

Řízení a monitorace hemodynamických parametrů modelů kardiovaskulárního systému

Naděje HAVLÍČKOVÁ¹, Jan HAVLÍK¹

¹ České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra teorie obvodů

havlinad@fel.cvut.cz

Abstrakt: Tento článek se zabývá problematikou modelování kardiovaskulárního systému, zejména pak řízením a monitorací hemodynamických parametrů modelů kardiovaskulárního systému. V článku je popsán vytvořený systém pro monitoraci a analýzu hemodynamických parametrů prototypu mechanického modelu kardiovaskulárního systému a pro jeho komplexní řízení. Systém mimo jiné umožňuje přenos vitálních parametrů z reálného kardiovaskulárního systému na mechanický model, který tak adaptivně mění své chování na základě analýzy vitálních funkcí monitorované osoby. Vývojem celého systému se zvýšila užitnost mechanického modelu sloužícího k výzkumným a edukativním účelům. Článek popisuje též vyvinutý matematický model kardiovaskulárního systému sloužící k porovnání různých modelovacích metod vč. porovnání způsobu jejich řízení a monitorace.

1. Úvod

Kardiovaskulární systém je životně důležitou orgánovou soustavou zajišťující perfuzi (průtok krve) jednotlivých tkání a orgánů, do kterých dodává kyslík a živiny a odvádí z nich zplodiny metabolismu. Kardiovaskulární systém lze z anatomického a mechanického hlediska rozdělit na dvě základní části – část pohonnou (srdce) a část rozvodnou (cévní systém). Základními ukazateli stavu kardiovaskulárního systému jsou srdeční frekvence (HR), tepový objem (SV), srdeční výdej (CO), krevní tlak (BP), cévní rezistence (odpor, R), compliance (poddajnost, C) a inertance (L) související se setrvačností proudící kapaliny. [1] [2]

K pochopení vztahů mezi jednotlivými hemodynamickými parametry, jejich vzájemného ovlivňování a k simulaci různých patologií kardiovaskulárního systému napomáhají modely kardiovaskulárního systému. Provádění experimentů na biologických systémech je složitou etickou otázkou, nese svá rizika a omezení. Modelování v této oblasti, ať pro výzkumné nebo edukativní účely, má proto svoji opodstatněnou úlohu. Zejména k edukativním účelům slouží mechanický model kardiovaskulárního systému využívaný k výuce magisterských studentů Biomedicínského inženýrství na FEL ČVUT. Vývoj dosud chybějící centrální jednotky umožňující řízení a monitoraci vybraných hemodynamických parametrů tohoto mechanického modelu byl hlavním cílem této práce. K porovnání různých modelovacích metod vč. porovnání obtížnosti řízení a monitorace jejich hemodynamických parametrů byl v rámci práce vytvořen též matematický model kardiovaskulárního systému inspirovaný mechanickým prototypem.

Metodám modelování kardiovaskulárního systému, popisu dostupného mechanického a vyvinutého matematického modelu kardiovaskulárního systému se věnuje kapitola 2, problematice řízení a monitorace hemodynamických parametrů těchto modelů kapitola 3.

2. Modelování kardiovaskulárního systému

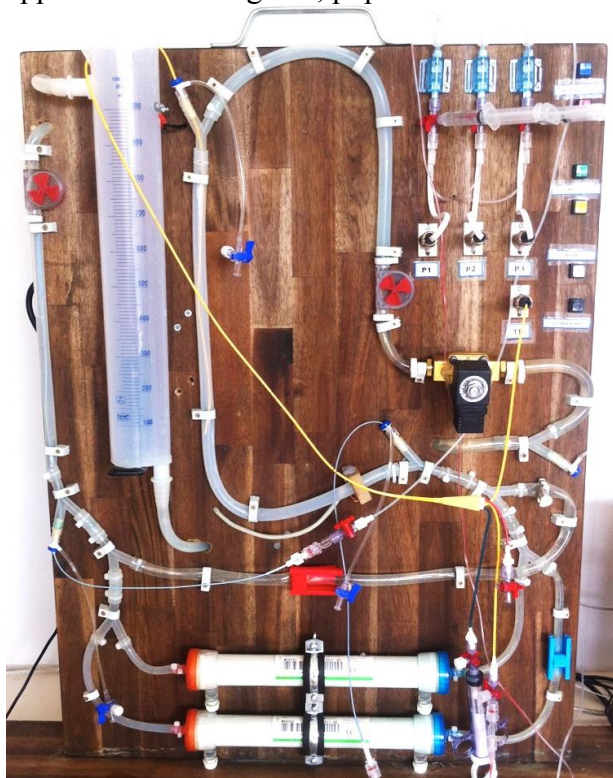
Kardiovaskulární systém může být charakterizován mnoha způsoby. Existují fyzické, matematické, konceptuální, statistické, logické, grafické a další modely kardiovaskulárního systému. [3] Dvěma základním a zcela odlišným přístupům modelování kardiovaskulárního systému – mechanickému (fyzickému) a matematickému (počítačovému) jsou věnovány následující oddíly kapitoly 2.

2.1. Mechanické modelování kardiovaskulárního systému

Mechanický způsob modelování kardiovaskulárního systému má své výhody i nevýhody. Výhodou je například demonstrativnost (názornost) těchto modelů a jejich využitelnost pro vývoj a testování biologických implantátů. Mezi nevýhody mechanického modelování patří materiálová náročnost a obtížnější modifikovatelnost v porovnání s matematickými modely. Mechanické modely si zpravidla zachovávají větší míru stochastičnosti (náhodnosti) oproti základním matematickým modelům.

2.1.1. Mechanický model kardiovaskulárního systému

Dostupný mechanický model kardiovaskulárního systému je znázorněn na obr. 1. Model se skládá ze soustavy hadic (s definovanými parametry rezistence (R), compliance (C) a inertance (L)) tvořících arteriální a venózní řečiště, hemodialyzačních filtrů reprezentujících kapilární část řečiště, membránového čerpadla zastávajícího funkci srdce, elektromagnetických ventilů jakožto chlopní a dalších hydraulických prvků. Kapalným médiem kolujícím soustavou je čistá voda ohřívaná na teplotu lidského těla. Model simuluje proudění kapaliny jednotlivými částmi velkého krevního oběhu tak, aby bylo obdobné proudění krve ve fyziologickém krevním oběhu. Na modelu lze měřit „krevní“ tlaky (BP) klinicky používanými katétry pro invazivní měření krevního tlaku. Dále model umožňuje měření průtoku, resp. minutového („srdečního“) výdeje (CO), různými klinicky používanými metodami (termodilucí, Dopplerovskou echografií, popř. barvivovou dilucí). [4] [5]



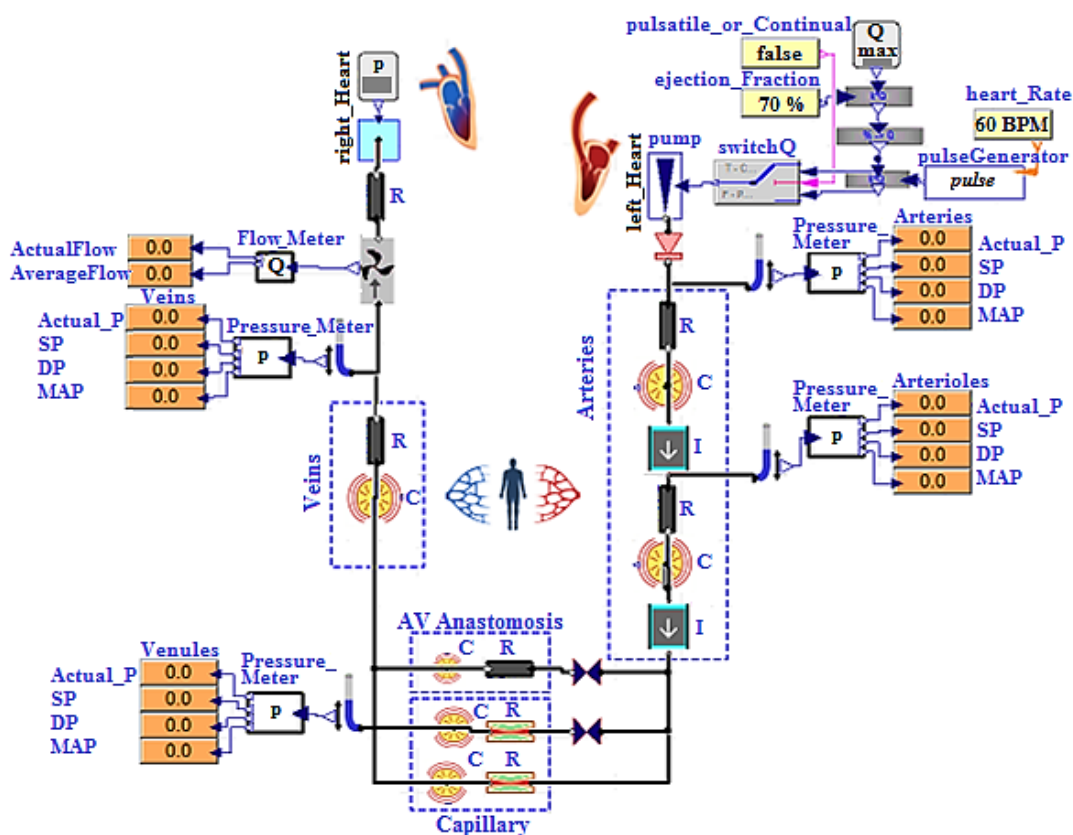
Obr. 1: Mechanický model kardiovaskulárního systému

2.2. Matematické modelování kardiovaskulárního systému

Velmi rozšířené matematické modelování je založeno na popisu vlastností systému a vztahů mezi nimi matematickými rovnicemi. Matematický popis je vždy pouze aproximací fyzikální reality. Matematické modely se dělí na dvě hlavní kategorie, modely s koncentrovanými (soustředěnými) a distribuovanými (rozloženými) parametry. [3] [6]

2.2.1. Matematický model kardiovaskulárního systému

Vyvinutý matematický model kardiovaskulárního systému (viz obr. 2), implementovaný v modelovacím jazyku Modelica, je modelem s koncentrovanými parametry (0D). Model se opírá o analogie mezi hydrodynamickou a elektrickou doménou. Jednotlivé části řečiště jsou reprezentovány sériovou kombinací prvků rezistence, compliance a inertance (v elektrické doméně odporu, kapacity a indukčnosti). Pulsatilní tok obdobný fyziologické pulsni vlně je realizován pomocí skládání harmonických vlnění.



Obr. 2: Matematický model kardiovaskulárního systému

3. Řízení a monitorace hemodynamických parametrů modelů kardiovaskulárního systému

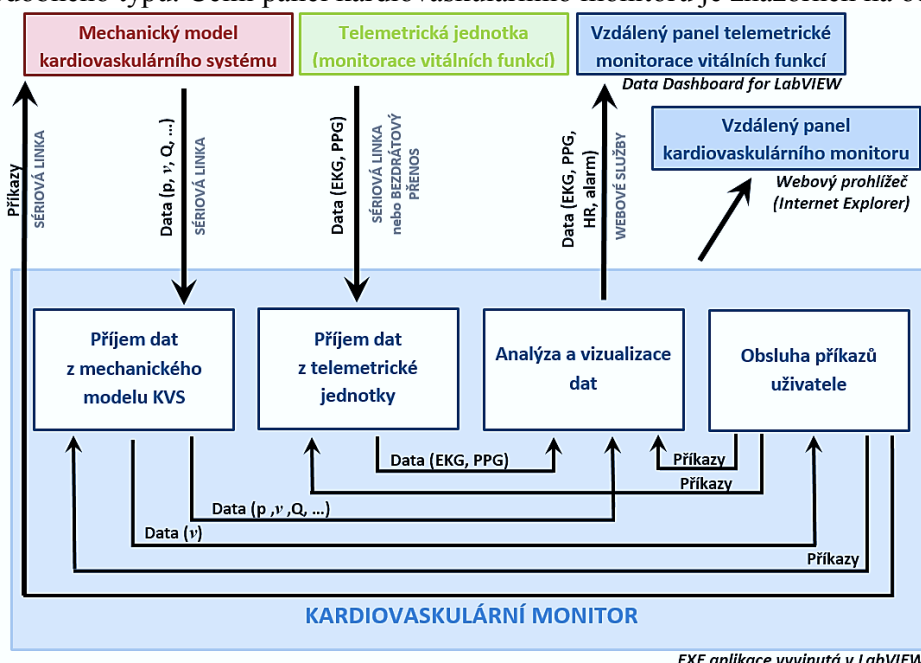
Řízení a monitorace parametrů modelů je zcela klíčovou částí modelování. Možnost modifikace parametrů modelů, možnost sledování s tím navozených změn a schopnost zpětné interpretace výsledků simulací je podmínkou užitnosti modelů. Různé metody modelování často vyžadují odlišný přístup k problematice řízení a monitorace. Řešení této problematiky pro výše pospaný mechanický a matematický model kardiovaskulárního systému je popsáno v následujících oddílech této kapitoly.

3.1. Řízení a monitorace hemodynamických parametrů mechanického modelu kardiovaskulárního systému

Řízení a monitorace hemodynamických parametrů výše popsaného mechanického modelu kardiovaskulárního systému jsou řešeny na více úrovních. Rezistence (R), compliance (C) a inertance (L) jednotlivých částí řečiště je definována samotnými konstrukčními prvky systému (parametry použitých hadic), lze je tedy ovlivňovat mechanickým zásahem do komponent modelu. Řízení ostatních hemodynamických parametrů a jejich monitoraci zprostředkovává vyvinutý kardiovaskulární monitor (viz pododдіl 3.1.1). Kardiovaskulární monitor komunikuje s řídicí elektronikou mechanického modelu kardiovaskulárního systému.

3.1.1. Kardiovaskulární monitor

Kardiovaskulární monitor (dále jen monitor) je virtuálním přístrojem vyvinutým v grafickém programovacím prostředí LabVIEW spuštěným na běžném osobním počítači. Monitor slouží jako hlavní řídicí a monitorovací jednotka mechanického modelu kardiovaskulárního systému (dále jen modelu) a také jako monitorovací jednotka zařízení pro telemetrické sledování vitálních funkcí monitorované osoby. Model může být řízen manuálně nebo automaticky (na základě analyzovaných vitálních signálů sledované osoby). Kardiovaskulární monitor umožňuje v reálném čase sledovat, zobrazovat a analyzovat vybrané hemodynamické parametry, např. provádět analýzu srdeční frekvence (HR) z elektrokardiogramu, analýzu systolických, diastolických a středních arteriálních tlaků (SP , DP a MAP) v různých místech krevního řečiště, analyzovat srdeční výdej (CO) a tepový objem (SV). Dále poskytuje funkci automatizovaného měření srdečního výdeje (CO) klinicky používanou termodiluční metodou. Monitor disponuje vzdálenými panely pro řízení a monitoraci z přenosných zařízení typu tablet či chytrý telefon. Pro účely řízení, monitorace a synchronizace více zařízení (zde modelu a telemetrické jednotky) v reálném čase byla vyvinuta programová struktura umožňující efektivní časovou synchronizaci různě rychlých a výpočetně náročných dějů s různými prioritami. Struktura je založena na distribuci jednotlivých úloh do paralelních asynchronně vykonávaných vláken (viz obr. 3) komunikujících pomocí nástrojů pro synchronizaci procesů. Tyto a další použité programovací techniky podporují modulárnost, flexibilitu a adaptibilitu celého systému tak, aby se mohl stát prototypem pro další aplikace podobného typu. Čelní panel kardiovaskulárního monitoru je znázorněn na obr. 4.



Obr. 3: Blokové schéma kardiovaskulárního monitoru

EXE aplikace vyvinutá v LabVIEW



Obr. 4: Čelní panel kardiiovaskulárního monitoru

3.2. Řízení a monitorace hemodynamických parametrů matematického modelu kardiiovaskulárního systému

Řízení a monitorace hemodynamických parametrů výše popsaného matematického modelu kardiiovaskulárního systému se odehrává výhradně na matematické úrovni prostřednictvím matematických rovnic (změnou jejich parametrů a matematickou analýzou signálů) bez nutnosti použití fyzických senzorů, analogově-digitálních převodníků, řídicí elektroniky apod. U vyvinutého matematického modelu lze tímto způsobem řídit srdeční frekvenci (HR), ejekční frakci srdce (EF) a parametry jednotlivých částí řečiště, jako jsou cévní rezistence (R), compliance (C) a inertance (L). V modelu jsou počítány okamžité hodnoty tlaků a systolické, diastolické a střední arteriální tlaky (SP , DP a MAP), okamžité hodnoty průtoku a střední hodnoty průtoku (odpovídající srdečnímu výdeji (CO)) v různých částech řečiště.

4. Závěr

Modelování kardiiovaskulárního systému hraje důležitou roli jak v klinickém výzkumu, tak v edukaci odborníků a studentů. Byla diskutována a řešena problematika řízení a monitorace hemodynamických parametrů modelů kardiiovaskulárních systémů. Pro dostupný mechanický model kardiiovaskulárního systému byl vyvinut dosud chybějící systém pro monitoraci a analýzu hemodynamických parametrů a pro komplexní řízení tohoto mechanického modelu. Systém mimo jiné umožňuje přenos vitálních parametrů z reálného kardiiovaskulárního systému na mechanický model, který tak adaptivně mění své chování na základě analýzy vitálních funkcí telemetricky monitorované osoby. Pro porovnání různých modelovacích metod vč. demonstrace snazší monitorace a řízení hemodynamických parametrů matematických modelů byl vyvinut matematický model kardiiovaskulárního systému založený na analogiích mezi hydrodynamickou a elektrickou doménou.

Reference

- [1] **SILBERNAGL, S. - DESPOPOULOS, A.** *Atlas fyziologie člověka*. 6. vyd. Praha : Grada, 2004. 448 s. ISBN: 80-247-0630-x.
- [2] **WESTERHOF, N. - STERGIOPULOS, N. - NOBLE, M.** *Snapshots of Hemodynamics*. 2. vyd. New York : Springer Science + Business Media, 2010. 200 s. ISBN 978-1-4419-6362-8.
- [3] **COBELLI, C. - CARSON, E.** *Introduction to modeling in physiology and medicine*. Academic Press series in biomedical engineering. Boston : Academic Press, 2008. 324 s. ISBN 9780121602406.
- [4] **LOŽEK, M. – HAVLÍČKOVÁ, N. – HAVLÍK, J.** *Adaptive Mechanical Model of Cardiovascular System* In: 19th International Conference on Applied Electronics 2014. Pilsen: University of West Bohemia, 2014, . ISSN 1803-7232. ISBN 978-80-261-0276-2.
- [5] **LOŽEK, M. - HAVLÍK, J.** Mechanický model kardiovaskulárního systému. *Zborník konferencie Trendy v biomedicínskom inžinierstve 2013*. Košice : Technical University of Kosice, 2013. ISBN 978-80-8086-208-4.
- [6] **SHI, Y. – LAWFOR, P. – HOSE, R.** Review of Zero-D and 1-D Models of Blood Flow in the Cardiovascular System. *BioMedical Engineering OnLine*. [Online] 2011. [Citace: 01. 03. 2014.] Dostupné z: <<http://www.biomedical-engineering-online.com/content/10/1/33>>. DOI: 10.1186/1475-925X-10-33.