

ARTERIAL WALL NONLINEAR FEATURES IDENTIFICATION BY VIBRATIONAL PHOTOPLETHYSMOGRAPHY TECHNIQUE

Petr Nejedlý

Bachelor Degree Programme (3), FEEC BUT

E-mail: xnejed07@stud.feec.vutbr.cz

Supervised by: Jana Svačinová, Jiří Moudr

E-mail: svacinova@med.muni.cz, jmoudr@med.muni.cz

Abstract: The presented paper describes a mathematical model for estimation of an arterial compliance by vibrational photoplethysmography technique. The first section of the article describes non-linear viscoelastic properties of the arterial wall. Furthermore, the second part of the paper specifies interactions between the arterial segment and measuring cuff. The viscoelastic model was created for the purpose of arterial compliance experimental research and computer simulations of parasitic effects that might occur during measurement.

Keywords: Arterial compliance, Vibrational photoplethysmography, Visco-elastic arterial model

1 ÚVOD

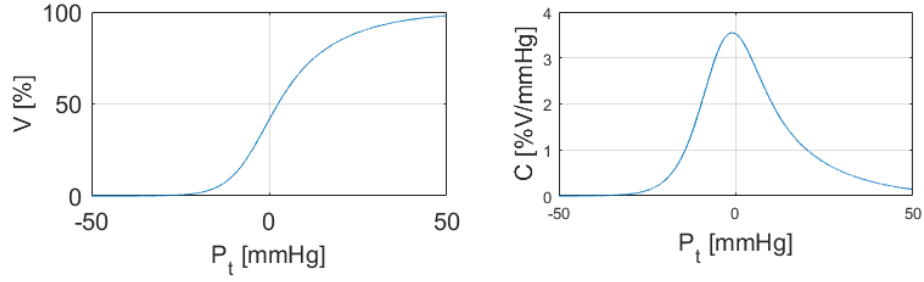
Tato práce se zabývá tvorbou matematického modelu vibrační fotopletysmografie, která se používá na měření compliance arterií malého průřezu. Vliv arteriální compliance je z fyziologického hlediska důležitý pro udržení kontinuálního krevního toku v diastolické části srdečního cyklu a snížení mechanického namáhání arteriální stěny v systole. Patofyziologické změny arteriální compliance mohou způsobovat endoteliální dysfunkci, hypertenzi, atherogenezi a větší srdeční zátěž. Ačkoliv výzkumy dokazují, že snížení compliance malých arterií je nezávislý a signifikantní faktor přispívající k hodnotě kardiovaskulárního rizika, je compliance malých arterií v klinické praxi opomíjeným parametrem [1]. Výsledný matematický model může simulovat parazitní vlivy vznikající při měření a pomoci k lepší interpretaci dat měřených metodou vibrační fotopletysmografie.

2 NELINEÁRNÍ VISKOELASTICKÝ MODEL ARTERIÁLNÍHO SEGMENTU

Z fyziologického hlediska průchodem ejekčního objemu krve artérie zvětšuje svůj průřez a transformuje část kinetické energie toku krve na potenciální energii arteriální stěny. Následně v diastole je tato potenciální energie přeměněna zpět na kinetickou energii krevního toku. Schopnost arterií zvětšit svůj průřez při změně tlaku se nazývá compliance a je definována jako podíl změny obsaženého objemu v artérii a změny transmurního tlaku. Z mnoha pozorování je známo, že objem krve pod stěnou cévy vykazuje nelineární závislost (Obrázek 1) na transmurním tlaku [2]. Tato nelineární závislost je důsledkem nehomogenního histologického složení cévní stěny, kde se zejména uplatňuje elastin, kolagen a hladká svalovina.

Viskoelastický arteriální segment válcového tvaru a jednotkové délky, za předpokladu laminárního toku krve ve smyslu newtonovské kapaliny, lze popsat pomocí disipačního parametru (ztráty vzniké prouděním krve) R , setrvačného parametru (setrvačnost krve a arteriální stěny) L a transmurního tlaku $P_t(V)$, který vyjadřuje tlak od elastické složky cévy, závislý na obsaženém objemu krve V v segmentu cévy. Rovnice popisující toto chování může být zapsána ve tvaru (1).

$$L \frac{d^2 V(t)}{dt^2} + R \frac{dV(t)}{dt} + P_t(V(t)) = P_{blood}(t) \quad (1)$$

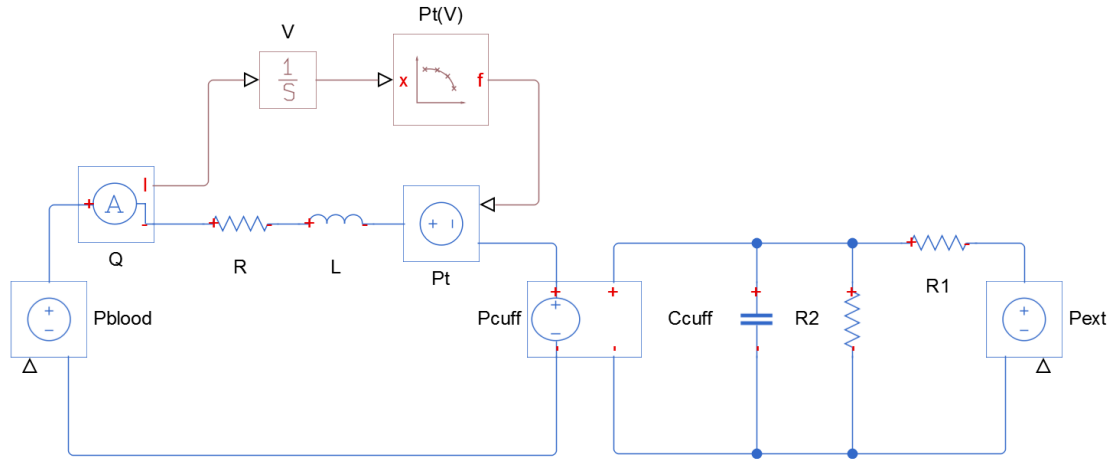


Obrázek 1: (a) Nelineární závislost objemu krve v arterii na transmurálním tlaku. (b) Závislost arteriální compliance na transmurálním tlaku.

3 MODEL DYNAMICKÉ FOTOPLETYSMOGRAFIE

Dynamická fotoletysmografie je neinvazivní metoda, umožňující hodnotit vlastnosti arteriální stěny [2]. Základem metody je měření kontinuálního krevního tlaku a objemu krve v prstových artériích. Na měřeném prstu je nasazena testovací manžeta, která je udržována pod časově variabilním tlakem $P_{ext}(t)$. Systém (Obrázek 2) zahrnující interakce arteriálního segmentu a měřicí manžety můžeme popsat soustavou nelineárních diferenciálních rovnic (2), přičemž první rovnice popisuje chování arteriálního segmentu a druhá rovnice popisuje disipační a elastické vlastnosti měřicí manžety. Disipační parametry (R_1 , R_2) vyjadřují tlakové ztráty na přívodní hadičce k měřicí manžetě. Elastické vlastnosti měřicí manžety jsou popsány pomocí parametru C_{cuff} . Vazba mezi měřicí manžetou a arteriálním systémem je zprostředkována pomocí ideálního tlakově řízeného zdroje tlaku P_{cuff} .

$$\begin{aligned} \frac{d^2V(t)}{dt^2} &= \frac{1}{L} \left[P_{blood}(t) - P_{cuff}(t) - R \frac{dV(t)}{dt} - P_t(V(t)) \right] \\ \frac{dP_{cuff}(t)}{dt} &= \frac{1}{C_{cuff}} \left[\frac{P_{ext}(t) - P_{cuff}(t)}{R_1} - \frac{P_{cuff}(t)}{R_2} \right] \end{aligned} \quad (2)$$



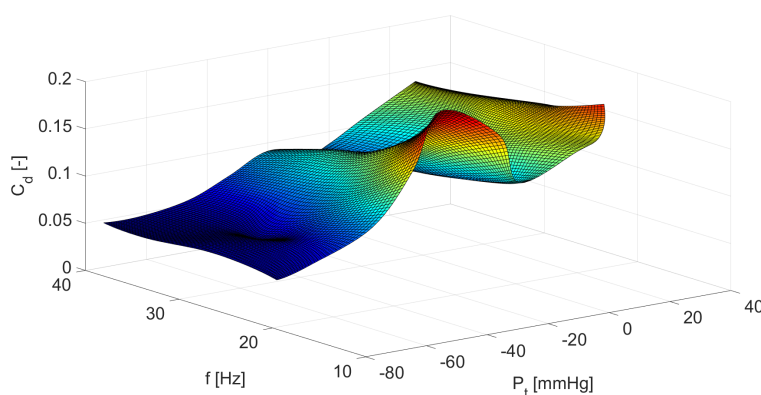
Obrázek 2: Navržený model popisující interakci nelineárního arteriálního segmentu s manžetou dynamického fotopletysmografu. Navrženo v Simulink-Simscape.

4 IDENTIFIKACE VISKOELASTICKÝCH PARAMETRŮ

Díky nelineárním vlastnostem arteriální stěny není možné compliance určit pasivním měřením, kdy je zdrojem velkých tlakových pulzů srdeční činnost, protože dochází k nelineárnímu zkreslení. Tento problém je řešen měřením pouze v diastolické části srdečního cyklu, přičemž je krevní tlak přibližně konstantní a zároveň je testovací manžeta buzena harmonickým signálem o malé amplitudě a konstantním přítlaku $P_{ext}(t) = P_{ext} + \Delta P_{ext}(t)$. Za uvažovaných podmínek měření v diastolické části srdečního cyklu, kdy se objem krve v důsledku vibrací měřicí manžety změní o hodnotu ΔV , můžeme nelineární závislost $P_t(V)$ linearizovat pomocí Taylorova rozvoje (3), kde parametrem C je označena arteriální compliance (schopnost arterií zvětšit svůj průsvit při změně transmurního tlaku).

$$P_t(V_0 + \Delta V) = P_t(V_0) + \frac{\partial P_t(V_0)}{\partial V} \Delta V = P_t(V_0) + \frac{1}{C(V_0)} \Delta V \quad (3)$$

Následně je možné použít metody regresní analýzy pro identifikaci viskoelastických (L , C) a disipačních (R) parametrů, které popisují arteriální segment.



Obrázek 3: Identifikovaný průběh dynamické arteriální compliance z reálného měření $C_d[-]$ vyjádřený v relativních jednotkách. C_d je funkcí transmurního tlaku $P_t[mmHg]$ a frekvence přiložených kmitů $f[Hz]$ vibračního fotopletysmografu.

5 ZÁVĚR

V současné době je compliance artérií malého průřezu odhadována za předpokladu zanedbání elastických a disipačních vlastností měřicí manžety. Cílem této práce bylo navrhnout matematický model popisující chování nelineárního viskoelastického segmentu artérie, který zahrnuje parazitní vlivy vznikající při měření. Z obrázku 3 je patrné, že identifikované závislosti arteriální compliance z reálných dat odpovídají teoretickému průběhu z obrázku 1. Současně navrhnutý matematický model umožňuje provádět simulace parazitních jevů, které vznikají při měření, a jejich případnou korekci. Práce byla podpořena grantem MUNI/A/1355/2016.

REFERENCE

- [1] GREY, E. Reduced small artery but not large artery elasticity is an independent risk marker for cardiovascular events. American Journal of Hypertension. 2003. DOI: 10.1016/S0895-7061(02)03271-5. ISSN 08957061.
- [2] SVAČINOVÁ, Jana, Jiří MOUDR a Nataša HONZÍKOVÁ. The vibration plethysmographic method of arterial compliance analysis in dependence on transmural pressure. In 11th International medical postgraduate conference. 2014. ISBN 978-80-260-7244-7.