



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



**Ing. Vojtěch Kamenský, Ph.D.**

## **Zadání laboratorního cvičení: Dynamické simulace pro modelování komplexních systémů poskytování zdravotní péče**

V rámci laboratorního cvičení z předmětu *Dynamické simulace pro modelování komplexních systémů poskytování zdravotní péče* bude student vytvářet návrh dynamické modelové struktury provozu přístrojové techniky ve zdravotnickém zařízení a navrhne metody validace a verifikace modelu. Cílem cvičení je seznámit studenty s možnostmi návrhu modelových struktur, tak aby modely mohli být poté využity pro strategické rozhodování a efektivitě provozu zdravotnické techniky.

Laboratorní cvičení bude probíhat v laboratoři 433 Laboratoř klinického inženýrství a managementu zdravotnické techniky. Tato laboratoř byla pro potřeby nového akreditovaného programu involvována v projektu Modernizace laboratoří pro biomedicínské inženýrství (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_017/0002244) a předmět byl inovován v rámci projektu Biomedicínské inženýrství pro znalostní ekonomiku (CZ.02.2.69/0.0/0.0/16\_018/0002242). Při práci budou využity softwarové modality jako je přístup do databáze ECRI.

### **Obsah**

Modelování a simulace.....	2
Cíle modelování .....	3
Postup vytváření modelu .....	4
Techniky modelování .....	5
Algoritmizace simulačního modelu.....	7
Tok času .....	7
Synchronizace výpočtu.....	7
Vstupy a výstupy simulačních programů .....	9
Úkoly v rámci dynamických simulací.....	11
Úkol 1 Návrh modelové struktury .....	11
Úkol 1 Validace a verifikace modelové struktury .....	11
Seznam přístrojů, softwaru.....	12
Pokyny k zpracování zadaných úkolů .....	12
Poděkování .....	12
Literatura .....	12



## Modelování a simulace

V modelování se snažíme za pomoci souboru aktivit vytvořit matematický (nejen) model, který bude reprezentuje strukturu a chování reálného systému (reálný objekt). Podstatou modelování je tedy náhrada zkoumaného systému jeho modelem (*přesněji: systémem, který jej modeluje*), jejímž cílem je získat pomocí pokusu s modelem informaci o původním zkoumaném systému.

V simulaci se snažíme pomocí souboru aktivit ověřit správnost modelu nebo například získat nové poznatky o činnosti reálných systémů. Simulace je tedy výzkumná technika, jejíž podstatou je náhrada zkoumaného dynamického systému jeho modelem s tím, že s modelem se experimentuje s cílem získat informace o původním zkoumaném dynamickém systému.

Pod pojmem reálný objekt si můžeme představit zkoumanou část reálného světa, která je nám zdrojem dat o chování zkoumaného systému. Můžeme rozlišovat několik kategorií: přirozené („hmatatelné“), umělé, existující, plánované.

Co s můžeme představit pod pojmem systém? Tento pojem má v různých oblastech různé definice, například můžeme zmínit:

- Objekt se vstupními a výstupními signály svázanými přes své vnitřní stavy pomocí obyčejných diferenciálních nebo diferenčních rovnic.
- Systém je množina prvků, které jsou mezi sebou provázány nějakým vztahem, respektive vazbou, a jako celek má tento systém vztah ke svému okolí.

Můžeme v základu rozdělovat systém na statický systém, který zanedbává čas (statický model – např. mapa) nebo systém dynamický, který čas nezanedbává – simulace se zabývá dynamickými systémy. Dynamický systém je v každém okamžiku své existence v jistém stavu a stav se může během plynutí času měnit – změna stavu dynamického systému.

V modelování a simulaci se chápe systém tak, že je složen z prvků. Známe-li jejich chování, můžeme snadněji porozumět tomu, co se děje v celém systému. Prvky systému, tedy prvky abstrakce na nějaké věci, mohou odpovídat komponentám, které na věci nějak poznáváme fyzicky. V dynamickém systému se může počet prvků systému během jeho existence měnit.



Prvky mají své vlastnosti – atributy. Atributy přiřazují prvkům nějaké hodnoty (jak kvantitativní, tak i kvalitativní) a ty se u prvku dynamického systému mohou v čase měnit. Stav systému je představován okamžitými hodnotami stavových proměnných, případně stavem jednotlivých prvků v daném okamžiku.

Změna hodnot jednotlivých prvků může probíhat dvojím způsobem:

- Diskrétně – hodnoty proměnných se mění nespojitě v určitých časových okamžicích.
- Spojitě – proměnné mění svoje hodnoty spojitě ve sledovaném čase.

Proč tedy využíváme modelování a simulace? Snažíme se vytvořit model za účelem pochopení chování reálných systémů, k predikci a optimalizaci reálných objektů.

### Cíle modelování

- Stanovení vazeb mezi jednotlivými součástmi systému
  - Data mohou být známá nebo je nutnost zjistit z experimentálních dat.
  - Model může být použit k určení funkčních vztahů nebo např. stanovení časových závislostí a vztahů.
- Výpočet parametrů systému
  - Předpokladem pro přesné stanovení parametrů systému – nutnost kvalitních vstupních dat.
  - Různé rychlostní konstanty, množství substancí v systému (farmakodynamické modely), apod.
- Integrace informací o systému
  - Z důvodů mnoha interakcí, závislostí a zpětným vazbám, lze procesům v rozsáhlém komplexním systému porozumět pouze pomocí modelování a simulace.
  - Důsledky v rozsáhlých systémech nelze vysvětlit pouze intuicí.
- Predikce chování systému



- Simulaci odezvy na různé vstupy nebo parametry systému. S modelem je lze opakovat za různých podmínek, s různými parametry, jsou nedestruktivní, lze měnit časové měřítko.
- Identifikace rozdílů chování systémů za různých experimentálních podmínek
  - Identifikace citlivosti chování systému vůči různým změnám podmínek činnosti.
- Výuka a vzdělávání
  - Modely jsou neocenitelnou pomůckou při vysvětlování činnosti složitých systémů, jejich pomocí lze demonstrovat vlastnosti systémů, vliv různých principů, lze testovat nové teorie či hypotézy.

Na základě těchto cílů, tak můžeme díky modelování a simulaci přesněji formulovat daný problém a jeho cíle; orientovat se ve složitějších vztazích; oddělovat podstatné od nepodstatného a tím zjednodušovat pozorovaná fakta; odhalovat mechanismy jevů.

### Postup vytváření modelu

Tvorbu modelové struktury můžeme rozdělit do tří úrovní: (i) úroveň koncepční, kde musíme určit, jak komplexní model by měl být, jaké jsou proměnné, a které jsou důležité; (ii) úroveň specifikace, popsání modelu pomocí kódů, diagramů, popis může zahrnovat rovnice, specifikujeme jak model „obdrží“ vstup a poslední (iii) úroveň výpočetní, kde vytváříme model pomocí speciálních počítačových programů nebo simulačního jazyků.

### Postup vytváření modelu:

1. definice problému a účelu proč má být řešen
2. shromáždit veškeré informace, které lze pro řešení využít (většinou experimentální data), data ohledně dřívějších konstrukcí modelů.
3. na základě dat z předchozího bodu připravit experiment poskytující patřičná data
4. podklady pro konstrukci prvních variant modelu



5. definice systému – stanovení základních prvků systému, základních vazeb mezi prvky
6. matematická definice modelu
7. počítačový model
8. ověřování správnosti modelu (platnosti a věrnosti)

### Techniky modelování

#### Obecné techniky modelování

##### Apriorní versus aposteriorní návrh modelu

- zda je model založen již na teoretických znalostech o řešeném problému (známe teoretické předpoklady) či na zkoumání experimentálních dat (aproximujeme data)
  - Apriorní – teoretické – založených teoretických předpokladech
  - Aposteriorní – empirické – vycházejí z experimentálních pozorování (model aproximuje získaná data)

##### Popisný versus mechanistický návrh modelu

- zda struktura modelu odpovídá struktuře reálného systému
  - Popisné zahrnují matematické funkce a rovnice, které reprezentují experimentální data. Jsou zpravidla jednodušší, zpravidla založeny na předpokladech (hypotézách), které musí být dále ověřeny.
  - Mechanistické vycházejí z procesů a mechanismů, které se uplatňují a probíhají v analyzovaném reálném systému. Nevýhodou těchto modelů, že struktura systému musí být známá. Experimenty s reálným objektem mohou být navrženy a připraveny na základě simulačních experimentů s modelem a modely mohou být použity k analýze dat získaných za různých podmínek a identifikaci diferencí. Obecně nejsou ve vztahu k prvkům, proměnným a parametrům reálného objektu

##### Rozsáhlé versus redukované modely

- dle složitosti modelu



Cílem návrhu modelu je nalézt co nejjednodušší model – co nejlépe respektuje experimentální data. Obecně je potřeba najít kompromis mezi požadavky na jednoduchost a přesnost modelu. Určité vlivy nelze dobře měřit nebo jinak kvantitativně postihnout, nebo jejich působení nelze dobře vyjádřit matematickým vztahem.

Modely můžeme dále klasifikovat podle různých parametrů

---

Modely numerické	matematicko-analytické, grafické
Modely znalostní	jazykové popisy reflektující vágnost soustavy
Modely normativní	hledají požadované, optimální stavy systému
Modely deskriptivní	popsují systém a jeho chování
Modely statické	zobrazují chování modelu bez ohledu na změny v čase – nevyužívají se na simulace
Modely dynamické	zobrazují časové průběhy probíhajících dějů
Modely deterministické	zobrazují chování systémů v ideálních podmínkách
Modely stochastické	respektují nahodilé změny
Modely stavové	zobrazují charakteristiky vnitřního stavu systému
Modely přenosové	zobrazují vztahy systému k okolí (vstup/výstup)

---

Pro naše další potřeby v oblasti modelování a simulací a oblasti citlivostních analýz je vhodné si zapamatovat zvláště dělení na deterministické a stochastické modely. Deterministický model vykazuje po opakování pokusu za stejných počátečních podmínek stejné chování. U stochastických modelů uvažujeme přítomnost náhody, i když jsou začáteční podmínky stejné při jednotlivých simulacích dostáváme rozdílné výsledky. Některé změny proměnných nebo některé hodnoty proměnných jsou definovány například pomocí rozdělení pravděpodobnosti.



## Algoritmizace simulačního modelu

V rámci algoritmizace simulačního modelu se jedná o několik kroků: navržení struktury dat pro reprezentaci stavu simulovaného systému; navržení operátorů nad touto datovou strukturou, které realizují změny stavu systému; zobrazit čas modelu a jeho průběh; zajistit synchronizaci stavových změn systému tak, aby tyto změny probíhaly v určitém pořadí a při určitých hodnotách času nebo v okamžicích, kdy je splněna určitá podmínka tykající se stavu či konfigurace modelu. Protože jednotlivé modelovací a simulační techniky jsou různorodé, nelze postup algoritmizace zobecnit pro všechny činnosti tvorby simulačních modelů. Lze zobecnit pro některé činnosti tvorby, které jsou společné pro všechny modely.

### Tok času

V rámci simulací můžeme rozlišovat více „druhů“ času:

- Reálný čas – čas, ve kterém probíhá skutečný děj v reálném systému.
- Simulační čas – modelový (vnitřní) čas simulačního modelu. Tento čas může běžet mnohonásobně rychleji (nebo i pomaleji) než reálný čas. Jedná se tedy o fiktivní čas, který nemusí běžet plynule a rovnoměrně.
- Strojový čas – čas, který je spotřebovaný na výpočet programu, závisí na složitosti modelu a nezávisí se simulačním časem.

Realizace plynutí simulačního času musí odpovídat realitě. Simulační krok = časový úsek výpočtu, během něhož se nemění hodnota simulačního času. V rámci synchronizace stavových změn simulátoru musí být dodržena kauzalita (*Kauzalita - příčinnost, vztah mezi příčinou a jejím následkem*). Hodnota simulačního času nesmí v průběhu výpočtu klesat a děje v simulačním modelu závisejí na simulačním čase stejným způsobem, jako jejich vzory ve výchozím systému na toku přirozeného času.

### Synchronizace výpočtu

Stav dynamického systému v konkrétním časovém okamžiku je určen hodnotami jeho stavových proměnných. Chceme-li sledovat vývoj takového systému musíme v paměťovém



prostoru vyhradit místo pro zobrazení jednotlivých stavových proměnných + pomocí vhodných programových prostředků zajistit aktualizaci hodnot těchto proměnných.

Změny stavu modelu se programově realizují pomocí posloupnosti příkazů, procedur nebo podprogramu. Požadované synchronizace mezi prováděním programové události a simulačním časem se dosáhne tak, že vždy po aktualizaci hodnoty simulačního času provedeme odpovídající programovou událost.

- Pevný (konstantní) časový krok –  $\Delta t = \text{konst.}$ 
  - Nejjednodušším způsobem organizace časové struktury simulačního modelu
  - Problém – jak velký časový krok zvolit
  - Malý – zvýšení počtu výpočetních operací
  - Velký – vznik událostí v jednom časovém okamžiku - shlukování
- Proměnlivý časový krok –  $\Delta t \neq \text{konst.}$ 
  - vhodnější použít

## Metody<sup>1</sup>

- Metoda plánování událostí - diskrétní – asynchronní
- Metoda interakce procesů – diskrétní
- Metoda snímání aktivit - diskrétní (i pro spojitě) – synchronní
- Třífázová metoda - pro diskrétní simulace

---

<sup>1</sup> Přístup metody snímání aktivit se označuje jako synchronní, zatímco přístup metody plánování událostí jako asynchronní.





## Vstupy a výstupy simulačních programů

Pokud máme simulační model zkonstruovaný správně a pravdivě – můžeme jej využít k simulačním experimentům. Pokud chování systému není deterministické – při konstrukci modelu musíme specifikovat základní parametry stochastických procesu probíhajících ve výchozím systému.

- Deterministické modely – prvky a vztahy mezi nimi jsou pevně dány, chování modelu za určitých podmínek je dáno těmito podmínkami. Veličiny a vazby mezi prvky jsou pevné a lze zanedbat jejich kolísání.
- Stochastické modely – prvky nebo vztahy mezi nimi mají charakter náhodných jevů nebo náhodných veličin příp. náhodných procesů. Stochastický model uvažuje jednu nebo více náhodných složek a přibližuje se reálným dějům.

Problémy se stochastickým chováním modelovaných systému:

- Specifikace parametru rozdělení náhodných veličin.
- Modelování procesu s náhodnými parametry.
- Statistické hodnocení simulačních experimentu.

### Specifikace parametru rozdělení náhodných veličin

- Neexistující reálný systém – musíme odhadnout tyto parametry na základě zkušeností s chováním obdobných reálně existujících systémů.
- Reálný systém existuje – parametry odhadnout na základě získaných experimentálních údajů.

### Modelování procesu s náhodnými parametry

Parametry mají charakter náhodných veličin. Známe-li distribuční funkci takových parametru jistého procesu → v modelu jej můžeme napodobit → vytvořený proces s parametry, které budou mít rozdělení dané distribuční funkcí.

### Statistické hodnocení simulačních experimentu

Výsledky simulačních experimentů podléhají statistickému zpracování. Požadavek – jednotlivé simulační experimenty byly statisticky nezávislé. Jak však zajistit nezávislost výsledku různých experimentu?



EVROPSKÁ UNIE  
Evropské strukturální a investiční fondy  
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

- sérií nezávislých simulačních experimentů – s různou inicializací generátoru pseudonáhodných čísel
- stabilizované systémy – jediný simulační experiment – vybrat data, která jsou od sebe časově dostatečně vzdálena
- jiné možnosti



## Úkoly v rámci dynamických simulací

### Úkol 1 Návrh modelové struktury

Vytvořte na základě vašich znalostí (nebo znalostí získaných z rešerše a analýzy materiálů a studií z internetu) koncepční model (pomocí diagramů) například:

- provozu přístrojové techniky na oddělení radiodiagnostiky
- provozu přístrojové techniky na oddělení operačních sálů
- provoz přístrojové techniky na oddělení ARO

Pro vybraný model určete, jakou výzkumnou otázku můžete daným modelem řešit.

- Co je vaším cílem?
- Pro jaké rozhodovací procesy může Vás model být využitý?

Určete, jaká vstupní data do modelové struktury budete potřebovat?

- Zaměřte se na náladová data, data o kvalitě života, přežití pacientů atd.
- Kde nebo jakým způsobem taková data získáte? Jsou některá dohledatelná? Např. informace o přežití, kvalitě života, nákladech?

Pro jakou populaci je váš model vhodný?

- Pokuste se charakterizovat její parametry.
- Populace by měla být určena i na základě stanovené výzkumné otázky.

Vhodné podklady pro tvorbu modelu z dostupných databází odborné literatury, např.:

- Pubmed
- ScienceDirect

### Úkol 1 Validace a verifikace modelové struktury

- V rámci cvičení navrhnete experiment dle které provedete verifikaci a validaci navrženého modelu.
- Navržený experiment musí souviset s určenými vstupními a výstupními daty z první části laboratorního cvičení.
- Jakým způsobem budete výstupy z verifikace a validace ověřovat?
- Jakým způsobem můžete dále modelovou strukturu zpřesňovat?



## Seznam přístrojů, softwaru

Povinné:

- 1.1.2.3.1.2 HW LabKIMZ: PC stanice+monitory

## Pokyny k zpracování zadaných úkolů

Pro zpracování dat v rámci laboratorního cvičení je možno využít statistické programy jako je MATLAB®, R Studio, Stata, SPSS a další. Pro vyhledávání informací týkající se dat bezpečnosti a rovnocenných prostředků využijte přístup do databáze ECRI.

**Řešení zadaných úkolů odevzdejte v podobě závěrečné zprávy (protokolu), zpracované podle přiložené šablony. Tento návod bude přílohou zprávy.**

## Poděkování

Laboratorní cvičení bylo vytvořeno v rámci projektu Biomedicínské inženýrství pro znalostní ekonomiku (CZ.02.2.69/0.0/0.0/16\_018/000224), a bude probíhat v laboratoři 433 Laboratoř klinického inženýrství a managementu zdravotnické techniky, která byla inovována v rámci projektu Modernizace laboratoří pro biomedicínské inženýrství (CZ.02.1.01/0.0/0.0/16\_017/000224).

## Literatura

- [1] Sterman JD. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. New York: McGraw-Hill/Irwin, 2000
- [2] Hannon, Bruce M a Matthias Ruth. Dynamic modeling. 2nd ed. New York: Springer, c2001. ISBN 978-0387988689.
- [3] Weinstein MC, O'Brien B, Hornberger J, et al. Principles of good practice of decision analytic modeling in health care evaluation: Report of the ISPOR Task Force on Good Research Practices-Modeling Studies. Value Health 2003; 6:9-17
- [4] Marshall DA, Burgos-Liz L, IJerman MJ, et al. Applying dynamic simulation modeling methods in health care delivery research-The SIMULATE checklist: Report of the ISPOR Simulation Modeling Emerging Good Practices Task Force. Value Health 2015;18:5-16.
- [5] Brailsford SC, Harper RR, Patel B, Pitt M. An analysis of the academic literature on simulation and modelling in health care. Journal of Simulation 2009; 3:130-140.