravidelné mřížky.“ Obrázek uprostřed je „neorganizovaný“ – nemá žádnou struk-