Kybernetika a kybernetika druhého řádu

Francis Heylingen
Svobodná univerzita Brusel

Cliff Joslyn
Národní laboratoř Los Alamos

in: Mezera, R. A. (ed.): Encyclopedia of Physical Science & Technology (3rd ed.), (Academic Press, New York, 2001

Úvod 2

1. Historie kybernetiky 3
1.1. Původy 3
1.2. Kybernetika druhého řádu 4
1.3. Kybernetika dnes 5

2. Vazbový (relační) přístup 8
2.1 Rozdíly a vazby 8
2.2. Rozmanitost a omezení 8
2.3. Entropie a informace 9
2.4. Dynamické modely 10

3. Cyklické procesy 12
3.1. Sebeaplikace 12
3.2. Sebeorganizace 13
3.3. Závěr 14
3.4. Zpětnovazební cykly 14

4. Cílové zaměření a řízení 17
4.1. Cílové zaměření 17
4.2. Mechanizmy kontroly 18
4.3. Zákon nezbytné rozmanitosti 19
4.4. Prvky řídícího systému 20
4.5. Hierarchie řízení 22

5. Poznání 24
5.1. Nezbytná znalost 24
5.2. Modelový vztah 25
5.3. Učení a vytváření modelů 26
5.4. Konstruktivistická epistemologie 28

6. Literatura 30

Úvod

Kybernetika je vědeckým oborem, který zkoumá abstraktní principy uspořádání komplexních systémů. Zabývá se spíše tím, jak systémy fungují, než tím, z čeho jsou stvořeny. Kybernetika se zaměřuje především na to, jak systémy využívají informací a modelů ke kontrole svých vlastních akcí, aby tak prostřednictvím kompenzace různých poruch udržovali své cíle a směřovali k nim.

Díky mezioborovosti (interdisciplionaritě), která je kybernetickému uvažování vlastní, je možné je používat k pochopení, modelování a tvorbě libovolných systémů: fyzikálních, technologických, biologických, ekologických, psychologických, sociálních, nebo jakýchkoliv jejich kombinací. Kybernetika druhého řádu se zaměřuje především na výzkum role (lidského) pozorovatele při vytváření modelů systémů a při konstruování dalších pozorovatelů.

Slovník některých vybraných pojmů

Rozmanitost

Míra počtu možných stavů nebo akcí

Entropie

Statistická veličina rozmanitosti

Sebeorganizace

Spontánní snížení entropie dynamického systému

Kontrola

Udržování směřování k cíly prostřednictvím aktivní kompenzace poruch (v celém textu je důsledně užíván pojem „kontrola" v anglosaském smyslu slova, tedy i tam, kde čeština užívá termínů jako „regulace" a „řízení". Tyto pojmy jsou užívány pouze tehdy, pokud se jedná o obecné označení vědeckých oborů nebo teorií. Pozn. překl.)

Konstruktivizmus

Filozofický názor, že modely nejsou pasivním odrazem skutečnosti, ale aktivními výtvory (konstrukty) pozorovatele.

1. Historie kybernetiky

1.1. Původy

Odvozen od řeckého *kybernetes*, nebo-li „kormidelník", se pojem „kybernetika" objevuje ve starověku u Platóna a poté v 19. století u Ampéra, kteří kybernetiku vymezili jako vědu efektivního vládnutí. Tento koncept byl obnoven a propracován matematikem Norbertem Wienerem v knize vydané v roce 1948 pod příznačně definujícím názvem „Kybernetika, aneb věda o kontrole a komunikaci živočichů a strojů". Inspirován výsledky válečných a předválečných výzkumů v oblasti mechanických řídících systémů jako servomechanismů a dělostřeleckých zaměřovací systémů a soudobým vývojem v oblasti matematické teorie komunikace (nebo informace) Cloude Shannona se Wiener zaměřil na vývoj komplexní teorie organizačních a řídících vztahů v systémech.

Teorie informací, Teorie řízení a Vývoj systémů řízení se od té doby staly samostatnými vědeckými obory. Kybernetika se vedle zkoumání člověkem vytvořených, umělých systémů, zaměřuje na přirozeně evolučně vzniklé systémy, jakými jsou organismy a společenství, které mají své vlastní cíle a nejsou kontrolovány svými stvořiteli.

Kybernetika jako taková vznikla na základě celé řady interdisciplinárních setkání významných poválečných intelektuálů v průběhu let 1944 – 1953, mezi které patřili Wiener, John von Neumann, Warren McCulloh, Claudie Shannon, Heinz von Foerster, W. Ross Ashby, Gregory Bateson a Margaret Mead. Pod záštitou nadace Josiaha Macyho Jr. vešla tato setkání ve známost jako Macyho konference o kybernetice. Z původního zaměření na stroje a zvířata se zájem kybernetiky rychle rozšiřuje na oblasti vědomí (Bateson a Ashby) a sociálních systémů (tj. Stafford Beerova kybernetika managementu), čímž se vrací k původnímu Platonovu pojetí kybernetiky jakožto vědy o kontrole vztahů ve společnosti.

V průběhu 50. let spojují kybernetičtí myslitelé svou cestu se školou obecné teorie systémů (OTS) založené v přibližně stejné době Ludwigem von Bertanlaffy s cílem vytvořit jednotný vědecký obor usilující o odhalení obecných principů, kterými se řídí otevřené, živé systémy. OTS zkoumá systémy na všech úrovních obecnosti, přičemž kybernetika se zaměřuje na specifické, cílově orientované, funkcionální systémy mající specifickou řídící vazbu. I když přetrvávají rozpory o relativním významu jednotlivých oborů, můžeme každý z nich považovat za součást komplexní snahy vytvořit interdisciplinární „systémovou vědu".

Pravděpodobně největším přínosem kybernetiky je využití pojmů informace a kontroly pro výklad účelového, nebo na cíl zaměřeného jednání, které je základní vlastností vědomí a života. Záporná zpětná vazba mající za účel udržovat zadaný cílový stav byla považována za základní model znaku autonomie organizmů. Jejich chování, pokud je orientováno cílově, nemůže být určováno pouze vlivem okolí, nebo vnitřními dynamickými procesy. Musí obsahovat do jisté míry „nezávislé" prvky, prvky se „svo-

bodnou vůlí". Takto kybernetika předpověděla mnohé ze současného vývoje robotiky a teorie autonomních systémů. Ve skutečnosti jsou pojmy jako „cyborg" či „kybernetika" pouze módními pojmy pro „robot" a „robotika". Díky technologickým objevům poválečných let toužili ranní kybernetikové prozkoumat podobnosti mezi technologickými a biologickými systémy. Vyzbrojeni teorií informací, prvními digitálními obvody a Booleanskou logikou se nemohli vyvarovat toho, aby hypoteticky nepovažovali digitální systémy za modely mozku a informace za „ducha" v „těle" strojů. Obecně lze říci, že kybernetika měla zásadní vliv na vznik různých moderních vědeckých oborů, jakými jsou: teorie řízení, počítačová věda, teorie automatů, umělá inteligence a umělé neuronové sítě, teorie poznání, počítačové modely a simulační teorie, dynamické systémy a umělý život. Mnohé přístupy, které jsou těmto oborům společné, jako komplexnost, sebeorganizace, sebereprodukce, autonomie, teorie sítí, teorie vazeb a princip adaptace byly prvně objeveny kybernetiky ve 40. a 50. letech. Jako příklady mohou sloužit Neumanova počítačová architektura, teorie her a nezávislých automatů; Ashbyho a von Foersterova analýza sebeorganizace; Braitenbergovi autonomní roboti a McCullohovi umělé neuronové sítě, čidla a klasifikátory (třídiče).

1.2. Kybernetika druhého řádu

Kybernetika se od svého vzniku zabývá podobnostmi mezi autonomními, živými systémy a stroji. V poválečném období vedla fascinace z nových kontrolních a počítačových technologií k preferenci inženýrského přístupu, v němž stvořitel systému určuje, co bude systém dělat. Poté, co se systémy řízení a počítačové technologie rozvinuly v samostatné obory, cítila kybernetická obec potřebu se vůči těmto oborům vymezit. Bylo třeba se jasně vymezit vůči těmto mechanistickým přístupům a to především kladením důrazu na autonomii, sebeorganizaci, teorii poznání a roli pozorovatele při modelování systémů. Začátkem 70. let se tento přístup prosadil jako *kybernetika druhého řádu*.

Počátek tohoto oboru tkví v uvědomění, že naše znalost systémů je tvořena našimi zjednodušenými výklady těchto systémů – jejich *modely*, které nutně ignorují takové vlastnosti systémů, které jsou pro účel, k němuž byl model stvořen, nepodstatné. Proto je nutné oddělit vlastnosti systémů od vlastností jejich modelů, které jsou dány námi, jejich stvořiteli. Inženýr pracující s mechanickým systémem zná téměř ve všech případech přesně jeho vnitřní strukturu a tím i jeho chování a proto pomíjí rozdíl mezi systémem a jeho modelem. Pracuje tak, jako by model byl systémem samotným.

Dále zkoumá takový inženýr, nebo-li „kybernetik prvního řádu", systém tak, jako by byl pasivní, objektivně danou věcí, kterou lze nezávisle pozorovat, s níž lze svobodně zacházet a kterou je možné libovolně rozebrat. Kybernetik druhého řádu pracující s organismem nebo sociálním systémem považuje systém za subjekt s vlastními právy, interagující s jinými subjekty a samozřejmě i s pozorovatelem. Kvantová mechanika nás nau-

čila, že pozorovaný objekt a pozorovatele nelze od sebe oddělit a výsledek pozorování je výsledkem jejich vzájemné interakce. Pozorovatel sám se stává kybernetickým systémem, který se snaží vytvořit model jiného kybernetického systému. Abychom se mohli tímto jevem zabývat, potřebujeme „kybernetiku kybernetiky", tj. „metakybernetiku" nebo-li kybernetiku „druhého řádu".

Tento důraz kybernetiků na epistemologickou, psychologickou a sociální rovinu byl vítaným doplňkem redukcionalistických přístupů, které převládaly v důsledku významného vědeckého pokroku a inženýrských přístupů této dob, i když to současně mohlo vést ke zveličení novosti přístupu kybernetiky „druhého řádu". Je nutné si uvědomit, že většina zakladatelů kybernetiky, jakými byli Ashby, Mc Culloch a Bateson, explicitně nebo implicitně vždy zdůrazňovali význam autonomie, sebeorganizace a subjektivity tvorby modelů. Proto není možné je považovat za redukcionisty „prvního řádu". Současně se nositelé přístupu kybernetiky druhého řádu 70. let jako von Foerster, Pask a Maturana podíleli na vývoji kybernetiky „prvního řádu" v průběhu 50. a 60. let. Pokud se důkladněji zaměříme na historii tohoto oboru, pozorujeme spíše postupný vývoj směrem ke koncentraci na autonomii systémů a roli pozorovatele, než jasný předěl mezi jednotlivými generacemi přístupů. Koneckonců jsou přístupy druhého řádu pevně zakořeněny v samotném vzniku kybernetiky.

Tento článek proto pojednává o základních principech kybernetiky jako celku, aniž by rozlišoval mezi principy „prvního" a „druhého" řádu a představuje kybernetiku jako soustavu modelů, tříd a systémů.

Současně je nutné zdůraznit, že ideologická horlivost, s jakou byl prosazován princip „druhého řádu" vedla až příliš daleko. Soustředění na neredukovatelnou komplexitu rozmanitosti interakcí systému a pozorovatele a subjektivitu modelování systémů vedla mnohé k opuštění formálních přístupů a matematického modelování jako takového a z toho plynoucí omezení na pouhé filozofické a literární disputace. Je ironií, že jedna z nejelegantnějších počítačových simulací přístupu „druhého řádu", která popisuje systém, o jehož simulaci kybernetika usiluje, nebyla stvořena kybernetikem, ale ekonomem Brianem Arthurem. Navíc vzniká pocit, že fascinace odkazem „druhého řádu" a principem pozorovatele pozorovatele pozorujícího sama sebe zasela nebezpečné sémě odlučování kybernetiky od práce s konkrétními jevy.

1.3. Kybernetika dnes

Kybernetika se přes svou významnou historickou roli neetablovala jako svébytná vědecká disciplina. Praktikujících kybernetiků je dnes relativně málo a téměř nejsou organizováni. Celosvětově pracuje jen omezený počet výzkumných týmů a probíhá ještě méně akademických programů, zabývajících se tímto oborem. Tato situace má různé důvody. Patří mezi ně především vysoká abstraktnost a komplexita vlastního oboru a značný nedostatek moderních učebnic kybernetiky. Dále k této situaci přispívá pravidelné střídání různých vědeckých módních vln a rovněž výrazný mezio-

borový přesah principu druhého řádu. Vzhledem k tomu, že ostatní systémové teorie (včetně OTS) jsou v podobné situaci, bude nutné hledat hlavní příčinu současné pozice kybernetiky v samotné obtížnosti udržet spojitost širokého interdisciplinárního a teoreticky zaměřenému mateřskému oboru, který v proudu rozvíjejících se specializovaných a aplikačně orientovaných odvozených disciplín přichází o zdroje, provozovatele a nadšení.

Většina klíčových myšlenek kybernetiky již byla vstřebána ostatními disciplinami, kde nadále ovlivňují vědecký pokrok. Ostatní, důležité kybernetické principy zdánlivě upadly v zapomnění, aby pak byly pravidelně znovuobjevovány v různých oblastech. Jako příklad může sloužit opakované zrození neuronových sítí, prvně objevených kybernetiky ve 40. letech, poté ke konci 60. a znovu koncem 80. let, znovuobjevení významu autonomní interakce v robotice a umělé inteligenci v 90. letech a znovuobjevení významu jevu kladné zpětné vazby v komplexních systémech v ekonomice 90. let. Nejpodstatnější současný rozvoj kybernetiky probíhá pravděpodobně v oblasti *komplexních adaptivních systémů* a v podoblasti *umělého života.* V pracích Johna Rollanda, Stuarta Kauffmana a Briana Artura byla využita výkonnost moderních počítačů k simulaci, experimentálnímu výzkumu a tím i k rozvoji mnoha myšlenek kybernetiky. Takto, zdá se, byla přenesena standarta kybernetiky prostřednictvím matematickém modelování komplexních systémů přes hranici vlastní discipliny, i když se tak stalo při současném zanedbání oblasti cílového řízení a kontroly.

Zdá se, že díky všudypřítomné předponě „cyber" nebo „kyber" vstupuje kybernetika a spolu s ní i kybernetická filozofie, podle níž jsou systémy definovány spíše svými abstraktními vazbami, funkcemi a informačními toky, než svou konkrétní hmotou a svými prvky, dokonce do obecného povědomí, i když se tak děje velice povrchně, spíš se jedná o módní jev, než aby docházelo k jejímu hlubokému pochopení. Je to způsobeno především explozivním růstem informačních technologií včetně automatizace, počítačů, internetu, virtuální reality, softwaru a robotů. Jak roste složitost, přesah a abstraktnost těchto aplikací, bude růst i potřeba vzniku obsáhlého koncepčního teoretického rámce, který by napomohl tvůrcům i uživatelům lépe chápat významy v procesu tohoto vývoje. Kybernetika jako teoretická disciplina přesto i nadále zůstane předmětem výzkumu pouze několika specializovaných vědeckých týmů, jakými jsou *Projekt Principia Cybernetica*, který se snaží integrovat kybernetiku s evoluční teorií a *Americká kybernetická společnost*, která dále rozvíjí princip druhého řádu.

Obor *Sociokybernetiky* aktivně pracuje na kybernetickém chápání sociálních systémů. Současně pokračují s kybernetikou souvztažné programy autopoiesy, dynamiky systémů a teorie řízení, které nacházejí uplatnění v manažerských oborech a dokonce psychoterapii. Dále existují ojedinělá výzkumná střediska především ve střední a východní Evropě, která se soustředí na specifické technické aplikace jako je biologická kybernetika, medicínská kybernetika a inženýrská kybernetika. Tyto obory však udržují bližší kontakt s oblastmi svého uplatnění, než s rozsáhlou oblastí teoretické kybernetiky.

Obecná teorie informací vznikla při hledání takových formalizovaných přístupů, která nejsou založeny výhradně na teorii pravděpodobnosti. Vznikla dokonce sémiotická informační teorie, která věcně pracuje se sémantikou a významem jednotlivých signálů. Celá řada autorů si dnes vážně pokládá otázku, kde jsou hranice matematických mechanizmů a formalizovaných přístupů především v oblastech interdisciplinárního modelování a tím i vědy jako takové. Tyto úvahy vedou až k otázkám na definitivní hranice poznání, zvláště ve vztahu ke schopnosti je zobrazit pomocí matematických a počítačových modelů. Konkrétně lze vyslovit otázku, zda je principiálně možné sestavit modely (ať již formalizované či nikoliv), které by nám pomohly porozumět světu kolem nás v celé jeho komplexitě.

2. Vazbový (relační) přístup

2.1 Rozdíly a vazby

Ve své podstatě se kybernetika zabývá takovými vlastnostmi systému, které jsou nezávislé na konkrétní hmotné podstatě systému a jeho jednotlivých prvcích. Tento přístup umožňuje shodně fyzikálně popsat zcela odlišné systémy jako např. elektronický obvod, mozek, nebo organizaci a následně pracovat s jejich shodnými vlastnostmi (isomorfismy). Jedinou cestou, jak při pohledu na systém abstrahovat od jeho hmotné podstaty a jeho prvků při zachování jeho vnitřní struktury a jeho funkcí, je studium vazeb v systému. Jedná se o řešení otázek, jak se jednotlivé prvky od sebe liší, jak jsou spojeny a jakým způsobem přechází jeden prvek v druhý.

Aby bylo možné tyto otázky řešit, zavádí kybernetika nové koncepční a definiční pojmy, jako *řád*, *organizace, komplexita, hierarchie, struktura, informace* a *kontrola* a zkoumá, jak se tyto definiční pojmy chovají v systémech různých typů. Tyto pojmy definované na základě koncepce vazeb, umožňují analyzovat a formalizovaně modelovat různé abstraktní vlastnosti systémů a jejich dynamiky. Na jejich základě je možné přistoupit například k řešení takové otázky, zda komplexita systému roste v čase.

Základem všech těchto koncepcí založených na zkoumání vazeb jsou pojmy *rozdíl a podobnost*. Kybernetika se obecně nezabývá jevem jako takovým, ale hlavně rozdílem mezi jeho přítomností a nepřítomností a tím, jaký je jeho vztah k jiným rozdílům a jiným jevům. Tato filozofie sahá zpět k Leibnitzovi a je vyjádřena slavnou a nejstručnější Batesonovou definicí informace, která zní: *Informace je „rozdíl, který způsobí rozdíl*". Každý pozorovatel nutně začíná koncepčním oddělením *systému* od zbytku vesmíru, jeho *prostředí*. Hlubší pohled vede k rozlišení existence nebo neexistence různých vlastností (označované také jako dimenze či atributy) systému. Například systém, jakým je kulečníková koule, může mít vlastnosti jako barvu, váhu, pozici, nebo točivý moment. Přítomnost nebo nepřítomnost takové vlastnosti může být vyjádřena pomocí binární Booleanovské proměnné, se dvěma stavy: „ano", systém má tuto vlastnost, nebo „ne" systém vlastnost nemá. G. Spencer Brown vyvinul a ve své knize „Zákony formalismů" představil detailní početní postup a komplexní algebru rozdílů a prokázal, že tato algebra přesto, že vychází z velice jednoduchých axiomů, je slučitelná s tradiční Booleanovskou algebrou.

2.2. Rozmanitost a omezení

Tento binární přístup lze zobecnit na úroveň vlastnosti, zda systém vykazuje, či nevykazuje, mnohočetné diskrétní či spojité hodnoty, jakými mohou být například barva, pozice a točivý moment. Soustava všech hodnot vlastností, které systém v tom kterém okamžiku má, či nemá determinuje jeho *stav*. Kulečníková koule může mít vlastnosti barva v hodnotě *červená*, pozici *x* a moment *p*. Soustava všech možných stavů, do kterých sys-

tém může přejít, je jeho *stavový prostor*. Esenciální součástí kybernetického modelování je kvantitativní míra velikosti stavového prostoru, neboli počtu potenciálních stavů systému. Tato míra se nazývá *rozmanitost*. Rozmanitost představuje svobodu systému zvolit jeden z možných stavů, a tím i míru naší nejistoty o tom, v jakém stavu se systém nachází. Rozmanitost *V* je definována jako počet prvků ve stavovém prostoru *S*, nebo častěji jako logaritmus tohoto čísla k základu dva: $V=\log_2(|S|)$. Jednotka rozmanitosti v logaritmickém vyjádření je *bit*. Rozmanitost hodnoty jednoho bitu, $V=1$, znamená, že systém má dva možné stavy, tedy existuje jeden rozdíl. V nejjednodušším případě *n* binárních proměnných, $V=\log_2(2^n)=n$ odpovídá hodnota *n* minimálnímu počtu na sobě nezávislých dimenzí (rozměrů). Avšak obecně platí, že proměnné, užívané k popisu systémů nejsou ani binární, ani na sobě nezávislé. Pokud by určitý druh ovoce v závislosti na své zralosti mohl být buď malý a zelený, nebo veliký a červený (pozorujeme pouze dvě vlastnosti, barvu a velikost), jsou proměnné „barva" a „velikost" na sobě absolutně závislé. Potom je celková míra rozmanitosti spíše jeden bit, než-li dva, jak by tomu bylo, kdybychom obě vlastnosti sledovali odděleně.

Pokud je současná rozmanitost stavů, kterých systém může nabýt, menší, než absolutní rozmanitost stavů, kterých systém může nabýt potenciálně, potom považujeme systém za omezený. *Omezení C* je definováno jako rozdíl mezi maximální a současnou rozmanitostí systému $C=V_{max}-V$. Omezení snižuje naši míru nejistoty o tom, v jakém stavu se systém nachází a tím nám umožňuje provádět netriviální predikce. V předešlém příkladu můžeme na základě poznání toho, že ovocný plod je malý, predikovat, že je rovněž zelený. Omezení nám umožňují formálně modelovat vztahy, závislosti, či vazby mezi různými systémy nebo jejich jednotlivými stavy. Pokud spojíme modely různých systémů, nebo různých stavů, či dimenzí systému, potom je společný stavový prostor Kartesiánským součinem jednotlivých stavových prostorů: $S=S_1xS_2xS_3x\ldots xS_n$. Omezení nad tímto prostorem, který vznikl jako součin podprostorů, představují vzájemné závislosti mezi stavy podprostorů, jako v příkladu s ovocným plodem, kde stav velikost determinuje stav barvy a naopak.

2.3. Entropie a informace

Rozmanitost a omezení mohou být vyjádřeny a měřeny lépe, pokud zavede pravděpodobnost. Předpokládejme, že neznáme přesný stav *s* systému, ale pouze pravděpodobnostní distribuční funkci *P(s)*, která vyjadřuje, s jakou pravděpodobností se systém ve stavu *s* nachází. Za těchto předpokladů můžeme rozmanitost systému vyjádřit vzorcem Boltzmanovy definice *entropie* ve statistické mechanice:

$$H(P) = \sum_{s\in S} -P(s) \,.\, \log P(s) \qquad (1)$$

H dosahuje maximální hodnoty, pokud jsou všechny stavy stejně pravděpodobné. To znamená, že neexistuje žádný příznak, který by nás vedl

k úvaze, že jeden ze stavů nastane s větší pravděpodobností, než kterýkoliv z ostatních stavů. V takovém případě se entropie *H* přirozeně redukuje na rozmanitost *V*. Nebo jinak, *H* vyjadřuje míru naší nejistoty, nebo neznalosti stavu, ve kterém se systém nachází. Je zřejmé, že *H* = 0, pouze tehdy, pokud je pravděpodobnost určitého stavu 1 (a veškerých ostatních stavů 0). V takovém případě máme jistotu, případně veškeré informace o stavu, ve kterém se systém nachází.

Zavedli jsme pojem omezení jako veličinu, která redukuje nejistotu, tedy jako rozdíl mezi maximální a aktuální nejistotou. Tento rozdíl je možné interpretovat i jiným způsobem a to jako *informaci*. Z tohoto pohledu byla historicky *H* zavedena jako míra kapacity komunikačního kanálu. A skutečně, v případě, že obdržíme nějakou informaci o stavu systému (např. pozorováním), pak to redukuje naší nejistotu o stavu systému snížením pravděpodobnosti existence jiných stavů. Informace *I* , kterou získáme pozorováním je rovna snížení nejistoty prostřednictvím tohoto pozorování: *I* = *H*(před) – *H*(po). Pokud pozorování úplně určí stav systému (*H*(po) = 0), potom *I* redukuje původní entropii nebo nejistotu *H*. Přestože Shannon odmítá používat pojem „informace" k popisu této veličiny, protože je pouze syntaktický a zcela pomíjí *význam* signálu, jeho teorie je obecně známa jako Informační teorie. Veličina *H* byla intenzivně prosazována jako míra či měřítko v mnohých vysoce komplexních vztahových přístupech jakými jsou komplexita a organizace. Entropie, koreláty entropie a koreláty tak významných výsledků jako Shannonova desátého teorému a druhé věty termodynamiky byly využity v biologii, ekologii, psychologii, sociologii a ekonomice.

Musíme však vést v patrnosti, že existují i jiné metody určování stavu systému, které nesplňují aditivní podmínku pravděpodobnostní teorie, podle které musí být součet všech pravděpodobností roven 1. Tyto metody, které zapojují přístupy fuzzy logiky a teorie možností, vedou k alternativním informačním teoriím. Společně s pravděpodobnostní teorií jsou tyto přístupy známy jako Generální Informační Teorie (GIT). V současné době, kdy jsou metody GIT rozvíjeny, dominuje aplikačnímu poli stále ještě pravděpodobnostní přístup k informacím.

2.4. Dynamické modely

Vycházeje z tohoto statického popisu systémů můžeme začít modelovat jejich dynamiku a interakce. Každý proces nebo změna v systému může být vyjádřen jako transformace:

$T: S \rightarrow S: s(t) \rightarrow s(t+1)$. Funkce *T* popisuje ze své definice transformaci *jeden do jednoho* nebo *mnohé do jednoho*, to znamená, že výchozí stav *s(t)* je vždy promítnut do jediného stavu *s(t+1)*. Změnu může obecněji vyjádřit jako relaci $R \subset S \times S$, která nám umožňuje modelovat transformace typu *jeden do mnoha*, nebo *mnohé do mnohých*, kde jeden výchozí stav může vést k různým výsledným stavům. Převedeme-li stav *s* na pravděpodobnostní distribuční funkci *P(s)*, získáme tak možnost vyjádřit takovýto nedeterminovatelný proces prostřednictvím matematického vý-

razu: M: $P(s,t) \rightarrow P(s, t+1)$. M je stochastický proces, nebo přesněji *Markovovův řetězec*, který může být vyjádřen pravděpodobnostní přechodovou maticí: $P(s_j(t+1) \mid s_i(t)) = M_{ij} \in [0,1]$.

S pomocí tohoto procesního zobrazení můžeme zkoumat dynamiku rozmanitosti, což je klíčovou oblastí kybernetiky. Je zřejmé, že transformace „jeden do jednoho" zachová všechny rozdíly mezi stavy a tím i rozmanitost, nejistotu nebo informaci. Podobně transformace „mnohých do jednoho" vymaže rozdíly, tudíž sníží rozmanitost. Naopak nedeterministický popis jeden do mnoha zvýší rozmanitost a tím i neurčitost. V obecném popisu „mnohé do mnohých" vyjádřeného Markovovským procesem může rozmanitost růst nebo klesat v závislosti na výchozí distribuci pravděpodobnosti a struktuře přechodové matice. Při distribuci s rozmanitostí 0 se nemůže rozmanitost snižovat a obecně bude růst. Při distribuci s maximální rozmanitostí bude rozmanitost obecně klesat. V následující části se budeme zabývat některými speciálními případy této nejobecnější transformace.

Pomocí několika malých doplnění je možné využít tento dynamický výraz k modelování interakcí mezi systémy. Systém A ovlivní systém B, pokud je stav systému B v čase t+1 závislý na stavu systému A v čase t. Toto můžeme vyjádřit jako transformaci $T: S_A \times S_B \rightarrow S_B: (s_A(t), s_B(t)) \rightarrow s_B(t+1)$. s_A zde představuje *vstup B*. Obecně nebude B pouze ovlivněno vnějším systémem A, ale ovlivní jiný (nebo tentýž) systém C. To lze vyjádřit prostřednictvím další transformace $T´: S_A \times S_B \rightarrow S_C: (s_A(t), s_B(t)) \rightarrow s_C(t+1)$. s_C zde představuje *výstup B*. Pro externího pozorovatele je B proces, který transformuje vstup na výstup. Pokud pozorovateli nejsou známi stavy systému B a tudíž ani přesné transformace T a $T´$, potom B představuje *černou skříňku* (black box). Prostřednictvím experimentů se vstupy $s_A(t), s_A(t+1), s_A(t+2)$, …, a pozorování sekvence odpovídajících výstupů $s_C(t+1), s_C(t+2), s_C(t+3)$ …, se může pozorovatel pokusit zrekonstruovat dynamiku B. V mnoha případech je pozorovatel schopen určit stavový prostor S_B do takové míry, že se obě transformace stanou deterministickými, aniž bychom byli schopni přímo pozorovat vlastnosti a prvky systému B. Tento přístup lze jednoduše rozšířit, aby se stal plnohodnotnou teorií automatů a počítačů a tím i základem většiny moderních počítačových věd. Toto je další příklad, jak kybernetické modelování může generovat užitečné predikce na základě pouhého pozorování *vazeb* mezi proměnnými a současného zanedbání fyzických prvků systému.

3. Cyklické procesy

V klasické Newtonovské vědě následují důsledky své příčiny v přímé lineární vazbě. Kybernetika se soustředí na procesy, při nichž se důsledek prostřednictvím zpětné vazby stává příčinou samotnou. Takové cyklické vazby byly vědecky vždy složitě uchopitelné a vedly až k hlubokým koncepčním potížím, jakou je například logický paradox vlastního sebe vztahu. Kybernetika napomohla objevu, že cyklická vazba, pokud je správně modelována, může pomoci pochopit takové principiální jevy jako sebeorganizaci, cílové zaměření, identitu a život způsobem, který opouští Newtonovskou vědu. Například Neumannův výklad reprodukce jako cyklického procesu sebekonstrukce předpověděl objevení genetické informace. Cyklické procesy jsou všudypřítomné v komplexních systémech, jakými jsou organismy, ekologické systémy, ekonomická společenství a ostatní sociální systémy.

3.1. Sebeaplikace

Matematicky můžeme cyklickou vazbu vyjádřit poměrně jednoduše prostřednictvím jednoduché rovnice v níž je proměnná zobrazena transformační rovnicí sebe samotné:

$y=f(y)$ (2)

V závislosti na významu proměnné *y* a funkce *f* rozeznáváme různé typy cyklických vazeb. Konkrétním příkladem *f* může být proces snímání objektu videokamerou a *y* obraz, který je promítán na obrazovku. Cyklická vazba $y=f(y)$ vzniká v okamžiku, kdy kamera snímá obrazovku, na níž je promítán její vlastní výstup. V tomto okamžiku se paradoxně *y* stává jak příčinou, tak důsledkem, je zároveň samotným objektem i jeho vlastním zobrazením. V praxi taková smyčka vytvoří řadu vizuálních vzorů velice často obsahujících komplexní symetrické obrazce. Diskrétní vyjádření (2) je $y_{t+1} = f(y_t)$. Rovnice tohoto typu byly důkladně prověřeny při vytváření iteračních postupů a tvoří základ *dynamiky chaosu* a *fraktální geometrie*. Jiný případ užití této rovnice je známá rovnice kvantové mechaniky a lineární algebry:

$ky = f(y)$ (3)

Reálné nebo komplexní číslo *k* nazýváme *vlastní hodnotou f* a *y* je *vlastním stavem*. Rovnice (3) se redukuje na (2) v případě, že $k = 1$, nebo tehdy, pokud je *y* definováno pouze jako konstantní součin. V případě $k = exp(2\pi i\, m/n)$ je $fn(y)$ opět *y*. Imaginární vlastní hodnoty lze využít k modelování periodických procesů, při nichž se systém vrací k výchozímu stavu poté co projde *n* stavů přechodných.

Příkladem takovéto periodicity je sebevztažný výrok (ekvivalent lhářova paradoxu): „Tento výrok je nepravdivý“. Budeme-li předpokládat, že výrok je pravda, musíme dojít k závěru, že je nepravdivý. Budeme-li vycházet z toho, že je nepravdivý, pak musíme dojít k závěru, že je pravda.

V takovém případě bude hodnota výroku oscilovat mezi pravdou a nepravdou a můžeme asi nejlépe předpokládat, že jeho hodnota je imaginární. S využitím rozlišovacích počtů Spencera Browna navrhl Varela podobné řešení problému sebevztažných výroků.

3.2. Sebeorganizace

Nejčastěji používanou aplikací cyklického jevu je případ, kdy $y \in S$ představuje stav systému ve stavovém prostoru S, a f je dynamickým procesem nebo-li transformací. Rovnice (2) potom vypovídá, že y je fixním bodem funkce f, nebo-li *rovnovážným stavem*, či *ohniskem* dynamického systému: Jakmile systém dosáhne stavu y přestává se měnit. Tento přístup můžeme zobecnit, kdy y nahrazuje podsoubor stavů, $y \subset S$. V takovém případě přechází jakýkoliv stav tohoto podsouboru do jiného stavu téhož podsouboru: $\forall x \in y: f(x) \in y$. Budeme-li předpokládat, že y nemá další podsoubor stavů se shodnými vlastnostmi, potom je y gravitačním ohniskem (attractor) dynamického systému. Obor dynamických systémů se zabývá výzkumem gravitačních ohnisek obecně, tedy ohnisek jakéhokoliv typu a velikosti, včetně 0 – rozměrných (rovnovážný stav diskutovaný výše), 1 – rozměrných (limitní cyklus, kdy systém opakovaně prochází stejnou sousledností stavů) a fraktálních ohnisek (tzv. „strange attractor" zvláštní ohnisko).

Každé stabilní ohnisko je obklopeno prouděním (basin) $B(y)$: soubor stavů mimo y, jejichž vývoj nutně skončí uvnitř y: $\forall s \in B(y)$, $s \notin y$, $\exists n$ tak, že platí $f(n)(s) \in y$. V deterministickém systému patří každý stav do gravitačního ohniska nebo proudění. Ve stochastickém systému existuje třetí kategorie stavů, které mohou směřovat do různých gravitačních ohnisek. Jakmile systém přešel do stavu uvnitř gravitačního ohniska, nemůže nabýt stavů mimo něj. To znamená, že míra neurčitosti (nebo statistické entropie) H systému klesla: Víme, že se nenachází v žádném ze stavů mimo gravitační ohnisko. Toto spontánní snížení entropie, případně zvýšení uspořádanosti, či omezení lze považovat za nejobecnější model *sebeorganizace*.

Každý dynamický systém, který má gravitační ohniska, příležitostně skončí v jednom z nich a ztratí možnost nabýt stavů mimo ně. Tento postup nazval Ashby principem sebeorganizace. Rovněž poznamenal, že, pokud se systém skládá z různých subsystémů, potom omezení vzniklé sebeorganizací implikuje, že subsystémy se staly vzájemně závislými, případně vzájemně se adaptovaly. Jednoduchým příkladem tohoto jevu je magnetizace, kde soustava siločar původně směřující náhodně libovolnými směry (maximální entropie) přechází v uspořádanou soustavu siločar směřujících stejným směrem (minimální entropie, neboli vzájemná adaptace). Von Foerster dodal, že sebeorganizace může být posilována náhodnými perturbacemi („šumem") stavů systému, které urychlují průchod systému prouděním a nutí jej opustit mělká (slabá) gravitační ohniska, aby tak přecházeli v ještě stabilnější stavy. Toto je princip *řádu vznikajícího ze šumu*.

3.3. Závěr

Princip gravitačního ohniska můžeme zobecnit na případy, kdy *y* představuje stavový prostor. Rovnice (2) vyjadřuje situaci, kdy každý stav *y* je transformován na jiný stav *y* pomocí funkce *f*. Obecně *f* představuje spíše soustavu transformací, než jednotlivou transformaci. Pokud *f* je potenciálním tvarem dynamiky systému se stavovým prostorem *y* při proměnných externích vstupních parametrech, potom můžeme říci, že systém je organizačně uzavřený. Je invariantní vůči jakékoliv možné dynamické transformaci. Požadavek *uzavřenosti* systému je implicitně požadován v tradičních matematických modelech. Kybernetický pohled naopak vnímá uzavřenost explicitně, zkoumá systém s ohledem na to, že může být uzavřený a současně otevřený ve vztahu vůči různým vlastnostem, f_1 a f_2. Tento pohled na uzavřenost připisuje systému všudypřítomnou *identitu*, která jednoznačně rozlišuje mezi tím, co je součástí systému a co je mimo něj.

Jedna z cest, vedoucích k uzavřenosti systému je sebeorganizace, tedy ponechání systému v dosahu gravitačního ohniska. Jiná cesta spočívá v rozšíření stavového prostotu *y* na větší stavový prostor *y** tak, aby *y** obsahovala veškeré průměty *f* prvků stavového prostoru $y: \forall x \in y: x \in y^*; \forall x' \in y^* : f(x') \in y^*$. Toto představuje tradiční definici soustavy * pomocí rekurze, která je často užívaná při programování, kde je tradičně generována soustava prvků *y** uplatněním transformace na všechny prvky výchozího sytému *y*.

Komplexnějším přístupem uzavřenosti je *autopoiéza* („sebetvorba"), proces v němž systém rekurzivně vytváří vlastní síť fyzických prvků, čímž průběžně obnovuje svou vlastní organizaci s ohledem na své vlastní opotřebování. V této souvislosti je nutné poznamenat, že „organizační" uzavřenost není totožná s uzavřeností termodynamických systémů: autopoetický systém je otevřený vzhledem k výměně hmoty a energie se svým okolím, je však autonomně zodpovědný za způsob, jakým jsou tyto zdroje využívány. Maturana a Varela považují autopoiézu za základní definiční vlastnost živých systémů. Další klíčová vlastnost živých systémů, *reprodukce*, může být považována za speciální formu autopoiézy, kdy reprodukované prvky systému neslouží k jeho vlastní reprodukci, nýbrž k vytvoření jeho kopie. Jak reprodukce, tak autopoiéza, zdá se, vznikly na základě autokatalytického organizačně uzavřeného cyklu chemických procesů, ve kterém je každá, v tomto procesu účastná molekula katalyzována jinou, v tomto procesu účastnou molekulou.

3.4. Zpětnovazební cykly

Dále máme možnost rozšířit svůj pohled nejen na vlastní stav *y*, ale zaměřit se na *odchylku* $\Delta y = (y - y_0)$ stavu *y* vůči danému (tj. rovnovážnému) stavu y_0 a „zpětnovazebný" vztah, prostřednictvím kterého je odchylka závislá sama na sobě. V nejjednodušším případě můžeme tento vztah vyjádřit jako $\Delta y(t+\Delta t) = k\Delta y(t)$. Vzhledem ke znaménku proměnné

k rozlišujeme dva základní případy. Pokud kladná změna *t* (nárůst vůči y_0) vede v následujícím kroku k záporné odchylce (pokles oproti y_0) , potom je zpětná vazba *záporná (k<0)*. Příkladem může být situace, kdy větší populace králíků spase více trávy a v důsledku toho je k dispozici méně potravy pro další králíky. To znamená, že nárůst počtu králíků nad rovnovážný stav povede prostřednictvím nedostatku trávy k následnému snížení populace králíků. Komplementárně vede pokles počtu králíku k většímu růstu trávy a tím k novému rozmnožení králíků. V takových případech bude každá odchylka od y_0 potlačena a systém se spontánně vrací do svého rovnovážného stavu. Takový rovnovážný stav y_0 je stabilní, rezistentní vůči vnějším poruchám. Tato zpětná vazba je všudypřítomná jako řídící mechanizmus ve strojích všech možných typů, v organizmech (například homeostáze či insulinový cyklus), v ekosystémech a v rovnováze nabídky a poptávky v ekonomice.

Opačný případ, kdy nárůst odchylky způsobí další odchylku, se nazývá *kladnou* zpětnou vazbou. Příklad můžeme vidět v šíření chřipkového viru. Čím více lidí je infikováno, tím více virů se dostává do vzduchu, což vede k opětovnému nakažení dalších lidí. Rovnovážný stav obklopený kladnou zpětnou vazbou je nutně nestabilní. Příkladně stav, kdy nikdo není infikován chřipkou je nestabilním rovnovážným stavem, protože postačuje infikování jedné osoby k tomu, aby došlo k epidemickému rozšíření. Kladné zpětné vazby vytváří úprkovitý, výbušný růst, který se zastaví teprve tehdy, jakmile jsou všechny potřebné zdroje růstu spotřebovány. Virus z našeho příkladu se přestane šířit až v tom okamžiku, kdy všichni lidé, kteří mohli být infikováni, infikováni jsou. Dalšími příklady kladné zpětné vazby mohou být závody ve zbrojení, efekt sněhové koule, rostoucí obraty v ekonomice a řetězová reakce vedoucí k nukleární explozi. Záporná zpětná vazba je předpokladem pro stabilitu. Kladná zpětná vazba je zodpovědná za růst, sebeorganizaci a zesilování slabých signálů. V komplexních hierarchických systémech omezují záporné zpětné vazby vyššího řádu růst kladných zpětných vazeb řádů nižších.

Koncept kladných a záporných vazeb je možné zobecnit na sítě mnohonásobných kauzálních vztahů. Kauzální vazby mezi dvěma proměnnými $A \rightarrow B$ (tj. infikovaní lidé → viry) je kladná, pokud nárůst (pokles) hodnoty *A* vede k nárůstu (poklesu) hodnoty *B*. Vazba je záporná pokud nárůst způsobí pokles a naopak. Každému okruhu v kauzální síti může být přiděleno znaménko násobením znamének (+ či -) každé jednotlivé vazby. Tímto máme k dispozici jednoduchý postup, jak zjistit, zda kauzální smyčka povede ke stabilizaci (záporná zpětná vazba), nebo k únikovému procesu (kladná zpětná vazba). Jako další parametr, který musíme vzít v úvahu při studování kauzální vazby je *zpoždění* mezi příčinou a důsledkem. Populace králíků začne růst několik týdnů poté, co vzroste objem spasitelné trávy. Tato zpoždění vedou k oscilaci, tzv. limitnímu cyklu, okolo rovnovážných stavů.

Tyto sítě vzájemně propojených kladných a záporných zpětných vazeb zkoumá matematický obor dynamiky systémů, široká oblast modelující komplexní biologické, sociální, ekonomické a psychologické systémy. Nej-

známější aplikací oboru dynamiky systémů je pravděpodobně „Hranice růstu", program společnosti *Club of Rome*, rozvíjející pionýrskou počítačovou simulaci Jay Forrestera. Dynamika systémů byla popularizována v softwarové aplikaci Stella a počítačových hrách jakou je SimCity.

4. Cílové zaměření a řízení

4.1. Cílové zaměření

Pravděpodobně nejdůležitější inovací kybernetiky je její výklad cílového zaměření, nebo-li smyslu jednání. Pro autonomní systém, jakým může být organismus nebo osoba, je charakteristické to, že se snaží dosahovat vlastních cílů, přičemž překonává překážky okolí, které by mohly způsobit odchylku od žádoucího stavu. To znamená, že cílové zaměření implikuje regulaci – případně přímo kontrolu – poruch. Jako jednoduchý příklad může sloužit řízení teploty v místnosti pomocí termostatu. Poruchy mohou být způsobeny změnami vnější teploty, přirozeným poklesem teploty, otevřením oken či dveří, atd. Úkolem termostatu je minimalizovat takové poruchy a udržovat teplotu v maximální možné míře konstantní s ohledem na zadanou teplotu.

V nejzákladnější rovině je cílem každého autonomního nebo autopoietického systému přežití. Tento cíl pronikl do všech živých systémů cestou přirozeného výběru: Organizmus, který nebyl zacílen na své přežití byl jednoduše eliminován. Uvedený systém bude mít vedle hlavního cíle přežít řadu podřízených cílů, jako udržení tělesné teploty, či nacházení potravy, které nepřímo podmiňují přežití. Umělé systémy, jako termostat nebo automatický pilot nejsou autonomní: Jejich prvotní cíle jsou zadány jejich tvůrci. Jsou tudíž *alopoietické*: Jejich funkcí je vytvářet něco jiného („alo“) než sama sebe.

Cílové zaměření můžeme chápat velice zjednodušeně jako potlačení odchylek od pevného cílového stavu. Z tohoto pohledu se cíl chová podobně jako stabilní ohnisko, ke kterému se systém vrátí po jakékoliv poruše. Jak cílové zaměření, tak stabilita se vyznačují *ekvifinalitou*: různé výchozí stavy vedou ke shodnému cílovému stavu a tím potírají rozmanitost. Rozdíl spočívá v tom, že stabilní systém se vrátí do svého rovnovážného stavu automaticky, aniž by vykonal jakoukoliv práci, či vyvinul jakékoliv úsilí. Systém zaměřený na cíl musí aktivně zasahovat, aby svého cíle dosáhl a cíl udržel. V opačném případě by takový cíl nebyl gravitačním ohniskem.

Kontrola nám může (ve své podstatě) připadat značně konzervativní, odporuje totiž všem změnám, vedoucím k opuštění požadovaného stavu. Samotný efekt však může být velice dynamický a progresivní v závislosti na komplexnosti cíle. Bude-li definován cíl udržet konstantní vzdálenost od pohybujícího se objektu, případně konstantní míru nárůstu určité veličiny, potom představuje potlačení odchylek od žádoucího stavu neustálou změnu. Jednoduchým příkladem může být termicky naváděná raketa, která pronásleduje rychle unikající nepřátelské letadlo.

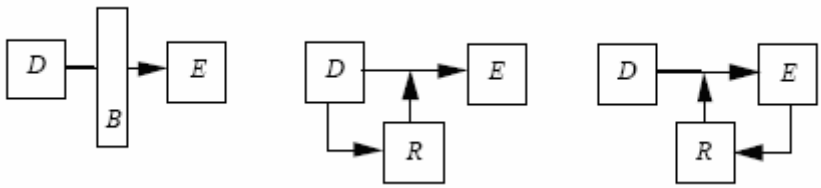
Cíl systému může být rovněž soustavou přijatelných stavů, podobně jako u gravitačního ohniska. Rozměry definující tyto stavy se nazývají *hlavní proměnné*, které se musí pohybovat ve vymezeném rámci, odpovídajícímu přežití systému. Například tělesná teplota člověka musí být udržena přibližně v intervalu od 35 do 40 °C. Ještě obecněji můžeme říci, že cíl může

být chápán jako gradient (přírůstková funkce), nebo-li „vitální funkce" nad stavovým prostorem, který definuje míru či preferenci jednoho stavu vůči stavu jinému. V moderním pojetí je kontrola spojitou optimalizací, neboli průběžnou maximalizací vitality.

4.2. Mechanizmy kontroly

Poruchy zasahující do řídící vazby mohou vznikat uvnitř systému (tj. funkční chyby, množstevní fluktuace) nebo mimo systém (tj. útok šelmy, nebo změna počasí). V obou případech můžeme s poruchami pracovat, jako by měly společný, externí původ. Aby systém zachovával svůj cíl i přes tyto poruchy, musí mít k dispozici způsob, jak blokovat jejich dopady na své hlavní proměnné. Existují tři principiální metody, které dosahují takové regulace: zásobník, zpětná vazba a dopředná vazba (viz obr. 1)

Zásobník způsobuje pasivní absorpci či tlumení poruchy. Například stěna termostaticky regulované místnosti je takovým zásobníkem: Čím je silnější a lépe izolovaná, tím menší je dopad změn vnější teploty na teplotu místnosti. Dalšími příklady může být deformační zóna automobilu, či zásobník vody, který zajišťuje plynulé dodávky v obdobích s různým množstvím srážek. Mechanizmus zásobníku je velice podobný stabilnímu ohnisku: rozptýlení poruchy bez aktivního zásahu. Nevýhodou zásobníku je, že pouze tlumí dopady nekoordinovaných fluktuací; není schopen systematicky navádět systém do nerovnovážného stavu, nebo jej dokonce v takovém stavu udržet. Sebelépe izolovaná zeď není schopna udržet v místnosti teplotu vyšší, než průměrná teplota okolí.



Obr. 1 základní mechanismy regulace zleva doprava: zásobník, dopředná vazba, a zpětná vazba. V každém případě je efekt poruchy D hlavní proměnné E redukován buď pasivním zásobníkem B, nebo aktivním regulátorem R.

Zpětná a dopředná vazba vyžadují *akci* ze strany systému, aby došlo k potlačení nebo kompenzaci poruchy. Termostat reaguje na snížení teploty zapnutím topení. *Dopředná regulace* potlačí dopad poruchy ještě než ovlivní stav vlastních proměnných systému. To předpokládá určitou schopnost *předvídat* dopad poruch na cíl systému. Jinak by systém nemohl vědět, kterou vnější změnu má považovat za poruchu, případně jak kompenzovat změnu, než aktivně ovlivní systém. K tomu je nezbytné, aby systém byl schopen získávat informace o těchto změnách včas.

Dopředná vazba by mohla být zapojena do termostaticky regulovaného okruhu místnosti tak, že čidlo termostatu bude umístěno vně regulované místnosti. Termostat tak s dostatečným časovým předstihem získá informaci o poklesu vnější teploty, aby mohl začít topit ještě dříve, než bude

mít změna vnější teploty dopad na vnitřní teplotu. V mnoha případech je velice obtížné takové předčasné varování instalovat, v jiných může být nespolehlivé. Termostat může zahájit ohřev místnosti na základě předpokladu vnějšího ochlazení, aniž by vzal v potaz to, že někdo v místnosti zapálil krb, který zcela kompenzuje pokles vnější teploty. Žádný senzor nebo předpověď nikdy nemůže poskytnout kompletní informaci o budoucím dopadu nekonečné soustavy možných poruch a změn. Proto je dopředná vazba odsouzena k nespolehlivosti. Dobře postavený řídící systém může mít takových poruch sice jen velice malý počet, avšak potíž spočívá v tom, že se poruchy budou v čase sčítat, což může vyústit v destrukci systému.

Jediná cesta, jak zabránit této akumulaci, je využití zpětné vazby, která kompenzuje chybu či odchylku od cílového stavu poté, co nastala. Tato zpětnovazebná kontrola se nazývá *regulace s řízenou chybou* při níž je chybová odchylka zdrojem řídícího zásahu. Termostat vzorkující teplotu uvnitř místnosti zapíná topení vždy, jakmile klesne teplota pod cílovou hodnotou. Nevýhodou zpětnovazebné regulace je nezbytný vznik odchylky, bez níž by systém neměl informaci o tom, jakou akci vykonat. Proto je zpětná vazba ze své definice nedokonalá, přičemž dopředná vazba by teoreticky, nikoliv však prakticky, mohla být bezchybná.

Důvodem, proč může být zpětná vazba stále efektivní, je spojitost: odchylky od cílových stavů nenastávají náhle, ale většinou nastávají postupně. Regulátor má dost času intervenovat v době, kdy je odchylka ještě malá. Velice citlivý termostat začne přitápět v okamžiku, kdy teplota klesne o desetinu stupně pod cílovou hodnotu. Jakmile teplota opět dosáhne požadovaného stavu, termostat topení opět vypne, čímž teplotu udržuje ve velice malém rozmezí. Tento přesný příklad vysvětluje, proč termostaty obecně nepotřebují vnější senzory a mohou pracovat čistě ve zpětnovazebním módu. Dopředné vazby jsou přesto potřebné tam, kde ke změnám dochází nespojitě, případně se vyvíjejí tak rychle, že každý zpětnovazebný mechanizmus by reagoval pozdě. Zpozorujete-li, že na vás někdo míří zbraní, bude lepší, se klidit z jeho palebné čáry okamžitě a nečekat, až ucítíte, jak se kulka dotýká vaší kůže.

4.3. Zákon nezbytné rozmanitosti

Řízení a regulaci můžeme obecně definovat jako snižování rozmanitosti: poruchy vysoké rozmanitosti zasahují vnitřní stav systému, který se snažíme udržovat v okolí cílového stavu a proto vytváří nízkou rozmanitost. To znamená, že kontrola zabraňuje v jistém slova smyslu přenosu rozmanitosti z okolí do systému. To je opakem přenosu informace, jejímž účelem je maximální zachování rozmanitosti.

Při aktivní regulaci (dopředné a/nebo zpětnovazebné) bude každá odchylka *D* kompenzována odpovídající protireakcí regulátoru *R* (obr. 1.) Pokud by *R* reagovalo na dvě různé odchylky shodně, potom by výstup dosáhl dvou různých hodnot, což by byla nedokonalá regulace. Pokud se snažíme plně zablokovat dopad *D*, potom regulátor musí být schopen vygenerovat alespoň stejný počet protiakcí, jako je odchylek v *D*. Proto musí být zá-

nitě rozmanitost *R* alespoň tak veliká jako rozmanitost *D*. Pokud zohledníme konstantní redukci rozmanitosti pomocí zásobníku *K*, můžeme tento princip přesněji popsat následovně:

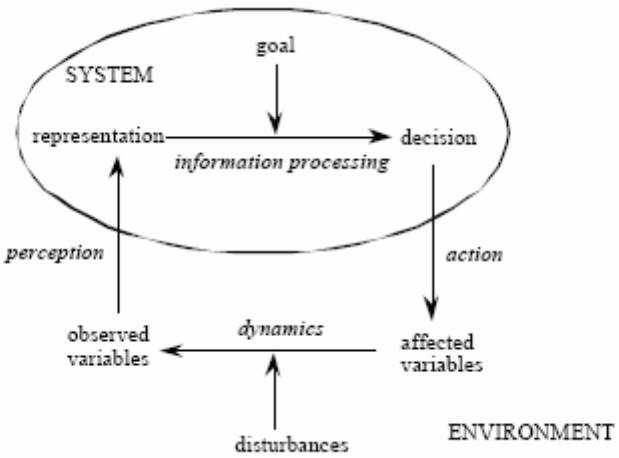
$$V(E) \geq V(D) - V(R) - K \qquad (4)$$

Ashby nazval tento princip *zákonem nezbytné rozmanitosti*: při aktivní regulaci může *rozmanitosti* čelit opět pouze *rozmanitost*. Tento princip vede k intuitivně neočekávanému pozorování, že regulátor musí disponovat *značnou* rozmanitostí akcí, aby mohl dodat poměrně *malou* rozmanitost výstupů hlavních proměnných systému *E*. Toto pravidlo má významné aplikace v praktických případech: Počet poruch, kterým může být systém vystaven je prakticky nekonečný, musíme vždy usilovat o to, abychom maximalizovali jeho vnitřní rozmanitost (diverzitu), aby byl optimálně připraven na jakoukoliv předvídatelnou a nepředvídatelnou okolnost.

4.4. Prvky řídícího systému

Poté, co jsme se zabývaly kontrolou a řízením v obecném pohledu, můžeme se zaměřit na konkrétní prvky a procesy, z nichž je tvořen řídící systém, jako jednoduchý termostat, komplexní organizmus nebo organizace (obr. 2). Jak už je v kybernetice běžné, jsou tyto prvky vnímány jako *funkcionální* a nemusí přímo odpovídat *strukturálním* prvkům.

Základní schéma je zpětnovazebný cyklus se dvěma vstupy: cíl (řídící veličina), která představuje preferované stavy hlavních proměnných systému a poruchy, které představují veškeré procesy okolí systému, které systém nemá pod kontrolou, ale mohou ovlivnit hodnotu hlavních proměnných. Systém pozoruje, nebo vyhodnocuje proměnné, které chce řídit, protože ovlivňují jeho preferovaný stav. Tento krok *měření* vytváří vnitřní obraz vnější situace. Tato informace musí být následně zpracována aby mohlo být určeno: 1) jakým způsobem situace může ovlivnit cíl; a 2) jaká je nejlepší reakce k zachování cílového stavu.



Obr. 2 základní prvky řídícího systému

Na základě provedeného vyhodnocení systém rozhodne o přiměřené akci. Tato akce následně ovlivní část okolí, které naopak ovlivní jiné části okolí prostřednictvím standardní kauzální vazby nebo dynamiky tohoto okolí. Dynamiky jsou ovlivněny soustavou neznámých proměnných, které jsme nazvali poruchami. Dynamické interakce ovlivní i proměnné, které systém řídí. Změny těchto proměnných jsou systémem opět pozorovány, což zase zpustí měření, interpretaci, rozhodnutí a akci, čímž se uzavře řídící okruh.

Toto obecné schéma řízení může obsahovat zásobníkovou, dopřednou i zpětnovazební regulaci. Zásobníková regulace je implicitně používána v dynamikách, které určují, jak dalece poruchy ovlivní sledované proměnné. Sledované proměnné musí zahrnovat hlavní proměnné, které systém chce řídit (zpětnovazební regulace), aby nedocházelo k akumulaci poruch. Dále pak budou obsahovat různé vedlejší proměnné, které slouží jako včasné varovné signály předpokládaných poruch. Takto je zapojena dopředná regulace.

Komponenty tohoto systému mohou být tak jednoduché, nebo tak komplexní, jak je potřeba. V případě termostatu je interpretace pouze jednoduchým měřením jednorozměrné proměnné teplota místnosti; cíl je přesně nastavená požadovaná teplota, kterou termostat udržuje. Zpracování informace spočívá v triviálním rozhodnutí, zda je řízená teplota nižší, než cílová či ne a akce spočívá v zapnutí topení, pokud je teplota nižší, nebo nicnedělání. Řízená veličina je teplota v místnosti. Poruchou je velikost výměny tepla s okolím. Dynamika systému spočívá v tom, jak topení a výměna tepla s okolím ovlivňuje vnitřní teplotu místnosti.

Pro více komplexní příklad si představme radu ředitelů společnosti, jejichž cílem je dlouhodobá maximalizace výnosů z hospodaření společnosti. Jejich akce spočívají v různých iniciativách, jakými mohou být reklamní kampaně, přijímání nových manažerů, rozjezdy výrobních linek, úsporná opatření v administrativě, atd. Takto ovlivňují celkové fungování společnosti. Její fungování je však rovněž ovlivňováno faktory, které ředitelé nemají pod kontrolou, jako je ekonomické klima, aktivita konkurence, poptávka zákazníků, atd. Společně tyto poruchy a iniciativy rady ředitelů ovlivňují úspěšnost společnosti, která je vyjádřena na základě proměnných, jakými jsou objem objednávek, výrobní náklady, rozpracovaný výroba, jméno společnosti, atd. Rada, jakožto řídící mechanizmus, bude každou z těchto proměnných vyhodnocovat vzhledem k cílovému zadání, maximalizaci zisku, a rozhodovat o akcích ke korekci odchylky od žádoucího stavu.

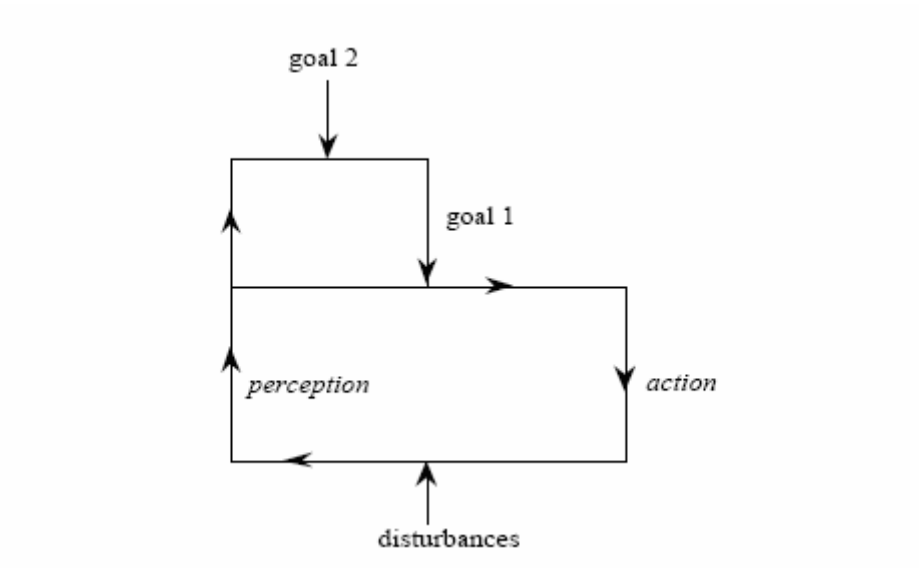
Uvědomme si, že řídící okruh je kompletně symetrický: Pokud schéma na obr. 2 otočíme o 180°, okolí se stane systémem, poruchy se stávají cílem a naopak. Proto lze schéma vykládat jako dva vzájemně se ovlivňující systémy, každý snažící se vnutit svůj cíl druhému systému. Pokud tyto cíle nejsou kompatibilní, vzniká konfliktní případně konkurenční situace. Jindy se může interakce ustálit na vzájemně přijatelném rovnovážném stavu, vytvářeje model kompromisu a spolupráce.

Z pohledu řízení obecně chceme způsobit, aby jeden systém byl silnější než ten druhý a tím byl schopen potlačovat snahu druhého systému prosadit *své* preference. Aby toho bylo dosaženo, musí být do řídící smyčky zabudována *asymetrie*: Akce řídícího systému musí být silnější než akce okolí (řízeného systému) a ne naopak. Toto může být rovněž vyloženo jako *zesilování* signálu, probíhajícího řídícím systémem: Slabě vnímané signály, které nesou informaci a téměř žádnou energii, vedou k energeticky silným akcím. Této asymetrie lze dosáhnout oslabením vlivu okolí tj. odložení jeho akcí do zásobníku a posílením akcí systému tj. vybavením systému silným zdrojem energie. Oba případy můžeme ilustrovat pomocí termostatu: Stěny místnosti poskytují dostatečnou izolaci vůči vnějším poruchám, a přívod paliva dodává dostatečnou kapacitu výroby tepla. V místnosti bez stěn a přívodu energie je termostatická regulace vyloučená. Shodné podmínky platily pro první živé buňky, které potřebovaly membránu k vytvoření zásobníku vůči vnějším poruchám a potravu jako zdroj energie.

4.5. Hierarchie řízení

Uvnitř komplexních systémů, jakými jsou organizmy a organizace, jsou cíle řazeny hierarchicky, vyšší cíle určují nastavení nižších cílů. Například hlavní cíl přežít způsobí cíl nižší úrovně udržet dostatečnou úroveň hydratace, který dále aktivuje cíl vypít sklenici vody. Toto zase aktivuje cíl dopravit sklenici ke rtům. A to v nejnižší rovině způsobí cíl, udržet ruku v klidu, aby nedošlo k rozlití potřebné vody.

Tato hierarchie řízení může být vyjádřena ve schématu řízení obr. 2 tak, že je doplněna další rovina shodně s obr. 3. Původní cíl *1* se tak sám stává výstupem akce, která byla provedena k dosažení vyššího cíle *2*. Cíl termostatu, udržovat teplotu na požadované úrovni, bude podřízen vyššímu cíli, udržet příjemnou tepelnou pohodu přítomných lidí, aniž by docházelo k plýtvání palivem. Toho může být dosaženo doplněním infračerveného senzoru který vnímá, zda jsou v místnosti lidé. Pokud ano, je cílové nastavení termostatu na vyšší úrovni T_1, jinak je nastaven na teplotu nižší, T_2. Tyto řídící úrovně lze libovolně doplňovat zavedením závislosti cíle na úrovni n na akci na úrovni $n + 1$.



Obr. 3: hierarchický řídící systém s dvěma úrovněmi

Řídící okruh sníží rozmanitost poruch, obecně však nemůže eliminovat všechny možnosti. Přidání řídícího okruhu nad původní okruh může eliminovat zbylou rozmanitost. Pokud ani to není dostatečné, lze přidat další úroveň. Potřebný počet úrovní závisí na regulační schopnosti každého jednotlivého řídícího okruhu: Čím je tato schopnost nižší, tím více hierarchických stupňů je potřeba. Toto je Aulinův *zákon nezbytné hierarchie*. Na druhou stranu zvyšování počtu řídících úrovní má dopad na celkovou regulační schopnost systému, protože s rostoucím počtem úrovní roste počet měřících a akčních signálů, které musí systémem proběhnout a tím roste náchylnost na šum, vznik chyb a zpoždění. Proto, pokud možno, je výhodné maximalizovat regulační schopnost jednotlivé vrstvy a tím minimalizovat počet nutných vrstev.

Tento princip má veliký význam při aplikaci na sociální systémy, které tendují k tomu zvyšovat počet byrokratických úrovní řízení. Současný trend zplošťování hierarchií můžeme chápat jako zvyšování regulační schopnosti jednotlivců a organizací na základě vyšších znalostí, lepšího managementu a technické podpory. Pokud se rozmanitost přeroste regulační schopnost jednoho regulátoru, musí, aby mohlo dojít k dalšímu pokroku, vstoupit vyšší řídící úroveň. Valentin Turchin tento proces nazval *metasystematickým přechodem* a navrhl, aby byl považován za základní jednotku, nebo-li „kvantum" vývoje kybernetických systémů. Tento přechod způsobuje růst funkční komplexnosti, která je charakteristická pro tak zásadní vývoj, jakým je vznik života, mnohobuněčných organismů, nervového systému, učení a lidské kultury.

5. Poznání

5.1. Nezbytná znalost

Řízení není závislé jen na nezbytné rozmanitosti akcí regulátoru, regulátor musí rovněž *vědět* kterou z akcí zvolit jako odpověď na danou poruchu. V nejjednodušším případě je znalost tvořena průmětem jeden do jednoho ze sady D měřených odchylek do sady R akcí regulátoru: $f: D \rightarrow R$, promítající každou odchylku do akce, která přesně tuto odchylku potlačí. Termostat z našeho příkladu transformuje měření odchylky, „teplota je příliš nízká" na akci „začni topit" a údaj „teplota je postačující" na akci „netop". Tato znalost může být vyjádřena jako soustava výkonných podmínek „když *podmínka nastala* (zjištěna odchylka), tak *vykonej akci*". Tato „znalost" je uložena v různých systémech různými způsoby, například specifickým přístupem konstruktérů jakými propojili jednotlivé prvky uměle stvořených systémů, uvnitř organizmů na základě evolučně vzniklých struktur jakými jsou geny nebo učící se neuronové spoje v mozku.

Bez existence těchto znalostí by systém byl odkázán na slepé zkoušení jednotlivých akcí do té doby, než by náhodně utlumil odchylku. Čím větší je rozmanitost poruch (a tím i nezbytných akcí), tím menší je pravděpodobnost, že náhodně zvolená akce povede k cíli a tím i přežití systému. Proto zvyšování rozmanitosti akcí musí být doplněno zvyšováním schopnosti výběru odpovídající akce, tedy růstem znalostí. Tento požadavek můžeme nazývat *zákon o nezbytné znalosti*. Protože všechny živé organizmy jsou také řídícími systémy, je základním předpokladem života, mít potřebnou znalost, jak uvádí Maturantův často citovaný výrok *„žít znamená vědět*".

V praktických komplexních řídících aplikacích nebudou řídící zásahy ani náhodné ani přesně definované, bude se jednat spíše o „odborné odhady" mající dostatečnou pravděpodobnost správnosti, avšak bez záruky úspěchu. Zpětné vazby napomáhají v korekcích přesto vzniklých chyb, dříve než dojde k destrukci systému. Takto se hledání cíle stává ekvivalentem heuristického řešení problémů.

Tato neúplná nebo-li „heuristická" znalost může být kvantifikována jako podmíněná neurčitost akce t R při dané poruše D: $H(R|D)$. Tato neurčitost je počítána obdobně vztahu (1). Při použití podmíněných pravděpodobností představuje $P(r|d).H(R|D) = 0$ případ s nulovou neurčitostí, kde veškeré akce jsou jednoznačně determinovány svými poruchami. $H(R|D) = H(R)$ odpovídá absolutnímu ignorování poruchy. Aulin prokázal, že zákon nezbytné rozmanitosti (4) může být rozšířen na znalost nebo ignoranci jednoduchým doplněním podmíněného výroku o neurčitosti (který zůstává implicitně v Ashbyho nepravděpodobnostní formulaci tohoto zákona):

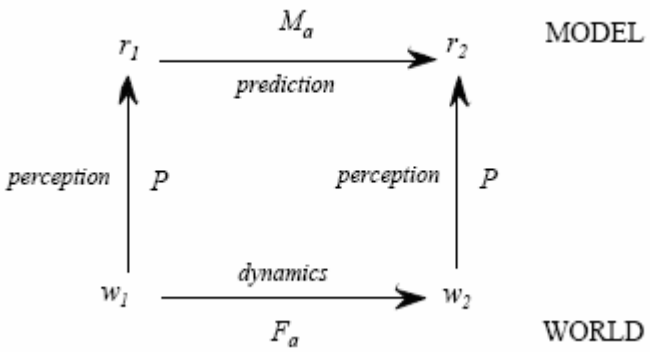
$$H(E) \geq H(D) + H(R|D) - H(R) - K \qquad (5)$$

Toto říká, že rozmanitost hlavních proměnných E může být snížena: 1) zvýšením zásobníku K; 2) zvýšením rozmanitosti akce $H(R)$; nebo 3) sní-

žením neurčitosti $H(R|D)$ kterou z akcí zvolit pro danou poruchu, což je zvýšení znalosti.

5.2. Modelový vztah

Ve výše popsaném pohledu na znalost je cíl implicitní součástí vztahu podmínka – akce, protože odlišný cíl by za stejných podmínek vyžadoval jinou akci. Pokud hovoříme o „vědeckém" či „objektivním" poznání, tak předpokládáme existenci pravidel, které jsou nezávislé na konkrétním cíly. Ve vyšších řídících systémech které mění své nižší cíle, představuje znalost obecněji funkci vytváření *predikcí*: „Co se stane, pokud nastane tato podmínka a / nebo proběhne tato akce?" V závislosti na odpovědi na tuto otázku může systém zvolit nejlepší akci k dosažení svého současného cíle.



Obr. 4: modelový vztah

Toto chápání znalostí můžeme formalizovat tak, že se nejprve vrátíme k našemu původnímu konceptu *modelu*. Nyní zavedeme *endo-model*, nebo-li model *uvnitř systému*, jako protiklad k *exo*-modelu, nebo-li modelu *systému samého*. Obr. 4 zobrazuje model (endo-model), který můžeme chápat jako zvětšeninu části dopředné vazby obecného řídícího systému z obr. 2 při současném pominutí cíle, poruch a akcí.

Vytváření modelu začíná systémem, jehož model vytváříme a který zde budeme označovat jako „svět", se stavovým prostorem $W = \{w_i\}$ a dynamikou F_a: $W \rightarrow W$. Dynamika zobrazuje časový vývoj světa podobně jako v obr. 2, případně při působení akce systému a. Model je sestaven z vnitřních stavů modelu, nebo zobrazeními $R = \{r_j\}$ a modelovou funkcí, nebo soustavou pravidel, $R \rightarrow R$. Tyto jsou spojeny funkcí měření: M: $W \rightarrow R$, která převádí stavy světa do jejich reprezentace v rámci modelu. Predikce M_a je úspěšná, pokud se jí zdaří předpovědět, co se stane s obrazem R pod vlivem akce a. To znamená, že predikovaný stav modelu $r_2 = M_a(r_1) = M_a(P(w_1))$ se musí rovnat stavu modelu, který nastane měřením skutečného stavu světa w_2 po proběhnutí procesu F_a: $r_2 = P(w_2) = P(F_a(w_1))$. Proto platí $P(F_a) = M_a(P)$.

Lze říci, že průměty P, M_a a F_a musí *komutovat* (být zaměnitelné) s M, aby se jednalo o dobrý model, který je schopen předvídat chování světa W.

Celý systém můžeme považovat za *homomorfní* zobrazení stavů světa do stavů modelu, jestliže je zachována dynamika změn. V určitém slova smyslu dokonce primitivní pravidla typu „*podmínka – akce*", zmíněné výše, mohou být chápána jako homomorfní zobrazení událostí („poruch") ve světě do akcí prováděných řídícím systémem. Tento poznatek byl formálně rozpracován Conantem a Ashbym v jejich klasickém článku „Každý dobrý regulátor systému musí být jeho modelem". Naše chápání „modelu" zde je více uhlazené, vycházeje z předpokladu, že řídící systém je schopen zvážit různé predikované stavy $M_a(r_1)$, aniž by nutně prováděl jakoukoliv akci a. Tím se vracíme k významu modelu jako zobrazení, použitého v kapitole 1.2., jak je používán ve vědě obecně, kde jsou pozorování prováděna pouze za účelem potvrdit, nebo vyvrátit predikce, aby současně bylo maximální možnou měrou zabráněno zásahům do jevů, které jsou modelovány.

Na tomto místě je nutné udělat významnou poznámku k *epistemologii*, nebo-li filozofii poznání, vznikající na základě tohoto chápání. Na první pohled se může zdát, že vytváření modelů jako homomorfní zobrazení světa může znamenat, že existuje objektivní vazba mezi objekty ve světě a jejich symbolickém vyjádření v modelu. Toto vede zpět k „naivnímu realismu", který považuje pravdivou znalost za jednoznačný obraz vnější reality, zcela nezávisle na pozorovateli. Homomorfnost na tomto místě nezachovává žádnou objektivní strukturu světa, ale pouze typ a řád jevů tak, jak jsou zjišťovány systémem. Kybernetický systém se zabývá pouze tím, co naznačuje potenciální poruchy jeho vlastních cílů. V tomto smyslu je skutečně subjektivní. Vůbec se nestará o to, co se děje v externím světě a vlastně ani nemá přístup k tomu, co se „objektivně" ve světě děje. Jediný vliv, kterým vnější svět působí na model systému je předání informace o tom, které modely provedly nepřesné predikce. Protože nepřesné predikce znamenají nekvalitní řízení, je tato informace signálem k vytvoření lepšího modelu.

5.3. Učení a vytváření modelů

Kybernetická epistemologie je ve své podstatě *konstruktivistická*: Znalost nemůže být pasivně absorbována z okolí, musí být aktivně vytvořena systémem samotným. Okolí neinstruuje ani neinformuje systém, pouze vyřazuje modely, které jsou nevyhovující tím, že buď poškodí nebo zabije systém, který jich užívá. Na nejzákladnější rovině lze říci, že vytváření modelů probíhá změnou a výběrem, či pokusem a omylem.

K ilustraci použijme jednoduchý vodní organizmus, jehož řídící struktura je o něco sofistikovanější verzí termostatu. K přežití se organismus musí udržet v zóně se správnou teplotou vody tím, že se pohybuje podle potřeby vzhůru do teplejších vrstev vody případně dolů do chladnějších. Jeho měření teploty pracuje s jednou proměnnou ve třech stavech: $X = \{$*příliš horké, příliš chladné, tak akorát*$\}$. Rozmanitost akcí je rovněž na úrovni 3 stavů $Y = \{$*jdi nahoru, jdi dolů, nedělej nic*$\}$. Řídící znalost organizmu je tvořena sadou párů měření – akce, či funkce $f: X \rightarrow Y$. Existuje $3^3 = 27$

takových možných funkcí, ale pouze jedna optimální se skládá z pravidel: *příliš horké→ jdi dolů*, *příliš chladné → jdi nahoru*, *tak akorát → nedělej nic*. Poslední pravidlo lze zaměnit za *tak akorát → jdi nahoru* nebo *tak akorát → jdi dolů*. To by sice vedlo k výdaji energie, ale v kombinaci s ostatními pravidly by takové řešení udrželo organizmus pomocí zpětnovazebního okruhu ve fluktuaci okolo ideální teploty. Všech ostatních 24 kombinací pravidel by narušilo stabilizující zpětnou vazbu a vedlo k únikovému chování systému s eventualitou zahubení organizmu.

Představme si, že možná pravidla jsou zakódována v genech organizmu a tyto geny se vyvíjí na základě náhodných mutací pokaždé, když se organizmus rozmnoží. Každá z mutací, která vyprodukuje jednu z 24 kombinací s kladnou zpětnou vazbou, bude eliminována přirozeným výběrem. Tři kombinace se zápornou zpětnou vazbou zpočátku obstojí, v důsledku konkurence pravděpodobně trvale přežijí pouze ta s nejvyšším energetickým potenciálem. Vzájemná konkurence společně s variacemi v řídících pravidlech a přirozeným výběrem prostřednictvím vlivu okolí pak příležitostně vyústí ve fungující model.

Uvědomme si, že okolí *neinstruovalo* organizmus k vytvoření modelu, organizmus si na to musel přijít sám. Tento princip se může zdát prostý v našem modelu s 27 možnými architekturami, ale postačuje k vysvětlení toho, že u komplexních organizmů existují miliony možných měření a tisíce možných akcí, abychom pak došli k závěru, že prostor možných modelů řídících architektur je absolutně astronomický. Informace získaná z okolí o tom, zda jsou některá zjištění či akce úspěšné, či nikoliv, je příliš omezená na to, než aby byla schopná vybrat správný model ze všech možných. Proto zůstává břímě vývoje adekvátního modelu převážně na organizmu samotném. Organizmus bude muset spoléhat na různé vnitřní heuristické odhady, kombinaci již existujících prvků a subjektivní kritéria výběru, aby byl schopen stvořit model, který bude efektivně fungovat.

Přirozený výběr je zajisté plýtvající přístup k vývoji znalostí, je však zdrojem většiny znalostí, které organizmy vyvinuly ve svých genech. Vyšší organizmy pak vyvinuly efektivnější cestu konstruování modelů: *učení*. Procesu učení mezi sebou konkurují různá pravidla uvnitř jedné řídící struktury organizmu. V závislosti na jejich schopnosti předvídat, případně řídit poruchy jsou pravidla posilována, nebo zamítána. Pravidla častěji posilovaná získají časem dominantní pozici vůči těm méně úspěšným. Toto lze chápat jako aplikaci řízení na meta-úrovni, neboli jako meta-systémový přechod, kde se cílem stává minimalizace vnímaného rozdílu mezi predikcí a pozorováním a akce spočívá ve změně prvků modelu.

Byly vyvinuty různé modely tohoto procesu učení, počínaje Ashbyho *homeostatem*, který pro danou poruchu neprohledával prostor možných akcí, ale prostor možných sad poruch → sadu pravidel akce. Modernější metody pracují s neuronovými sítěmi a genetickými algoritmy. V genetických algoritmech se pravidla mění náhodně a nespojitě pomocí operací jako mutace či rekombinace. V neuronových sítích jsou pravidla tvořena spojitě se měnícími spoji mezi uzly, tvořených senzory, výkonnými prvky a dočasnými

kognitivními strukturami. I když tyto modely učení vznikly v rámci kybernetiky, vyvinuly se v samostatné specializace používající nálepky jako „učení strojů" a „výzkum znalostí".

5.4. Konstruktivistická epistemologie

Kybernetika nabídla široké zorné pole pohledu na živé systémy, které vnímá jako komplexní adaptivní řídící systémy zapojené do cyklických vazeb s okolím. Je přirozené, že kybernetici zabývající se hlubokými otázkami podstaty života, vědomí a společnosti budou docházet k filozofickým a hlavně epistemologickým otázkám.

Jak již bylo uvedeno, nemá systém přístup k poznání jaký svět „skutečně" je. Modely jsou subjektivními výtvory a nikoliv objektivním obrazem skutečnosti. Tyto modely jsou pro vědoucí systémy efektivně jejich okolím. Von Foerster a Maturana uvádějí, že v nervovém systému není *a priori* rozdílu mezi vjemem a halucinací: oba případy jsou obrazem neuronové aktivity. Extrémní interpretace tohoto pohledu může vést k solipsismu, neschopnosti rozlišit mezi vlastními myšlenkami (sny, představy) a vjemy způsobenými vnějším okolím. Toto nebezpečí úplného relativizmu může být odstraněno zavedením požadavku *koherence* a *invariance*.

Přesto, že žádné pozorování nemůže prokázat pravdu modelu, různá pozorování a různé modely se mohou vzájemně potvrzovat či podporovat a tím zvyšovat společnou spolehlivost. Čím soudržnější je některá znalost s veškerými ostatními znalostmi, tím spolehlivější je. Vjemy jsou více „reálné", protože dochází k menšímu rozptylu mezi pozorováními. *Objekt* můžeme definovat jako hledisko vjemu, které zůstává shodné i když se úhel pohledu pozorovatele změnil. Ve von Foersterově vyjádření je objekt eigen-stavem kognitivní (poznávací) transformace (stav náležející vědění, ne objektu). Dále existuje invariance mezi pozorovateli: pokud se různí pozorovatelé dohodnou na vjemu nebo pojmu, může být tento jev považován za „reálný" na základě konsenzu (dohody). Proces dosahování sdílení pojmů se nazývá „sociální konstruování reality". Konverzační teorie Gordena Paska nabízí sofistikovaný formální model „konverzační" interakce, která končí dohodou o sdíleném významu.

Další implikace konstruktivizmu vychází z toho, že každý model musel být zkonstruován pozorovatelem, tudíž pozorovatele musíme zahrnout do modelu, aby byl model úplný. Tento poznatek platí především tam, kde tvorba modelu ovlivní fenomén, který má být modelován. Nejjednodušším případem je situace, kde pozorování samo o sobě ovlivní pozorovaný jev, jako v kvantovém měření, nebo „efekt pozorovatele" v sociálních vědách. Další případ může nastat, pokud předpověď modelu ovlivní jev samotný. Příkladem mohou být sebe naplňující předpovědi, nebo modely sociálních systémů, jejichž užití při řízení způsobí změnu systému a tím znehodnotí model samotný. Brian Arthur významný teoretik v oblasti komplexnosti simuloval zdánlivě chaotické chování burzy jako systémy programujících činitelů, snažících se neustále modelovat budoucí chování systému, k němuž sami náleží a používají tyto modely pro rozhodnutí o svých bu-

doucích akcích. Výstupem je, že různé prediktivní strategie se navzájem vyloučí, takže se dlouhodobé chování systému stává skutečně nepredikovatelným.

Nejvíce logickou cestou odstranění této neurčitosti se zdá vytvoření *metamodelu*, který bude obsahovat různé možné modely a jejich vztahy vůči pozorovatelům a jevům, které modelují. Jedním z rozměrů takového metamodelu by, jak doporučil Stuart Umpleby, mohla být míra s jakou pozorování ovlivňuje pozorovaný jev. Tím by klasická, pozorovatelem neovlivněná pozorování byla jedním extrémem a pozorování v kvantové oblasti by byla blíže extrému druhému.

Metamodel stále zůstává modelem, je tedy stvořen pozorovatelem a musí zobrazovat sám sebe. Toto je základní tvar sebevztahu. Zobecněním výchozích epistemologických omezení jakými jsou Gödelův teorém a Heisenbergův princip neurčitelnosti, formuloval Lars Löfgren *princip lingvistické komplementarity*, který implikuje, že veškeré takové sebevztahy musí být parciální: jazyky nebo modely nemohou obsahovat kompletní zobrazení procesu jakým jsou jejich zobrazení spojena s jevy, které mají popisovat. I když to znamená, že žádný metamodel nebude nikdy kompletní, poskytuje metamodel o hodně širší a flexibilnější metodu, jak dojít k předpovědím, nebo řešit problémy, než jakýkoliv specifický objektový model. Kybernetika jako celek může být definována jako snaha o sestavení univerzálního metamodelu, který by nám pomáhal vytvořit konkrétní objektové modely pro každý specifický systém či specifickou situaci.

6. Literatura

Ashby, W. R.: *Introduction to Cybernetics*. Methuen, London, 1956 - 1999 (electronically republished at http://pcp.vub.ac.be/books/IntroCyb.pdf)

François, C. (ed.): *International Encyclopedia of Systems and Cybernetics*. Saur, Munich 1997

Geyer, F.: The Challenge of Sociocybernetics, *Kybernetes* 24(4)/ 1995, p. 6-32

Heims, S. J.: *Constructing a Social Science for Postwar America: the Cybernetics Group*. MIT Press, Cambridge MA 1991

Heylighen, F., Joslyn, C. & Turchin, V. (eds.): *Principia Cybernetica,* Web, 1991-2001 (http://pcp.vub.ac.be).

Holland, J.: *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*, Addison-Wesley, Reading MA 1995

Klir, G.: *Facets of Systems Science*. Plenum, New York 1991

Maturana, H., Varela, F.: *The Tree of Knowledge* (revised edition). Shambhala Press, Boston 1998

Richardson, G. P.: *Feedback thought in social science and systems theory*. University of Pennsylvania Press, Philadelphia 1991

Meystel, A.: *Intelligent Systems: A Semiotic Perspective*, International Journal of Intelligent Control and Systems 1/1996, p. 31-57

Umpleby, S., Dent, E.: *The Origins and Purposes of Several Traditions in Systems Theory and Cybernetics*, Cybernetics and Systems 30/1999, p. 79-103.

von Foerster, H.: *The Cybernetics of Cybernetics* (2nd edition), FutureSystems Inc., Minneapoli 1995