

## LÉKAŘSKÉ SIMULÁTORY

Jiří Kofránek, Tomáš Kulhánek

### Anotace

Lékařské simulátory jsou velmi efektivní výukovou pomůckou v lékařství. Simulátory umožňují nácvik základních vyšetřovacích a terapeutických technik a také i nácvik lékařského rozhodování. Sofistikované lékařské trenažéry využívají robotizovanou figurínu pacienta jako uživatelské rozhraní. Jádrem moderních lékařských simulátorů je model propojených fyziologických systémů organismu.

### Klíčová slova

*E-learning, Model, Modelica, Simulátor, Výuka*

### 1. Co si vyzkouším, tomu rozumím

„Co slyším, to zapomenu. Co vidím, si pamatuji. Co si vyzkouším, tomu rozumím.“ – napsal již před téměř patnácti sty lety Konfucius. Tato stará zkušenost ze staré Číny je potvrzována moderními metodami aktivní výuky, kde se široce uplatňují simulační hry a simulátory. Simulátory jsou velmi efektivním nástrojem výuky v mnoha oborech. Umožňují procvičit pracovní postupy ve virtuální realitě a získat praktické návyky, které se ve skutečné realitě získávali zdlouhavěji.

Důležité to je například v letectví – využití simulátorů při výcviku dopravních pilotů šetří prostředky, které by při cvičných letech s velkými dopravními letadly byly nemalé a zároveň umožňují procvičit řadu reakcí na mimořádné letecké situace a poruchy, které procvičovat v reálných podmínkách by bylo nebezpečné a mnohdy i nemožné.

Lékařské trenažéry umožňují, obdobně jako letecké trenažéry, zcela nový způsob výuky, kdy si student bez nebezpečí pro pacienta může ve virtuální realitě procvičovat diagnostické a terapeutické úkony. Simulátory automaticky reagují na podání léků, nejrůznějších infúzí, reagují na nastavení propojených lékařských přístrojů – např. na nastavené parametry anesteziologického přístroje nebo přístroje pro umělou plicní ventilaci apod.

Ale nejenom to, u sofistikovaných lékařských trenažérů může student podrobně sledovat průběhy hodnot nejrůznějších veličin, které u reálného pacienta nejsou běžně dostupné klinickému vyšetřování.

Podstatné je také to, že ve virtuální realitě, na rozdíl od skutečného světa, jsou chyby vratné. V leteckém simulátoru proto můžeme při nácviku přistávání s letadlem mnohokrát po sobě havarovat, zatím co v reálném světě havarujeme s letadlem zpravidla jenom jednou. V medicíně akutních stavů můžeme trénovat diagnostické a terapeutické postupy na virtuálním pacientovi, kterého můžeme kdykoli znovu oživit. V reálném životě však tlačítka „reset“ u pacientů chybí, a jak říká jedno drsné přísloví „chyby záchranářů překryje zem“.

## 2. Lékařské simulátory jako efektivní výuková pomůcka

### 2.1 Lékařské simulátory pro nácvik vyšetřovacích a terapeutických technik

Již mnoho let se různé typy lékařských trenažérů využívají pro nácvik nejrůznějších vyšetřovacích technik - např. cévkování, odběr mozkomíšního moku aj. Na mechanických fantomech se studenti zubního lékařství učí základním stomatologickým úkonům, mechanická figurína se využívá pro nacvičování správného postupu při kardiopulmonální resuscitaci. Byly vyvinuty sofistikované trenažéry, určené k procvičování praktického provádění některých složitějších zdravotnických úkonů (kardiopulmonální resuscitace, katetrizace, endoskopie, intubace pacienta, echografické vyšetřování apod.) na figuríně pacienta. Tyto trenažéry se záhy ukázaly být jedním z velmi efektivních výukových nástrojů, což zvláště v posledních letech, podnítilo rozvoj trhu s těmito výukovými pomůckami (1, 2, 7, 8, 21, 26, 33, 45, 46, 48, 50, 52, 53, 57, 69, 75).

Zvláště efektivní je využití trenažérů pro praktický nácvik postupů při řešení urgentních život ohrožujících stavů členů jednotlivých týmů integrovaného záchranného systému (zdravotníků, hasičů, policistů, vojáků). Výuka se simulátorem zefektivní výcvik součinnosti celého záchranářského týmu při poskytování urgentní zdravotnické pomoci. V reálných situacích je pak řádně vycvičený tým schopen rutinně reagovat v situacích, kdy adekvátní postup



Obrázek 1 — Ukázka z využití umělého pacienta Caesar, specializovaného pro nácvik ošetření vážných zranění (např. ve vojenských operacích) s podporou prostředí Müse. Obrázek byl poskytnut laskavostí společnosti CAE Healthcare, © 2012 CAE Healthcare.

a správná součinnost v prvních minutách, může ovlivnit přežití či nepřežití zachraňovaných osob. Ze stejných důvodů je velmi efektivní využívat lékařské trenažéry i při výcviku armádních bojových jednotek a řada armád světa proto buduje speciální simulační pracoviště pro tento výcvik (obr. 1).

Pokrok v technologiích haptického snímání a v zobrazování virtuální reality přinesl novou třídu lékařských trenažérů, určenou pro výcvik chirurgických technik, laparoskopických technik i pro nácvik ovládnání lékařských chirurgických robotů (17, 42, 47, 58, 62).

## 2.2 Lékařské simulátory pro nácvik lékařského rozhodování

Simulátory neslouží jen pro nácvik manuálního provádění zdravotnických úkonů. Jsou také výhodným nástrojem pro výuku lékařského rozhodování. Spojení internetu a interaktivního multimediálního prostředí se simulačními modely přináší zcela nové pedagogické možnosti zejména pro vysvětlování složitě provázaných vztahů, pro aktivní procvičování praktických dovedností, pro ověřování teoretických znalostí a nácvik lékařského rozhodování formou interaktivní výukové hry.

Multimediální výukové hry ve výuce tak moderními prostředky realizují staré krédo Jana Amose Komenského „Schola Ludus“ – tj. „škola hrou“ (11), které tento evropský pedagog razil již v 17. století.

Rozmach mobilních technologií a široká nabídka tabletů dále rozšiřuje možnosti uplatňování e-learningových metod využívajících multimediální simulace pro výuku různých aspektů lékařského rozhodování.



Obrázek 2 — Ukázka obrazovky z Atlasu srdeční elektrofyzologie pro tablet IPAD.

Na internetu i v nabídce aplikací pro tablety lze tak např. najít nejrůznější e-learningové komerční i nekomerční výukové simulátory pro výuku vyhodnocování EKG např. (55, 77)..

Pro tablety jsou pro podpory výuky lékařského rozhodování vytvářeny elektronické interaktivní atlasy podporující výuku interpretace výsledků moderních diagnostických metod. K jedněm z úspěšných autorů těchto atlasů patří Roman Kerekeš, který se svými spoluautory např. vytvořil rozsáhlý atlas echokardiografie (28), Atlas intervenční kardiologie (27) nebo Atlas srdeční elektrofyziologie (27) – viz obr. 2. Tyto atlasy jsou vydány jak pro tablety iPad, tak i pro platformu Android.

Pro výuku klinického rozhodování jsou vytvářeny speciální simulační programy pracující s tzv. virtuálním pacientem. Tyto simulátory se snaží pomocí simulační hry přiblížit uživatele ke skutečnému klinickému rozhodování o požadovaných vyšetřeních, diagnostických závěrech a navrhované terapii. Většinou tato simulační hra probíhá v diskretních krocích. Student má k dispozici (podle zvoleného scénáře) základní údaje o pacientovi a příslušných vyšetřeních. Může požadovat další vyšetření, dělat diagnostické závěry a na základě diagnostické úvahy a výsledků vyšetření rozhodovat o léčbě. Studentovi jsou poskytnuty výsledky vyšetření a virtuální pacient reaguje na léčbu. Celý proces je monitorován a programem, nebo, což je efektivnější, instruktorem – učitelem, je pak následně vyhodnocován.

Podkladem scénářů jsou zpravidla rozhodovací větvené stromy, případně i stavové automaty, které reagují na vstupy uživatele (4, 30, 31). Výsledky ukazují, že tento způsob klinické výuky je poměrně efektivní. Základem úspěchu je ovšem dobře napsaný scénář a zkušený učitel, který je schopen vést studenty a následně s nimi rozebírat jejich rozhodování.

Výuka lékařského rozhodování pomocí hry s virtuálním pacientem má velký význam zejména v urgentní medicíně. U nás se poměrně úspěšně rozvíjí projekt využívající hry s virtuálním pacientem skupinou brněnských autorů, prezentujících interaktivní hry s virtuálním pacientem v akutní medicíně na serveru Akutne.cz (68).

Nové možnosti, zatím ještě nepříliš často využívané, přináší využití virtuálního internetového 3-D světa pro lékařskou výuku. Virtuální 3D světy představují kolaborativní prostředí, zobrazitelné pomocí internetového prohlížeče. V tomto světě je každý účastník reprezentován figurkou (tzv. avatarem), kterého ovládá. Prostřednictvím svého avatara se může toulat po virtuálním světě (procházet se či dokonce teleportovat do jiných oblastí virtuálního světa). V reálném čase může komunikovat s okolními „avatary“ a provádět nejrůznější aktivity mimo jiné třeba i ve virtuálním 3D prostředí lékařského zařízení může pečovat o virtuálního pacienta (obr. 3). Virtuálním pacientem může být avatar ovládaný učitelem, ale také i naprogramovaný avatar propojený se simulačním modelem (13). Jedním z nejrozšířenějších 3D virtuálních prostředí je 3D prostředí Second Life (<http://secondlife.com/>). Právě v tomto prostředí se v poslední době také nezdíra využívá i pro lékařskou výuku (6, 16, 25, 70, 71).

### 2.3 Způsob řízení lékařských trenažerů

Pro využití lékařských trenažerů ve výuce je podstatný způsob ovládnání jejich parametrů. Zde existují v zásadě dva přístupy:

**1. Scénářem řízené (tzv. patient-driven) trenažéry** – základem jejich řízení je scénář simulovaného onemocnění realizovaný jako větvený algoritmus, který reaguje na vstupy (zadanou terapii, požadavky na vyšetření apod.) a podle předem naprogramovaného algoritmu mění libovolné parametry simulátoru a na výstupu se zobrazují výsledky vyšetření. Tyto simulátory kladou velké nároky na přípravu scénářů, které musí připravovat zkušený klinik. Scénáře mohou zobrazovat realistické výsledky převzaté z výsledků konkrétních pacientů, mají však omezení v tom, že jejich vstupy jsou obvykle dány výběrem z přednastavených možností. Obtížně se scénářem realizuje reakce simulovaného pacienta na kvantifikované vstupy (např. libovolně zvolené dávky léků, dávkování infúzí, nastavení přístroje pro umělou plicní ventilaci apod.).

**2. Modelem řízené (model-driven) trenažéry** - základem jejich řízení je matematický model fyziologických systémů. Scénář simulovaného onemocnění spočívá hlavně v nastavení vstupů a parametrů modelu. Jejich efektivita velmi záleží na tom, jak realistický je model na jejich pozadí. Scénáře simulovaných onemocnění neumožňují nastavit libovolné výstupy simulátoru např. podle výsledků převzatých z chorobopisů skutečných pacientů. V simulátoru nemůžeme měnit hodnoty proměnných, které jsou počítány jako výstupy matematického modelu. Scénář vyžaduje správné nastavení parametrů modelu pro dané simulované onemocnění, což klade nároky na náležitě odladění scénáře. Na druhé straně tyto simulátory umožňují zadávat kvantifikované vstupy (dávky léků apod.).

Pro výuku lékařského rozhodování mají velký význam komplexní, modelem řízené výukové simulátory, zahrnující modely nejen jednotlivých fyziologických subsystémů, ale i jejich propojení do komplexnějšího celku (35). Lékařské simulátory se v poslední době staly i žádaným komerčním artiklem. Objevily se i v nabídce řady specializovaných komerčních firem. Tak například americká společnost Advanced Simulation Corporation, vyrábějící letecké simulátory, se od roku 1993 věnuje též vývoji lékařských simulátorů (<http://www.advsim.com>). Za komerčním úspěchem lékařských simulátorů stojí dobře identifikovaný simulační model na pozadí. Jeho podrobná struktura (soustava použitých rovnic a příslušné hodnoty parametrů) obvykle není zveřejňována a stává se pečlivě chráněným technologickým know-how.

Některé simulátory, např. náš starší simulátor Golem (37), také mohou umožňovat opakované rozpojování a zapojování jednotlivých regulačních smyček, sledovat odezvy jednotlivých fyziologických subsystémů na nejrůznější vstupy odděleně od jejich okolí (což v reálném světě často není možné ani v těch nesložitéjších experimentech). Modelem řízené pacientské simulátory tak mohou sloužit jako interaktivní výuková pomůcka k vysvětlení fyziologických mechanismů fungování lidského organismu.

### 3. Lékařské тренаžéry s robotizovanou figurínou pacienta

Rozhraním výukových simulátorů nemusí být jen obrazovka počítače.

V lékařské výuce na špičkových univerzitách se v poslední době stále více s velkým pedagogickým efektem využívají sofistikované hardwarové тренаžéry určené i k procvičování lékařského rozhodování (5, 12, 15, 22, 43, 44, 49, 51, 54, 56, 59, 60, 67).

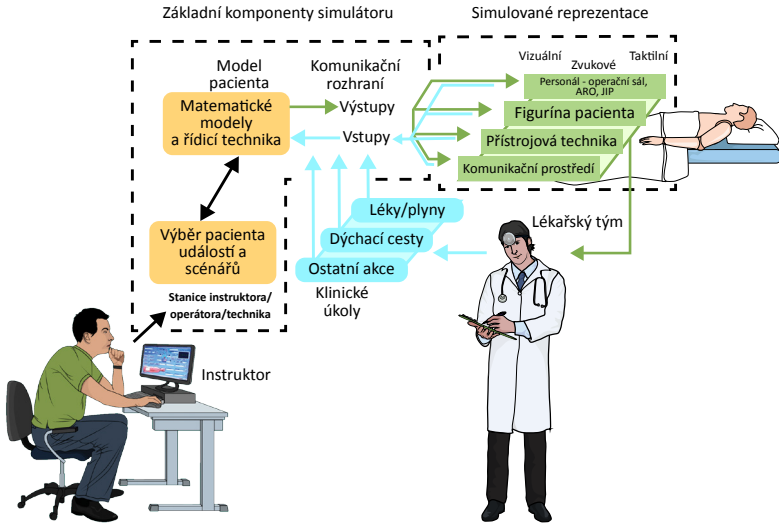
Z didaktického hlediska je velký rozdíl, zda podáváme lék či infúzi kliknutím na příslušnou ikonku na počítači, nebo když příslušnou infúzi či lék musíme podat virtuálnímu pacientovi realizovanému jako figurína (například se procvičí i to, že v reálné praxi příslušné léky musíme mít připraveny tak, aby byly po ruce). Je rozdíl, zda kardiopulmonální resuscitaci provádíme na obrazovce počítače, nebo když srdeční masáž a defibrilátor použijeme v reálné simulační hře s figurínou pacienta. Zejména podstatný rozdíl mezi čistě softwarovou simulací a simulační hrou s virtuálním pacientem realizovaným i fyzicky je v připojování pacienta k lékařským přístrojům. Zatímco pacienta zobrazeného ve virtuální realitě na počítačovém monitoru připojujeme k přístroji umělé plicní ventilace pouze pomocí klávesnice, klikání a pohybu kurzorem myši, v simulační hře s figurínou pacienta musíme fyzicky realizovat připojení k reálnému respirátoru a na jeho ovladači musíme pečlivě nastavit příslušné parametry, což je klinické realitě mnohem blíže. Krom toho, lékařská péče je týmová práce, kdy, zvláště v medicíně akutních stavů, o výsledcích rozhoduje spolupráce a sebranost celého týmu. A spolupráce lékařských profesionálů při péči o akutně nemocného se v čistě softwarových simulacích procvičuje obtížně. Zde pak mají patientské simulátory realizované figurínou pacienta nezastupitelnou roli.

Lékařské тренаžéry využívají figurínu pacienta jako své výstupní zařízení. Figurína dýchá, má hmatný pulz, umožňuje poslechové vyšetření apod. Na druhé straně je figurína i vstupním zařízením – např. při realizaci kardiopulmonální resuscitace, při podávání farmak nebo při propojení figuríny s nějakým lékařským přístrojem.

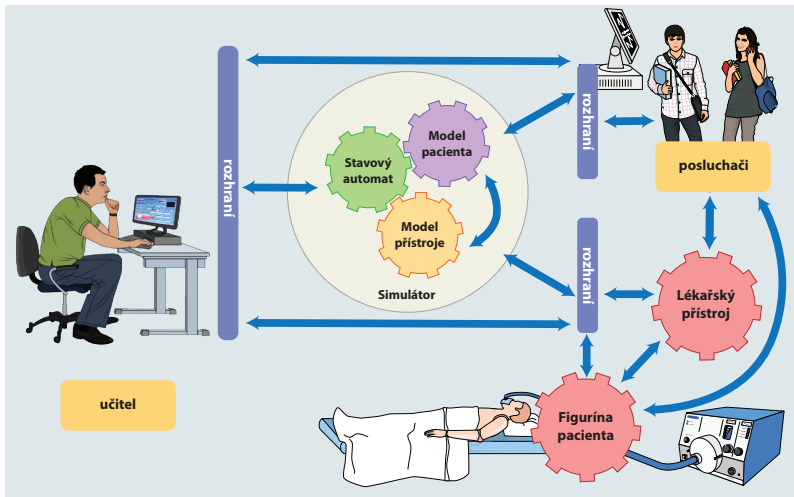
Scénářem řízené (tzv. patient-driven) тренаžéry řídí figurínu pacienta podle scénáře, realizovaného jako větvený algoritmus (přesněji řečeno jako stavový automat), který podle zadávaných vstupů (požadavků na vyšetření, podání příslušných léků apod.) realizuje výstupy (dává výsledky vyšetření, ovládá parametry figuríny zjiitelné vizuálně nebo fyzikálním vyšetřením apod.). Tyto тренаžéry jsou velmi náročné na tvorbu scénáře, protože umožňují naprogramovat v podstatě libovolnou kombinaci výstupů na dané vstupy.

Mnohem složitější, a ve výuce efektivnější, jsou modelem řízené (model-driven) тренаžéry využívající matematické (a u figurín pacientů i kombinované mechanicko-matematické) modely (obr.3).

Přesněji řečeno, praxi se ale vždy jedná o kombinaci scénářem řízeného a modelem řízeného simulátoru. Stavový automat nastavuje podle scénáře hodnoty stavových parametrů modelu a realizuje tak simulaci daného onemocnění (obr. 4).



Obrázek 3 — Obecná struktura modelem řízeného lékařského тренаžéru s figurínou pacienta.



Obrázek 4 — Uplatnění modelu pacienta (přesněji řečeno modelu fyziologických systémů) v tzv. modelem řízeném (model driven) patientském simulátoru.

Studenti na základě výsledků simulovaných vyšetření a v sofistikovanějších simulátorech i na základě dat z reálných lékařských monitorů, připojených k figuríně pacienta, rozhodují o terapeutickém postupu, provádějí léčbu (od připojování pacienta na ventilátor umělé plicní ventilace či anesteziologický přístroj, přes kardiopulmonální resuscitaci, až po podávání simulovaných infúzí, a simulaci podávání příslušných léků). Tyto trenažéry mají velký význam zejména pro nácvik správného lékařského rozhodování v medicíně akutních stavů.

Vlastní trenažér je, obdobně jako u leteckých pilotních simulátorů, řízen ze stanoviště operátora, odkud učitel může ovládat simulovaného pacienta a volit mezi nejrůznějšími scénáři simulovaných onemocnění. Ukazuje se, že z pedagogického hlediska je velice efektivní, když veškeré akce studentů jsou monitorovány a simulátor poskytuje podklady pro pozdější rozbor (debriefing) diagnostického a terapeutického postupu studentů u simulovaného onemocnění (10, 15, 65, 66, 72, 76)..

### **3.1 Struktura modelem řízených lékařských trenažerů s figurínou pacienta**

Modelem řízené lékařské trenažéry s robotizovanou figurínou (manekýna) jsou velmi náročným technickým řešením, kde se kombinují fyzikální a počítačové modely, jsou zajištěny vazby s potřebnými aktéry a zařízeními a kde je vybudováno i příslušné zázemí pro řízení simulační hry, viz obr. 4. Důležitá je možnost připojení reálných lékařských přístrojů nebo jejich počítačem řízených replik k figuríně (manekýnu) pacienta. Čím více reálných přístrojů je možné použít, tím je patientská simulace věrnější a umožňuje v prostředí velmi blízkému reálné situaci simulovat více zákroků. Simulační hru řídí ze svého pracoviště instruktor, který vybírá z nabídky připravených scénářů příslušný simulovaný případ. Příslušný software také umožňuje tyto scénáře vytvářet a také po ukončení simulační hry provádět vyhodnocení průběhu simulovaného případu (tzv. debriefing).

Figurína pacienta i přístrojová technika (reálné přístroje nebo jejich počítačem řízené repliky) jsou napojeny na řídicí systém obsahující matematické modely. Cvičící tým lékařů či studentů medicíny a dalších nelékařských zdravotnických profesí může během simulace sledovat chování simulované figuríny (včetně možnosti fyzikálního vyšetřování) a dostávat další informace o pacientovi prostřednictvím příslušného softwarového prostředí nebo z připojených přístrojů.

V simulačních výukových centrech je pro zvýšení reality simulace někdy také realizováno napojení simulátoru na informační systém nemocnice (a cvičící personál pak dostává informace o výsledcích simulovaných vyšetření ve stejné podobě jako na příslušném nemocničním oddělení).

I když to na obrázcích 3 a 4 přímo není zřejmé, je možné využívat bezdrátové technologie a mobilní dotykové prostředky pro ovládání jak celého experimentu instruktorem, tak i uživatelského rozhraní pro zdravotnický tým v simulační hře.



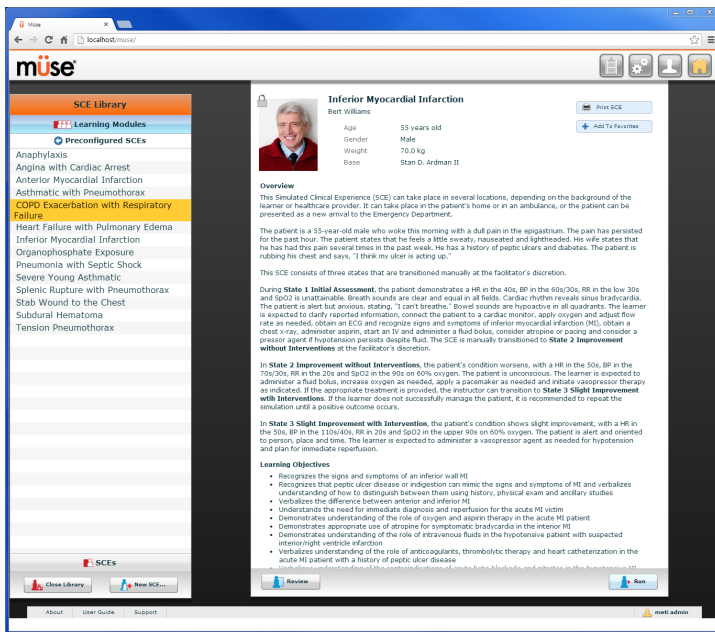
Součástí trenažerů jsou i audio-video systémy pro monitorování veškerého dění v simulační hře, včetně prostředků pro synchronizaci činností celého zdravotnického týmu. K těmto systémům např. patří systém METIVision (Obr. 5), který využívá ve svých simulátorech společnost CAE Healthcare (dříve společnost METI).

Pro umožnění napojení reálných přístrojů na figurínu pacienta – jako např. anesteziologických přístrojů nebo přístrojů pro umělou plicní ventilaci – se v modelem řízených lékařských trenažerech také využívají speciálně konstruované fyzikální mechanické modely propojené s matematickými modely (tzv. hybridní modely). Tak např. v lékařském trenažeru CAE HPS se využívají matematické modely kardiovaskulárního systému a přenosu krevních plynů (model kardiopulmonálního systému), matematické modely farmakokinetiky léků a modely neuromuskulární blokády. Zároveň se zde využívají i hybridní mechanicko-matematické modely plicní mechaniky a plicní výměny plynů, což umožní připojit k simulátoru reálné anesteziologické přístroje a respirátory pro umělou plicní ventilaci (nebo počítačem řízené repliky těchto přístrojů).

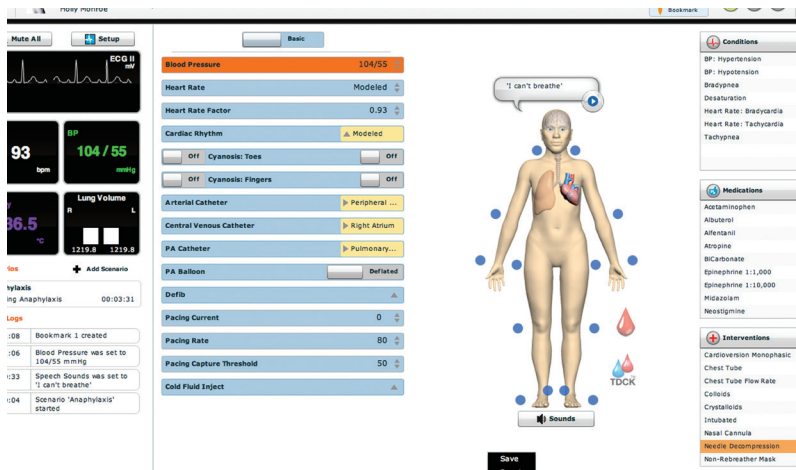
Součástí trenažeru jsou také interaktivní programy, které umožňují pohodlně řídit simulační hru – vybírat scénář simulační hry z jednotlivých předpřipravených scénářů, spouštět simulaci a monitorovat akce lékařského personálu při simulační hře a na závěr vyhodnocovat jeho činnost při tzv. debriefingu. Zároveň toto softwarové prostředí umožňuje scénáře simulačních her vytvářet a ladit. Jako příklad uvádíme na Obr. 6 ukázkou výběru scénářů v prostředí programu Müse. Programové prostředí Müse je určeno k řízení



Obrázek 5 — Müse - ukázka prostředí Müse pro přípravu (tvorba scénáře), řízení a realizaci simulace umělého pacienta společnosti CAE Healthcare.



Obrázek 6 — MUSE - ukázka prostředí MUSE pro přípravu (tvorba scénáře), řízení a realizaci simulace s daným typem umělého pacienta společnosti CAE Healthcare ve spojitosti s laptopem.



Obrázek 7 — MUSE - ukázka prostředí MUSE pro přípravu (tvorba scénáře), řízení a realizaci simulace umělého pacienta společnosti CAE Healthcare. Obrázek byl poskytnut laskavostí společnosti CAE Healthcare, © 2012 CAE Healthcare.



Obrázek 8 — MUSE - ukázka prostředí MUSE pro přípravu (tvorba scénáře), řízení a realizaci simulace s daným typem umělého pacienta společnosti CAE Healthcare ve spojitosti s laptopem. Obrázek byl poskytnut laskavostí společnosti CAE Healthcare, © 2012 CAE Healthcare

simulace (Obr. 7) a tvorbě scénářů pro simulátory společnosti CAE Healthcare. Prostedí MUSE je možné umístit na laptop anebo nejnověji i na tablety a bezdrátově komunikovat se simulátorem (Obr. 8).

Sofistikované robotizované simulátory pacienta dnes vyrábějí především dvě velké společnosti.

První z nich je společnost CAE Healthcare (<https://caehealthcare.com/home/eng>) působící v rámci nadnárodního konsorcia CAE vyrábějícího letecké, důlní i jiné simulátory. CAE Healthcare (dříve společnost METI) nabízí „inteligentní“ patientské simulátory s robotizovanou figurinou pacienta.

Jejich jádrem je rozsáhlý model fyziologických regulací lidského organismu propojený s figurinou pacienta. Díky tomuto modelu jsou simulované parametry trenážeru vzájemně provázané a umožňují realistickou reakci na jednotlivé měněné vstupní parametry – např. reagují na nastavené parametry propojeného přístroje na umělou plicní ventilaci.

Založení společnosti souvisí s výzkumným projektem vytvoření robotizované figuriny virtuálního pacienta propojeného se simulačním modelem na University of Florida, kde byl první trenážer vytvořen v roce 1990. V roce 1996 vznikla díky tomuto univerzitnímu projektu firma METI, která se záhy stala leaderem v oblasti interaktivní simulace lidského pacienta. Mezi simulátory této společnosti patří dítě, adolescent a dospělý a u všech je možnost simulovat různé scénáře, jako například trauma, srdeční záchvat, předávkování drogami či bioterorismus. Simulátory poskytují bezpečným a nákladově efektivním způsobem trénink stávajícím i budoucím lékařům, anesteziologům, zdravotním sestřám, záchranářům, vojenským lékařům a dalším zdravotnickým pracovníkům.

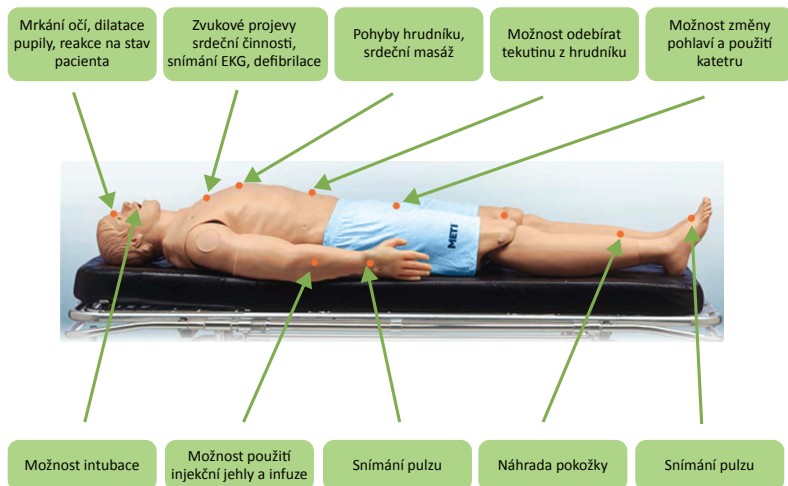
Jedním z nejlepších produktů této společnosti jsou simulátory HPS, METIman

a iSTAN, což jsou detailně propracované bezdrátové simulátory nové generace pro nácvik dovedností ve výuce medicíny, propojené se sofistikovaným matematickým modelem dospělého lidského těla s odpovídajícími fyziologickými vlastnostmi, s automatickou zpětnou vazbou na prováděné úkony a podávání léků. Jsou to simulátory s automatickou dynamickou provázaností plicního, kardiovaskulárního a farmakologického modelu. Tyto unikátní vlastnosti systému nevyžadují obsluhu simulátoru lékařem s přesnou znalostí působení léčiv.

Simulátory umožňují prezentovat klinické příznaky pacienta, např. spontánní dýchání s příslušným pohybem hrudníku, mrkání očních víček a monitorovanými údaji, např. EKG, TK a reagovat na terapeutické intervence studentů s žádným nebo minimálním zákrokem instruktora (obr. 9).

Konstrukce simulátoru dospělého člověka na principu systému lidské kostry umožňuje vysoce realistickou kloubní pohyblivost jednotlivých částí simulátoru pro nácvik správné manipulace s pacientem a možností omezení pohyblivosti krku. Končetiny jsou plně ohebné a pohyblivé, oddělitelné v lokti a koleni pro simulaci amputace končetin. Nový typ pokožky se zvýšenou odolností pro každodenní použití je realistickým modelem lidské kůže s detailním zpracováním.

Simulátory mají taktéž reagující oči – úplná reakce očí umožňuje náhodné, nezávislé a automatické reakce zorniček na světlo a trauma a samozřejmě také mrkání víček.



Obrázek 9 — Stručný popis možností patientského simulátoru CAE (METI) HPS z hlediska snímání fyziologických veličin a ostatních parametrů a též z hlediska možných terapeutických intervencí. Obrázek byl poskytnut laskavostí společnosti CAE Healthcare, © 2012 CAE Healthcare.

Nová konstrukce vestavěného kompresoru se sníženou hlučností umožňuje realističtější poslech příslušných plicních zvuků a je zde také zdokonalená kvalita různých zvuků, jako například hlasitější a jasnější zvuky hlasového projevu, plicních a srdečních ozvů.

Nová softwarová platforma MŮSE s aplikací v systému Windows i Mac kombinuje vysokou výkonnost fyziologického modelu simulátoru s intuitivním ovládním MŮSE.

Robotizované trenažéry firmy CAE Healthcare jsou velmi efektivní (i když nákladnou) výukovou pomůckou pro výcvik anesteziologů a zdravotnických týmů zejména v oblasti medicíny akutních stavů (18, 64).

Dalším klíčovým výrobcem je původně hračkářská firma Laerdal (<http://www.laerdal.com/>) založená v roce 1940 v Norsku. Od původního výrobního programu dětských hraček se záhy přesunula k výrobě tréninkových figurín pro nácvik první pomoci a postupně rozšířila výrobu i na nejrůznější pomůcky pro záchranáře a oddělení intenzivní péče/urgentní příjmy.

Jejich trenažéry jsou řízené spíše scénářem simulovaného onemocnění než simulačním modelem v pozadí simulátoru.

Laerdal se v průběhu let velmi rozrostl a nyní má své pobočky ve 23 zemích. Výrobní, výzkumné a vývojové činnosti provádí na čtyřech různých místech. Společnost má nyní asi 1400 zaměstnanců. Vyrábí sadu robotizovaných simulátorů, včetně simulátor SimBaby úspěšně využívaného jako lékařský trenažér pro péči o novorozence a kojence (61). Trenažéry Laerdal se osvědčily nejen ve výuce lékařů, ale i ve výuce sester (9).

Vrcholem tvorby této firmy je SimMan 3G. Je sice velmi pokročilý, ale má vlastně snadné ovládní. Jedná se o výukový simulátor, který je vhodný jak pro výcvik lékařů, tak i nelékařských zdravotnických pracovníků přednemocniční neodkladné péče.

Simulátor SimMan 3G je realistický model dospělého člověka s odpovídajícími fyziologickými vlastnostmi, s reálnou podobou, hmotností a kloubní pohyblivostí. Je vhodný pro použití na lůžku, na podlaze, v terénu i ve vozidle a je ovládán bezdrátovou technologií wifi.

Simulátor má reálnou podobu dýchacích cest (regulovatelná plicní rezistence a compliance), včetně simulace kritických stavů (astmatický záchvat, laryngitis, bronchospasmus). Dále je zde reálná podoba kardiovaskulárního systému včetně poslechového vyšetření srdečních ozvů a hmatný puls na celkem třinácti místech těla (krk, zápěstí, horní a dolní končetiny apod.). SimMan 3G má také reálnou podobu genitálií a močových cest obou pohlaví.

#### **4. Samotný simulátor nestačí**

Pořídít si drahý simulátor k efektivní výuce samo o sobě ale nestačí.

Jak zvláště v posledních letech upozorňuje řada autorů, výuka se simulátorem klade citelně vyšší nároky na vyučujícího, než klasická výuka. Při správném využití simulátoru je však pedagogický efekt velmi výrazný zvláště v takových oblastech, kde je rychlé a správné rozhodování velmi důležité, například v medicíně akutních stavů a v anesteziologii (3, 14, 15, 19, 29, 34, 59, 74).

Lékařské trenažéry přinesly kvalitativní přelom v možnostech lékařské výuky. Když se na trhu objevila nová generace trenažérů se simulačním modelem na pozadí, nebýval řídký jev, kdy si vzdělávací instituce z různých grantových i jiných prostředků nejprve pořídily za drahé peníze nejrůznější simulační zařízení s předstihem před jasnou vizí jejich efektivního využití (63), pak byl ovšem pedagogický efekt takového nákupu podstatně podvázán. Velmi brzo se ukázalo, že bez specializovaného týmu pedagogů, kteří mají jasnou představu o využití simulátorů v pedagogické praxi, jsou investice do drahého zařízení neefektivní. Vzhledem k technologickým i personálním nárokům proto vznikla na řadě univerzit i mimo ně specializovaná simulační centra pro lékařskou výuku na simulátorech.

Např. v USA jsou taková centra na Harwardu, Stanford University, University of Central Florida, University of Tennessee, University of Virginia, Duke University, University of Rochester a jinde. V USA existuje armádní národní lékařské simulační centrum, v Londýně existuje centrum v Royal Free Hospital, dále také Izraelské centrum lékařských simulací, v Austrálii Flinders University apod.

Další výuková centra vznikají, nebo jejich výstavba je plánována. To podněcuje rychle rostoucí trh lékařských trenažérů.

## 5. Od umění k průmyslu při tvorbě výukového softwaru

Již dávno pryč je doba entuziastů, kteří na přelomu osmdesátých let v nadšení nad novými možnostmi osobních počítačů vytvářeli první výukové programy. Počítače jsou dnes mnohem výkonnější, numerické a grafické možnosti jsou dnes, oproti sklonku osmdesátých let, enormní, pavučina vysokorychlostního internetu obepíná prakticky celý svět a pro uplatnění počítačů ve výuce přináší velký potenciál možnému využití pro vytváření výukových simulačních her dosažitelných přes internet, které jako norimberským trychtýřem pomohou studentům pochopit dynamické souvislosti.

Značně pokročily vývojové nástroje i metodiky softwarové tvorby. Zároveň se ale zvýšily nároky a očekávání uživatelů softwarových aplikací.

Při vytváření simulátorů a výukových simulačních her je nutno řešit dva typy problémů:

**1. Tvorba simulačního modelu** – vlastní teoretická výzkumná práce, jejíž podstatou je formalizované vyjádření reality vyjádřené matematickým modelem. Výsledkem by měl být verifikovaný simulační model, který na zvolené úrovni přesnosti dostatečně věrně odráží chování modelované reality.

**2. Tvorba vlastního výukového simulátoru**, resp. tvorba výukového programu využívajícího simulační hry – je praktická aplikace teoretických výsledků, která navazuje na výsledky řešení výzkumu. Podkladem simulátoru jsou vytvořené (a verifikované) matematické modely. Zde jde o náročnou vývojovou práci, vyžadující skloubit nápady a zkušenosti pedagogů vytvářejících scénář výukového programu, kreativitu výtvarníků vytvářejících interaktivní multimediální komponenty a úsilí programátorů, kteří „sešijí“ výsledné dílo do konečné podoby.

Každý z těchto problémů má své zvláštnosti a vyžaduje proto použít zcela odlišné vývojové nástroje.

Zatímco vytvoření vlastního simulátoru je spíše vývojářskou a programátorskou prací, tvorba simulačního modelu není vývojářský, ale (poměrně náročný) výzkumný problém související s hledáním adekvátního formalizovaného popisu modelované reality. Na základě formalizovaného popisu je vytvořen simulační model, který (řešením příslušných rovnic matematického modelu) na počítači simuluje chování modelované reality. Chování modelu je porovnáváno s chováním reálného systému. Rozdíly v chování vedou ke korekcím formalizovaného popisu (např. stanovením nových hodnot některých koeficientů matematického modelu nebo přímo i ke změnám rovnic modelu) do té doby, dokud chování modelu v daných mezích přesnosti se neshoduje s chováním modelované reality (verifikace modelu).

Zdá se, že pomalu končí doba, kdy vytváření výukových programů bylo otázkou zanícení a pile skupin nadšenců. Tvorba moderních výukových aplikací je náročný a komplikovaný projekt, vyžadující týmovou spolupráci řady profesí – od zkušených učitelů, jejichž scénář je základem kvalitní výukové aplikace, přes systémové analytiky, kteří jsou ve spolupráci s profesionály daného oboru odpovědní za vytvoření simulačních modelů pro výukové simulační hry, výtvarníky, kteří vytvářejí vnější vizuální podobu, až po programátory, kteří celou aplikaci „sešijí“ do výsledné podoby.

Aby mezioborová spolupráce byla účinná, je zapotřebí pro každou etapu vývoje mít k dispozici řadu specifických vývojových nástrojů a metodologií, které práci jednotlivých členů týmu usnadní a pomohou jim překonat mezioborové bariéry. Propojením různých profesí a technologií se tvorba výukového softwaru stává efektivnější, pozvolna přestává být výsledkem kreativity a pracovitosti jedinců a stále více získává rysy inženýrské práce.

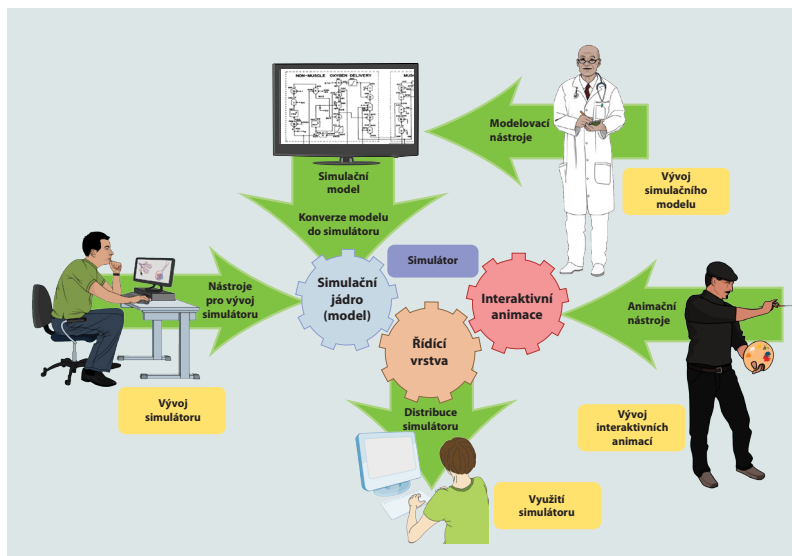
Tvorbou výukových simulátorů se intenzivně zabýváme od poloviny devadesátých let. Během té doby se využitelné technologie doslova měnily pod rukama. Objevovaly se nové technologie usnadňující tvorbu multimediálních animací, propojitelných se simulačním modelem na pozadí. Zároveň se objevily i simulační nástroje, usnadňující vytváření složitých hierarchicky organizovaných modelů.

Dříve jsme využívali modelovací nástroj Simulink. V něm jsme mimo jiné vytvářeli výukový simulátor Golem (37), implementovali klasický Guytonův model řízení oběhu (41) a vytvořili simulinkovou knihovnu Physiobrary. Později jsme přešli na mnohem efektivnější modelovací nástroj – modelovací jazyk Modelica (36), který podstatně usnadňuje tvorbu rozsáhlých hierarchicky organizovaných simulátorů.

Pro propojení jednotlivých vývojových nástrojů mezi sebou jsme si museli vytvořit vlastní softwarové nástroje: např. pro automatizaci konverze modelů, vyvinutých v modelovacích nástrojích Simulink a Modelica do cílové platformy vytvářených simulátorů.

O podrobnostech naší technologie jsme pravidelně referovali na předchozích seminářích MEDSOFT a souhrnně jsme je také popsali v monografii Pacientské simulátory (38).

Podstatná není jen technologie tvorby (Obr. 10), ale i didaktický obsah.



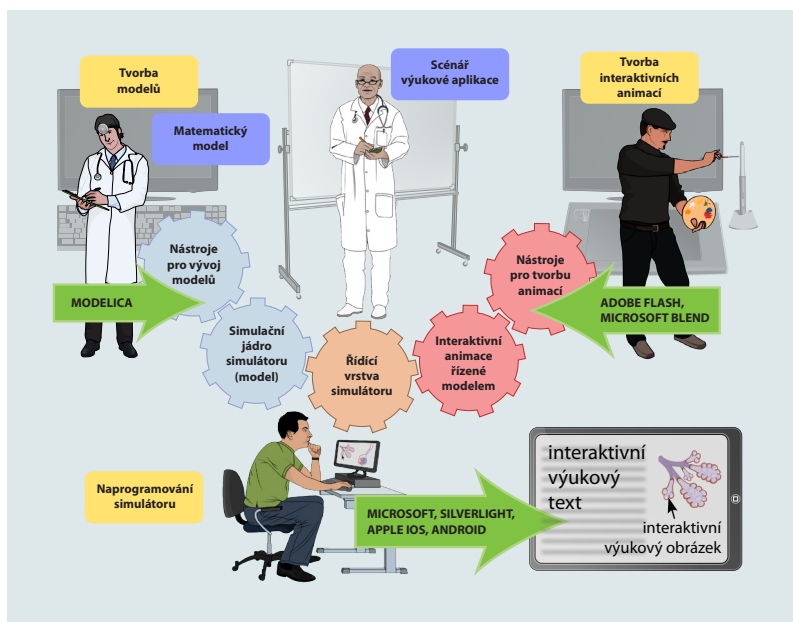
Obrázek 10 — Pracovní postup při tvorbě interaktivních simulátorů. Simulační model (tj. matematický model implementovaný na počítači) je vytvářen, testován a identifikován pomocí softwarových modelovacích nástrojů. Simulátor je vytvářen v softwarovém vývojovém prostředí odlišném od modelovacího prostředí, v němž byl vytvořen simulační model. Proto je zapotřebí vytvořený model přenést do simulátoru - což v praxi znamená naprogramovat simulační jádro simulátoru (tuto konverzi je možné automatizovat pomocí speciálně vytvořených konverzních programů). Součástí uživatelského rozhraní simulátoru jsou interaktivní animace, vytvářené pomocí softwarových animačních nástrojů. Interaktivní animace je pak nutné v simulátoru propojit se simulačním jádrem (animace jsou pak řízené modelem) - to je úlohou tzv. řídicí vrstvy. Vytvořený simulátor je pak distribuován uživatelům - pomocí CD ROM nebo prostřednictvím internetu. Simulátor se nainstaluje do počítače uživatele, některé simulátory jsou schopny běžet přímo v internetovém prohlížeči bez nutnosti instalace

Proto je nesmírně důležité, že si uplatnění simulačních her ve výuce můžeme vyzkoušet přímo ve výukovém procesu, kdy máme zpětnou vazbu vývojového týmu se studenty. To nám umožňuje vyvíjené modely modifikovat tak, aby byly s didaktického hlediska co nejpřínosnější.

Rychlý rozvoj tabletů, které se začínají využívat i jako médium pro elektronickou distribuci knih a interaktivních výukových materiálů otevírá možnost vytvářet lékařské učebnice zcela nového typu. Výukový text může být doprovázen interaktivními animovanými obrázky řízenými podle modelu na pozadí. To nám dá velké pedagogické možnosti pro vysvětlení složité dynamiky fyziologických procesů (viz Obr. 11). Proto v současné době vyvíjíme technologie, které nám tyto nové učební pomůcky umožní vytvářet.

Velkou výzvou do budoucna je tvorba lékařského trenažeru s robotizovanou figurínou pacienta. Simulační model propojený s figurínou pacienta





Obrázek 11 — Tablety nabízejí možnost vytvářet zcela nový druh učebnic, kde je výklad doplněn interaktivními obrázky řízenými matematickým modelem na pozadí. Tak je možné pomocí simulačních her vysvětlit složité provázané dynamické souvislosti. Proto se v poslední době věnujeme vývoji technologií, které nám vytváření těchto nových výukových materiálů umožní.

umožňuje efektivnější výuku (zejména při nácviku spolupráce zdravotnických profesionálů) než simulátor, jehož uživatelským rozhraním je jen obrazovka monitoru. Je skutečně rozdíl zda ve virtuální realitě podáváte infúzi či nějaký lék nebo připojíte pacienta k umělé plicní ventilaci stiskem nějakého tlačítka, než když musíte tyto činnosti (být třeba jen v náznaku) provádět rukama na figuríně pacienta.

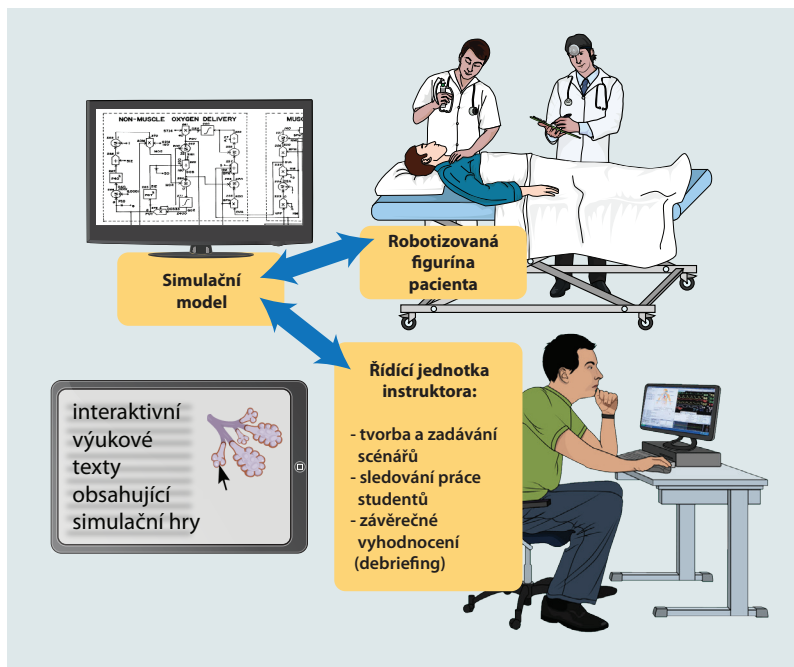
Obdobně jako u pilotních trenažerů je klíčem dobře identifikovaný model letadla a virtuálního prostředí okolí letadla (krajiny, letišť, radiomajáků, komunikace s věží apod.), tak je klíčem k úspěchu lékařských trenažerů dostatečně verifikovaný model integrativní fyziologie pacienta, zahrnující do jednoho celku provázané modely jednotlivých fyziologických subsystémů, včetně modelování vlivu působení jednotlivých léků a možnosti propojení patientského simulátoru s lékařskými přístroji. Integrativní fyziologie se snaží popsat organismus jako celek – k zakladatelům tohoto směru patří Guyton a jeho spolupracovníci, kteří v roce 1972 opublikovali rozsáhlý model krevního oběhu, propojený s dalšími subsystémy organismu (20). Jeho žáci nyní vytvořili model HumMod ([www.hummod.org](http://www.hummod.org)), který v současnosti patří k nejrozsáhlejším modelům lidské fyziologie (24). My jsme tento model modifikovali a rozšířili

zejména v oblasti acidobazické rovnováhy a přenosu krevních plynů a implementovali jej v moderním modelovacím jazyce (39). V tomto jazyce je struktura modelu mnohem přehlednější než v notaci amerických autorů (36).

Modely, které jsou v pozadí úspěšně prodávaných patientských simulátorů s figurínou pacienta (např. simulátory od firmy CAE HealthCare) nejsou zveřejňovány. Částečně však strukturu modelu nedávno podhalil van Meurs ve své monografii (73). Důležitou část tohoto modelu – subsystém hemodynamiky, kterou jsme implementovali v Modelice jsme popsali \na loňském Medsoftu (36).

Model reprezentuje rovnice, které reprezentují formalizovanou představu o fyziologii organismu a ty se obtížně patentově chrání, a proto jejich strukturu firmy utajují.

Tak se integrativní fyziologie a integrované modely fyziologických systémů stávají technologickým know-how pro vývoj výrobků s vysokou přidanou hodnotou.



Obrázek 12 — Naším perspektivním cílem je uplatnění vyvíjeného modelu HumMod-Golem Edition v lékařském trenažéru využívajícím robotizovanou figurínu pacienta pro nácvik lékařského rozhodování. Simulační model přijímá vstupy z robotizované figuríny (např. simulovaná terapie), z připojeného počítače nebo z řídicí jednotky instruktora, výstupy modelu ovlivní chování figuríny, změni informace na připojeném monitoru i informace na řídicí jednotce instruktora.

Do budoucna se proto jeví jako zajímavá možnost využití integrovaného modelu fyziologických systémů HumMod v lékařských trenažérech využívajícím robotizovanou figurínu pacienta (Obr. 12).

Samozřejmě, samotný model zdaleka nestačí – důležitý je návrh a realizace scénářů jednotlivých onemocnění a s tím související nastavení vstupů a parametrů modelu, způsob implementace modelu do trenažéru, návrh a vlastní konstrukce ovládání simulátoru, vytvoření uživatelského rozhraní pro tvorbu a výběr scénářů, konstrukce vlastní robotizované figuríny a propojení hardwarových modulů s modelem, vytvoření uživatelského rozhraní trenažéru pro studenty i ovládacího stanoviště učitele, vybírajícího simulační scénář, monitorujícího akce studentů s následným rozбором diagnostického a terapeutického postupu studentů (tzv. debriefingu) apod.

Konstrukce takového trenažéru si ovšem vyžádá rozšíření vývojového týmu o další profese – zejména odborníky na robotiku, strojírenství, automatizované řízení a užší spolupráci s klinickými pracovišti (zvláště z oblasti akutní medicíny, kde nácvik správných postupů zdravotnických profesionálů při zvládání akutních stavů má klíčový význam). Na rozdíl od reálného světa jsou diagnostické a terapeutické chyby ve virtuální realitě jen virtuální a vratné. Simulaci můžeme vrátit o několik kroků zpět, a zkusit jinou alternativu postupu. Krom toho můžeme při rozboru na modelu sledovat i ty hodnoty, které u reálného pacienta nejsou běžně měřitelné a ožřejmit si tak podrobněji průběh simulovaného onemocnění. Pro lepší pochopení je možné při debriefingu opakovaně rozpojovat a zapojovat jednotlivé fyziologické regulační okruhy. To umožní také sledovat odezvy jednotlivých fyziologických subsystémů na nejrůznější vstupy odděleně od jejich okolí (princip „ceteris paribus“) – v reálném světě to často není možné ani v těch nejsložitějších experimentech na zvířatech.

Scénáře simulovaných onemocnění je také vhodné doplnit výukovými tutoriály se simulačními hrami, které mohou využívat novou technologii elektronických interaktivních knih realizovanou na tabletech.

Možná se tyto cíle zdají být příliš ambiciózní. Nicméně spolupráce Univerzity Karlovy a ČVUT v této oblasti spolu s konsorciem vývojářských firem by mohla být základem vytvoření lékařského trenažéru jako konkurenceschopného výrobku s vysokou přidanou hodnotou.

## Literatura

- [1.] Anderson, J., & R. Raghavan (1997). „Virtual reality in interventional radiology.“ *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies* 6(2), str. 111-116.
- [2.] Aparajita, R., Zayed, M.A., Casey, K., Dayal, R. & Lee, J.T. (2011). *Development and Implementation of an Introductory Endovascular Training Course for Medical Students. Annals of Vascular Surgery*, 25, str. 1104-1112
- [3.] Binstadt, E. S., Walls, R., White, B. A., Nadel, E. S., Takavesu, J. K. & Barker, T. D. (nedatováno). *A Comprehensive Medical Simulation Education Curriculum for Emergency Medicine Residents. Annals of Emergency Medicine*, 49, stránky 495-504.

- [4.] Berman, N. B., Fall, L. H., Chessman, A. W., Dell, M. R., Lang, V. J., Leong, S. L., ... & Smith, S. (2011). A collaborative model for developing and maintaining virtual patients for medical education. *Medical teacher*, 33(4), 319-324.
- [5.] Boulet J. R. & Murray M. D. (2010) *Simulation-based Assessment in Anaesthesiology*. *Anesthesiology*, 112, stránky 1041-52.
- [6.] Boulos, M. N., Hetherington, L., & Wheeler, S. (2007). *Second Life: an overview of the potential of 3-D virtual worlds in medical and health education*. *Health Information & Libraries Journal* (24), stránky 233-245.
- [7.] Campos, J. H., Hallam, E. A., & Ueda, K. (2011). *Training in placement of the left-sided double-lumen tube among non-thoracic anaesthesiologists: intubation model simulator versus computer-based digital video disc, a randomised controlled trial*. *European Journal of Anaesthesiology (EJA)*, 28(3), str. 169.
- [8.] Canché, M., Narváez, L., Chi, V., & Llanes, E. (2011). *An Educational Simulator for Training CPR Skills*. *IJCSNS*, 11(2), str. 54.
- [9.] Cason, C. L., Kardong-Edgren, S., Cazzell, M., Behan, D., & Mancini, M. E. (2009). *Innovations in Basic Life Support Education for Healthcare Providers: Improving Competence in Cardiopulmonary Resuscitation Through Self-Directed Learning*. *Journal for Nurses in Staff Development*, 25, str. E1-E13.
- [10.] Clay, A. S., Que, L., Petrusa, E. R., Sebastian, M. & Govert, J. (2007). *Debriefing in the intensive care unit: A feedback tool to facilitate bedside teaching*. *Critical Care Medicine*: , 35, str. 738-754.
- [11.] Comenius, J. A. (1656). *Schola Ludus, seu Encyclopaedia Viva*. Sarospatak.
- [12.] Cooper, J. B, Taqueti, V. R. (2008). *A brief history of the development of mannequin simulators for clinical education and training*. *Postgraduate medical journal*, 84, str. 563-570.
- [13.] Danforth, D., Procter, M., Heller, R., Chen, R., & J. M. (2009). *Development of Virtual Patient Simulations for Medical Education*. *Journal of Virtual World Research* , 2, str. <https://journals.tdl.org/jvwr/article/view/707/503>, 1-11.
- [14.] Day, R. S. (2006). *Challenges of biological realism and validation in simulation-based medical education*. *Artificial Intelligence in Medicine* , 38, s33stránky 47-66.
- [15.] Dial, E., Schairer, H., Silver, S., Claves, J., Gardiner, D., Caruso, J., Mangione, S., Kane, G. C. (2011). *Training Residents in ACLS/Code Response Using a Computerized Medical Simulator: Improving Resident Comfort and Preparedness*. *The Medicine Forum*, 5, str. 1-11.
- [16.] Diener, S., Windsor, J., & Bodily, D. (2009). *Design and Development of Medical Simulations in Second Life and OpenSim*. *EDUCAUSE Australasia 2009, Perth Western Australia*. 3-6 May 2009 (stránky <http://hdl.handle.net/2292/4305>, 1-13). Perth: Educause Australasia.
- [17.] Dunkin, B., Adrales, G. L., Apelgren, K. & Mellinger, J. D. (2007). *Surgical simulation : a current review*. *Surgical endoscopy* , 21, str. 357-366.
- [18.] Ellaway, R. H., Kneebone, R., Lachapelle, K., & Topps, D. (2009). *Practica continua: Connecting and combining simulation modalities for integrated teaching, learning and assessment*. *Medical Teacher* , 31, str. 725-731.
- [19.] Grant, D.J. & Marriage, S.C.(2012). *Training using medical simulation*. *Archives of Disease in Childhood*. 97, str. 255-259.
- [20.] Guyton, A. C., Coleman, T. G., & Grander, H. J. (1972). *Circulation: Overall Regulation*. *Ann. Rev. Physiol.*, 41, str. 13-41.

- [21.] Hall, R. E., Plant, J. R., Bands, C. J., Wall, A. R., Kang, J., Hall, C.A. (2005). Human patient simulation is effective for teaching paramedic students endotracheal intubation. *Academic Emergency Medicine*, 12, str. 850-855.
- [22.] Hammond, J., Berman, M., Chen, B., & Kushins, L. (2002). Incorporation of a Computerized Human
- [23.] Patient Simulator in Critical Care Training: A Preliminary Report. *The Journal of Trauma, Injury, Infection, and Critical Care*, 53, str. 1064-1067.
- [24.] Hester R, Brown A, Husband L, Ilescu R, Pruett WA, Summers RL and Coleman T (2011). HumMod: A modeling environment for the simulation of integrative human physiology. *Front. Physio.* 2:12. doi: 10.3389/fphys.2011.00012
- [25.] Christopoulou, S., Kotsilieris, T., Dimopoulou, N., & Papoutsis, J. (2013, November). A review of 3D Virtual Worlds in medical and health education. In *E-Health and Bioengineering Conference (EHB)*, 2013 (str. 1-4). IEEE.
- [26.] Chui, C. K., Chen, P., Wang, Y., Ang Jr, M., Cai, Y., & Mak, K. H. (1999). Tactile Controlling and Image Manipulation Apparatus for Computer Simulation of Image Guided Surgery. *Recent Advances in Mechatronics*, Springer-Verlag, str. 423-443.
- [27.] Januška, J., Kerekeš, R. (2011) *CARDIO3® Atlas of Interventional Cardiology*. REKESh Comp, ISBN 978-80-260-0504 <https://itunes.apple.com/us/app/cardio3-atlas-interventional/id459880200?ls=1&mt=>
- [28.] Januška, J., Kerekeš, R. (2013). *CARDIO3® Comprehensive Atlas of Echocardiography*. ISBN 80-969114-8-1, <https://itunes.apple.com/us/app/cardio3-comprehensive-atlas/id406598169?mt=8&ls=1>
- [29.] Jones, A., & Lorraine, S. (2008). Can human patient simulator be used in physiotherapy education? *The Internet Journal of Allied Health Sciences and Practice*, 5, str. 1-5.
- [30.] Kenny, P., Parsons, T. D., Gratch, J., Leuski, A., & Rizzo, A. A. (2007, January). Virtual patients for clinical therapist skills training. In *Intelligent Virtual Agents* (str. 197-210). Springer Berlin Heidelberg.
- [31.] Kenny, P. G., Parsons, T. D., & Garrity, P. (2010, January). Virtual Patients for Virtual Sick Call Medical Training. In *The Interservice/Industry Training, Simulation & Education Conference (I/ITSEC)* (Vol. 2010, No. 1). National Training Systems Association.
- [32.] Kerekeš, R., Kautzner, J. (2012) *CARDIO3 Atlas of Cardiac Electrophysiology & Arrhythmia*. REKESh Comp Ltd. <https://itunes.apple.com/us/app/cardio3-atlas-cardiac-electrophysiology/id526786740?mt=8>
- [33.] Khanal, P. & Kahol, K. (2011). Interactive Haptic Virtual Collaborative Training Simulator to Retain CPR Skills, *Ambient Media and Systems, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 70 (Part 4), str. 70-77.
- [34.] Kobayashi, L. K., Patterson, M. D., Overly, F. L., Shapiro, M. J., Williams, K. A., & Jay, G. D. (2008). Educational and research implications of portable human patient simulation in acute care medicine. *Academic Emergency Medicine*, 15, str. 1166-1174.
- [35.] Kofránek, J. (2011). Komplexní modely fyziologických systémů jako teoretický podklad pro výukové simulátory. *Medsoft 2011*, str. 73-105. Práce je dostupná on line na adrese [http://www.creativeconnections.cz/medsoft/2011/Medsoft\\_2011\\_Kofranek\\_Jan.pdf](http://www.creativeconnections.cz/medsoft/2011/Medsoft_2011_Kofranek_Jan.pdf)
- [36.] Kofránek, J. (2013). *Modelica*. Medsoft 2013, str. 64-114, práce je dostupná na adrese: [http://www.creativeconnections.cz/medsoft/2013/Medsoft\\_2013\\_Kofranek2.pdf](http://www.creativeconnections.cz/medsoft/2013/Medsoft_2013_Kofranek2.pdf)

- [37.] Kofránek, J., Anh Vu, L. D., Snášelová, H., Kerekeš, R., & Velan, T. (2001). GOLEM – Multimedia simulator for medical education. V L. Patel, R. Rogers, & R. Haux (Editor), *Studies in Health Technology and Informatics*, vol. 84, MEDINFO 2001, Proceedings of the 10th World Congress on Medical Informatics., str. 1042-1046. London: IOS Press. Práce je dostupná na adrese <http://www.physiome.cz/references/MEDINFO2001.pdf>
- [38.] Kofránek, J., Hozman J. (2013). *Pacientské simulátory*. Creative Connections, 2013, ISBN 978-80-904326. Kniha je dostupná on line na adrese: <http://www.creativeconnections.cz/pacientskesimulatory/>
- [39.] Kofránek, J., Mateják, M. & Privityzer, P. (2011) HumMod - large scale physiological model in Modelica. Proceedings of 8th. International Modelica conference, Dresden, Germany, March 20-22, 2011, Dresden, Linköping Electronic Conference Proceedings (ISSN: 1650-3686), str. 713-724, Dostupno na: <http://www.ep.liu.se/ecp/063/079/ecp11063079.pdf>.
- [40.] Kofránek, J., Matoušek, S., Rusz, J., Stodulka, P., Privityzer, P., Mateják, M., & Tribula, M. (2011). The Atlas of Physiology and Pathophysiology: Web-based multimedia enabled interactive simulations. *Computer methods and programs in biomedicine*, 104(2), str. 143-153.
- [41.] Kofránek, J & Rusz, J. (2010). Restoration of Guyton diagram for regulation of the circulation as a basis for quantitative physiological model development. *Physiological Research*, 59, str. 897-908 Práce je dostupná na adrese [http://www.biomed.cas.cz/physiologies/pdf/59/59\\_897.pdf](http://www.biomed.cas.cz/physiologies/pdf/59/59_897.pdf).
- [42.] Kössi, J., & Luostarinen, M. (2009). Virtual reality laparoscopic simulator as an aid in surgical resident education two years experience. 28, str. 48-54.
- [43.] Levine, A. I., Flynn, B. C., Bryson, E. O., & DeMaria, S. (2012). Simulation-based Maintenance of Certification in Anesthesiology (MOCA) course optimization: use of multi-modality educational activities. *Journal of clinical anesthesia*, 24(1), str. 68-74.
- [44.] Lighthall, G. K. (2007). The Use of Clinical Simulation Systems to Train Critical Care Physicians. *Journal of Intensive Care Medicine*, 22, str. 257-269.
- [45.] Li, Z., Chui, C. K., Anderson, J. H., Chen, X., Ma, X., Hua, W., ...& Nowinski, W. L. (2001). Computer environment for interventional neuroradiology procedures. *Simulation & Gaming*, 32(3), str. 404-419.
- [46.] Li, S., Guo, J., Wang, Q., Meng, Q., Chui, Y. P., Qin, J., & Heng, P. A. (2012). A Catheterization-Training Simulator Based on a Fast Multigrid Solver. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 32(6), str. 56-70.
- [47.] Liu, A., Tendick, F., Cleary, K. & Kaufmann, C. (2003). A Survey of surgical simulation: applications technology, and education. *Presence*, 12, str. 559-613.
- [48.] Martin, J. T., Reda, H., Dority, J. S., Zwischenberger, J. B. & Hassan, Z. U. (2011). Surgical resident training using real-time simulation of cardiopulmonary bypass physiology with echocardiography. *Journal of surgical education*, 68, str. 542-546.
- [49.] McBride, M. E., Waldrop, W. B., Fehr, J. J., Boulet, J. R., & Murray, D. J. (2011). Simulation in pediatrics: the reliability and validity of a multiscenario assessment. *Pediatrics*, 128(2), str. 335-343.
- [50.] Miertová, M. & Lepiešová, M. (2013). Innovative teaching methods in the professional training of nurses – simulation education. *Mefanet Journal* 1(2), str. 55–60.
- [51.] Morgan, P.J. & Cleave-Hogg, D. (2002). A worldwide survey of the use of simulation in anesthesia. *Canadian Journal of Anesthesia*, 49, str. 659-662.

- [52.] Narang, A. T., Oldeg, P. F., Medzon, R., Mahmood, A. R., Spector, J. A. & Robinett, D. A. (2009). Comparison of intubation success of video laryngoscopy versus direct laryngoscopy in the difficult airway using high-fidelity simulation. *Simulation in Healthcare*, 4, str. 160-165.
- [53.] Nishisaki, A., Donoghue, A. J., Colborn, S., Watson, C., Meyer, A., Brown, C. A., Helfaer, M. A., Walls, R. M. & Nadkarni, V. M. (2010). Effect of Just-in-time Simulation Training on Tracheal Intubation Procedure Safety in the Pediatric Intensive Care Unit. *Anesthesiology*, 113, str. 214-223.
- [54.] Norman, G., Dore, K. & Grierson, L. (2012). The minimal relationship between simulation fidelity and transfer of learning. *Medical Education*, 46, str. 636–647.
- [55.] QxMD Medical Software (2010) ECG Guide for iPad. iTunes, <https://itunes.apple.com/us/app/ecg-guide-for-ipad/id387638351?mt=8>
- [56.] Parker, B. C. & Myrick, F. (2009). A critical examination of high-fidelity human patient simulation within the context of nursing pedagogy. *Nurse education today*, 29, str. 322-329.
- [57.] Platts, D. G., Humphries, J., Burstow, D. J., Anderson, B., Forshaw, T., Scalia, G. M. (2012). The use of computerised simulators for training of transthoracic and transoesophageal echocardiography. The future of echocardiographic training? *Heart, Lung and Circulation*, 21, 267-273.
- [58.] Satava, R. M. (2008). Historical review of surgical simulation— a personal perspective. *World Journal of Surgery*, 32, str. 141-148.
- [59.] Rosen, K. R. (2008). The history of medical simulation. *Journal of Critical Care*, 23, str. 157-166.
- [60.] Sahu S. & Lata I. (2010). Simulation in resuscitation teaching and training, an evidence based practice review. *J. Emerg. Trauma Shock*, 3, str. 378-84.
- [61.] Sawyer, T., Hara, K., Thompson, M. W., Chan, D. S., & Berg, B. (2009). Modification of the Laerdal SimBaby to Include an Integrated Umbilical Cannulation Task Trainer. *Simulation in Healthcare*, 4, str. 174-178.
- [62.] Seixas-Mikelus, S.A., Stegemann, A.P., Kesavadas, T., Srimathveeravalli, G., Sathyaseelan, G., Chandrasekhar, R., Wilding, G.E., Peabody, J.O. & Guru, K.A. (2011). Content validation of a novel robotic surgical simulator. *BJU international*, 107, str. 1130-1135.
- [63.] Seropian, M. A., Brown, K., Gavalanes, J. S., & Driggers, B. (2004). Simulation: Not just a manikin. *The Journal of nursing education*, 43(4), str. 164-169.
- [64.] Sethi, A. S., Peine, W. J., Mohammadi, Y., & Sundaram, C. P. (2009). Validation of a Novel Virtual Reality Robotic Simulator. *Journal of Endourology*, 23, str. 503-508.
- [65.] Seymour, N.E. (2012). Debriefing After Simulation. In: *The SAGES Manual of Quality*, (Tichansky, D. S., Morton, J., Jones, D. B., Eds.), Springer US, 2012, ISBN 978-1-4419-7901-8, str. 501-506.
- [66.] Schwid, H. A., Rooke, G. A., Michalowski, P. & Ross, B. K. (2001). Screen-based anesthesia simulation with debriefing improves performance in a mannequin-based anesthesia simulator. *Teaching and learning in medicine*, 13, str. 92-96.
- [67.] Schulz, C.M., Mayer, V., Kreuzer, M., Kochs, E.F. & Schneider, G. (2011). A tool for immediate and automated assessment of resuscitation skills for a full-scale simulator. *BMC Research Notes*, 4, str. 1-7, open access: <http://www.biomedcentral.com/1756-0500/4/55>.
- [68.] Štourač, P., Harazim, H., Schwarz, D., Křikava, I., Komenda, M., Štoudek, R., ... & Gál, R.

- (2013). AKUTNE. CZ algorithms and SEPSIS-Q scenarios as interactive tools for problem based learning sessions in medical education. *Mefanet Journal*. 1(2), str. 61-73.
- [69.] Thomas, F., Carpenter, J., Rhoades, C. & Holleran, R. (2010). The Usefulness of Design of Experimentation in Defining the Effect Difficult Airway Factors and Training Have on Simulator Oral--Tracheal Intubation Success Rates in Novice Intubators. *Academic Emergency Medicine*, 17, str. 460-463.
- [70.] Toro-Troconis, M., & Boulos, M. N. (2009). Musings in the state of ,3D virtual worlds for health and healthcare in August 2009. *Journal of Virtual Worlds Research* , 2, str. <https://journals.tdl.org/jvwr/article/view/629/496>, 1-15.
- [71.] Toro-Troconis, M., Partridge, M., & Barret, M. (2008). Game-based learning for the delivery of virtual patients in Second Life. *Issues and News on Learning and Teaching in Medicine, Dentistry and Veterinary Medicine* , 1, str. 3-5.
- [72.] van Heukelom, J. N., Begaz, T. & Treat, R. (2010). Comparison of postsimulation debriefing versus in-simulation debriefing in medical simulation. *Simulation in Healthcare*, 5, str. 91-97.
- [73.] van Meurs, W. (2011): *Modeling and Simulation in Biomedical Engineering: Applications in Cardiorespiratory Physiology*. Ed. 1. New York: McGraw Hill, 2011. 193 stran. ISBN 978-0-07-17-1445-7.
- [74.] Wayne, D., Didwania, A., Feniglass, J., Fudala, M. J., Barsuk, J. H., & McGaghie, W. C. (2008). Simulation-based education improves quality of care during cardiac arrest team responses at an academic teaching hospital. *Chest*, 133, str. 56–61.
- [75.] Wang, Y., Chui, C., Lim, H., Cai, Y., Mak, K. (1998). Real-time interactive simulator for percutaneous coronary revascularization procedures, *Computer Aided Surgery*, 3, str. 211-227.
- [76.] Welke, T. M., LeBlanc, V. R., Savoldelli, G. L., Joo, H. S., Chandra, D. B., Crabtree, N. A., Naik, V. N. (2009). Personalized oral debriefing versus standardized multimedia instruction after patient crisis simulation. *Anesthesia & Analgesia*, 109, stránky 183-189.
- [77.] WMS (2014). ECG Books Pro – Abnormal ECG Cases, <https://itunes.apple.com/au/artist/wms/id471623357>

## Poděkování

Práce na vývoji lékařských simulátorů je podporována projektem MP FR-TI3/869, centralizovanýmrozvojovým projektem VŠ MŠMT „Virtuální pacient - modely a simulátory pro výuku medicíny a biomedicínského inženýrství“ a společností Creative Connections s.r.o.



**Kontakt:**

Doc. MUDr. Jiří Kofránek, CSc.  
Oddělení biokybernetiky  
a počítačové podpory výuky  
ÚPF 1. LF UK Praha  
U nemocnice 5  
128 53 Praha 2  
tel: 777686868  
e-mail: [kofranek@gmail.com](mailto:kofranek@gmail.com)