

Disertační práce

Návrh algoritmu řízení námoku surových kůží

Ing. Petr Doležel

Školitel: prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Zlín, 2011

Poděkování:

Děkuji svému školiteli prof. Ing. Vladimíru Vaškovi, CSc. za cenné rady a vedení. Dále děkuji prof. Ing. Karlu Kolomazníkovi, DrSc. za odborné konzultace v teoretické části. Také děkuji své rodině a hlavně své ženě za trpělivost a podporu.

RESUMÉ

Disertační práce se zabývá řízením procesu odsolování surových kůží. Vzhledem k tomu, že stažená kůže nemůže být ihned použita pro zpracování v koželužnách, je nezbytné tuto surovinu na nutnou dobu konzervovat. Pokud ke konzervaci kůže nedojde, enzymatický systém kožních kapalin a mikrobiální činnost výrazně zhorší kvalitu a vlastnosti kůže. Konzervování se provádí několika způsoby a jedním z nich je i konzervace krystalickou solí.

Takto konzervované kůže však nejsou vhodné pro přímé zpracování a těsně před jejich použitím je nutné je zbavit soli. V současné době se při odsolování čerpá spíše ze zkušeností. Cílem disertační práce je navržení a ověření algoritmu pro řízení procesu odsolování surových kůží v závislosti na kvantitativním popisu systému. Algoritmus a přístup popsany v této práci je založen právě na dějích, které probíhají uvnitř kůže. V disertační práci je popsán proces odsolování průtokem čisté vody poté, co je kůže ponořena do slané roztoku. Vhodně zvoleným průtokem čisté vody je docíleno pozvolného klesání koncentrace soli na povrchu i v hloubce kůže.

Funkčnost navrženého algoritmu byla ověřena na experimentálním zařízení, které bylo pro tento účel vytvořeno. Řídicí jednotka modelu založená na šestnáctibitovém mikropočítači MC9S12NE64 shromažďuje potřebné údaje o pracovním procesu a řídí průtok čisté vody systémem. Řídicí jednotka připojená k počítači přes ethernetové rozhraní pak usnadňuje obsluhu a celý proces vizualizuje v grafické podobě pomocí obslužné Flash aplikace.

Tento způsob řízení přináší nový přístup k procesu odsolování kůží, který umožňuje optimalizovat nárok a odsolování kůží na základě kvantitativního popisu.

SUMMARY

The goal of this doctoral thesis is to find a new approach to the raw hide soaking and desalting process. Raw hides and skins have to be conserved before their usage in tannery industry. Without conservation the enzymatic system degrades hides, so that the hide loses the quality. The common way of the conservation is the conservation with salt.

Conserved hides are not usable for direct processing. By soaking and desalting the salt is removed and hides are prepared for tanning industry. The soaking process is controlled usually by experience. The aim of this work is to develop new approach based on the quantitative description and processes which take place directly inside the hide. The algorithm designed in this work is based directly on this approach. The process of desalting by flow of the clean water while the hides are sinked in the salt water is described in this work. The algorithm controls the flow of the water according the required process behavior.

The functionality of this algorithm is verified on the experimental device that simulates the desalting process. It is controlled by the control unit based on 16bit microcontroller MC9S12NE64. This unit collects measured data from conductivity sensor, flow meters etc. The control unit might be connected to the superior system that is usually, but not exclusively, represented by computer. The connection is provided by the ethernet interface. User interface is based on flash application saved directly on web server of the microcontroller.

This type of control brings new approach to the desalting of hides described in this work. It allows the optimization of the soaking and desalting process according to quality of soaked hides.

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	11
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	12
1 ÚVOD.....	15
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	17
2.1 KONZERVACE PEVNOU SOLÍ.....	18
2.2 KONZERVACE SOLNÝM ROZTOKEM.....	18
2.3 KONZERVACE PIKLOVÁNÍM	18
2.4 NÁMOK A ODSOLOVÁNÍ KŮŽÍ.....	19
3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	21
4 TEORETICKÝ RÁMEC.....	22
4.1 ŘÍZENÍ PROCESU ODSOLOVÁNÍ.....	22
4.2 CÍLOVÁ FUNKCE	22
4.3 MODEL NÁMOKU ČISTOU VODOU.....	23
4.3.1 Průtočný systém	26
4.3.2 Stupeň pracího procesu	31
4.4 ŘÍZENÍ TECHNOLOGICKÝCH PROCESŮ EMBEDDED SYSTÉMY	32
4.5 MIKROPOČÍTAČE	33
4.5.1 Programování mikropočítačů	34
4.5.2 Komunikační rozhraní	36
4.6 MĚŘENÍ SLOŽENÍ KAPALIN.....	38
4.7 MĚŘENÍ PRŮTOKU.....	40
4.8 URČOVÁNÍ GRADIENTU VODIVOSTI.....	42
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	44
5.1 EXPERIMENTÁLNÍ MODEL	44
5.1.1 Popis modelu	44
5.1.2 Řízení modelu.....	44
5.1.3 Snímač vodivosti Aseko WT Cnd.....	45
5.1.4 Průtokoměry FTB 4605	46
5.1.5 Mikrokontrolér MC9S12NE64.....	48
6 VÝSLEDKY	52
6.1 ŘÍDICÍ JEDNOTKA.....	52
6.1.1 Popis částí řídicí jednotky.....	52

6.1.2	<i>Připojení zařízení</i>	55
6.2	OBSLUŽNÁ APLIKACE	55
6.2.1	<i>Ovládání modelu</i>	56
6.3	VÝSLEDKY SIMULACÍ A MĚŘENÍ	57
6.3.1	<i>Lázněvé praní</i>	57
6.3.2	<i>Průtočné praní</i>	58
6.3.3	<i>Řízení průtoku v průtočném systému</i>	61
6.3.4	<i>Princip algoritmu</i>	61
6.3.5	<i>Simulace</i>	65
6.3.6	<i>Měření</i>	67
7	VYUŽITELNOST VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ	71
8	ZÁVĚR	72
9	PUBLIKAČNÍ AKTIVITY	74
10	LITERATURA	77
	ŽIVOTOPIS	80
	PŘÍLOHY	81

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Model nároku čistou vodou.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 2. Koncentrační pole nároku v čisté vodě.....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3. Model nároku průtočného systému.....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4. Koncentrační pole u průtočného systému: $L=0,5$.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 5. Koncentrační pole u průtočného systému: $L=1$.....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 6. Koncentrační pole u průtočného systému: $L=2$.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 7. Koncentrační pole u průtočného systému: $L=5$.....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 8. Cílová funkce pro různé průtoky L.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 9. Schéma procesu řízení.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 10. Protokoly a služby standardu TCP/IP.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 11. Průtočný snímač vodivosti.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 12. Konduktometrie.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 13. Znázornění přímky s vyznačením úseku a směrnice.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 14. Různé proložení bodů regresní přímkou.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 15. Snímač vodivosti Aseko WT Cnd a průtokoměr FTB 4605.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 16. Ukázka průběhu řízení průtoku na vpusti a výpusti.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 17. Jádrový ethernetový modul s mikropočítačem MC9S12NE64.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 18. Zapojení a využití jednotlivých pinů mikropočítače na patičkách jádrového modulu.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 19. Tištěný spoj základní desky řídicí jednotky a popisem jednotlivých pinů.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 20. Vizualizace pracího procesu v programu Flash.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 21. Koncentrační šok po namočení solí prostoupeného vzorku do čisté vody.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 22 Rychlost odsolení v závislosti na průtoku.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 23. Přehled průběhu vodivosti pro různé průtoky.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 24. Závislost doby potřebné pro odsolení v závislosti na průtoku.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 25 Průběh koncentrace soli v závislosti na čase v celé šířce kůže.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 26. Stanovení směrnice.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 27. Zobrazení gradientů a jejich ustálení ve čtvrtém kroku regulace.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 28 Průběh koncentrace v čase pro $L=4.2$.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 29 Řízení na požadovanou hodnotu $w=-0,2$.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 30. Průběh řízení pro požadovaný gradient $-0,003$.....</i>	<i>68</i>

<i>Obr. 31. Průběh regulace na požadovaný gradient -0,0049</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 32. Regulace na hodnotu gradientu -0,0025</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 33. Řízení námoku pomocí adaptivního regulátoru druhého řádu.....</i>	<i>70</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Účinnost námoku kůží vzhledem k použitému objemu vody.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabulka 2: Výhody a nevýhody jazyka symbolických adres</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 3: Výhody a nevýhody CodeWarrioru</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 4: Parametry sériového rozhraní</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 5: Přehled vrstev standardu OSI.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 6: Parametry snímače vodivosti WT Cnd.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 7: Základní charakteristiky průtokoměrů</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 8: Měření objemu při maximálním průtoku na vstupu i výstupu.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 9: Využití funkcí mikropočítače v řídicí jednotce</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 10: Vstupy a výstupy řídicí jednotky.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 11: Akční prvky a popis jejich funkce.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 12: Rychlost odsolování pro různé průtoky.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 13 Maximální rozdily koncentrace uvnitř a na povrchu kůže v závislosti na průtoku</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 14: Ustálení gradientů po spuštění minimální hodnoty akčního zásahu.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 15 Porovnání průběhu s konstantním průtokem a řízeného průběhu.....</i>	<i>67</i>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>symbol</i>	<i>jednotka</i>	<i>význam</i>
N	Kč	celkové náklady na odsolení
N_1	Kč	náklady na spotřebovanou energii
N_2	Kč	náklady na spotřebu vody
k_E	Kč.kWh^{-1}	cena za kWh energie
k_V	Kč.m^{-3}	cena za práci lázeň
P	W	příkon elektrických spotřebičů
t, τ	hod, s	čas
\dot{V}	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	objemový průtok
b	m	maximální tloušťka kůže
x	m	proměnná tloušťka kůže
S	m^2	povrch
c	kg.m^{-3}	koncentrace
c_p	kg.m^{-3}	počáteční koncentrace
c_0	kg.m^{-3}	koncentrace na povrchu
c_{0p}	kg.m^{-3}	počáteční koncentrace na povrchu
V_0	m^3	objem prací lázně
D	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	difúzní koeficient
ε	1	porozita
C	1	bezrozměrná koncentrace
X	1	bezrozměrná šířka kůže
F_0	1	bezrozměrný čas
C_0	1	bezrozměrná koncentrace na povrchu kůže
N_a	1	bezrozměrné vyjádření objemu prací lázně
L	1	bezrozměrný průtok
y	1	stupeň pracího procesu
F	N	Síla
E	V.m^{-1}	Intenzita elektrického pole
e	C	elementární náboj
z	1	nábojové číslo

η	N.s.m^{-2}	viskozita
r	m	poloměr částice
v	m.s^{-1}	rychlost pohybu iontů
G	S	elektrická vodivost
N_k	1	počet kationtů
N_a	1	počet aniontů
u_k	$\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	pohyblivost kationtu
u_a	$\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	pohyblivost aniontu
A	m^2	plocha elektrody
l	m	vzdálenost mezi elektrodami
\hat{y}_i		hodnota na ose y regresní přímky
x_i		hodnota na ose x regresní přímky
$\hat{\beta}_0$		úsek na regresní přímce
$\hat{\beta}_1$		směrnice regresní přímky
\bar{x}		průměrná hodnota x_i
\bar{y}		průměrná hodnota \hat{y}_i
u		akční veličina
w		žádaná hodnota
y		měřená výstupní veličina

zkratka

význam

BDM	- rozhraní pro programování (Background Debug Mode interface)
EEPROM	- elektronicky mazatelná semipermanentní paměť (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
IEEE	- Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IP	- datový protokol (Internet Protocol)
LCD	- displej z tekutých krystalů (Liquid Crystal Display)
LED	- dioda emitující světlo (Light-Emitting Diode)
LPT	- paralelní port (Line Printer Terminal)
OSI	- propojení otevřených systémů (Open Systems Interconnection)
PC	- osobní počítač (Personal Computer)

PDA	- osobní digitální pomocník (Personal Digital Assistant)
PWM	- pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
RAM	- paměť s přímým přístupem (Random-Access Memory)
TCP	- transportní řídicí protokol (Transmission Control Protocol)
USB	- univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)

1 ÚVOD

Useň je přírodní materiál, který má nenahraditelné vlastnosti. Usně se vyrábějí ze zvířecích kůží složitým procesem, který je náročný nejen na spotřebu energie, ale také na suroviny, které jsou jeho důležitou součástí. Zvyšování cen energií, chemikálií i vody stejně jako vliv produkovaných odpadů na životní prostředí vyžadují racionalizaci a optimalizaci i koželužského průmyslu. Proto je dnes běžnou praxí snažit se každý proces optimalizovat pro zvýšení efektivity a minimalizaci nákladů.

Proces výroby usní je sledem celé řady mokrých koželužských operací. Jednou z těchto operací je námok, jehož úkolem je mimo jiné odstranění soli (NaCl), která se dnes běžně používá při konzervaci kůží. Při procesu námoku se kůže vypírá v čisté vodě, což má za následek velké koncentrační šoky v povrchových vrstvách solí konzervované kůže. Ponořením do čisté vody totiž totiž dojde k náhlému snížení koncentrace soli na povrchu kůže, což vede ke vzniku velkých osmotických tlaků a k nevratnému potrhání struktury kůže a tím k jejímu značnému znehodnocení. Právě v povrchových vrstvách se nachází nejjemnější vlákna, která jsou velmi náchylná na přetrhání vlivem těchto vysokých tlaků. Míra poškození také závisí na typu kůží, kdy jemné kůže jako teletina, kozina nebo ovčina trpí nejvíce. Tyto poměrně drahé kůže mohou být značně poškozeny a jejich kvalita snížena.

Proto je vhodné námok neprovádět v čisté vodě, ale v roztoku soli o určité počáteční koncentraci. Díky vyšší koncentraci soli v lázni nedochází k dramatickým změnám v povrchových vrstvách kůže, čímž je zachována jemná struktura vláken. Kvalita a vlastnosti této nenahraditelné suroviny jsou tak co nejvíce zachovány.

Při odsolování kůží a dalších následných operacích vzniká celá řada odpadů, které jsou mnohdy klasifikovány jako nebezpečné. Mezi způsoby jakými lze proces zefektivnit patří například recyklace použitých surovin, chemikálií a vzniklých odpadů. Dalším způsobem je minimalizace spotřeby vody a energie při odsolování vhodným řízením procesu. V současné době se při řízení odsolování vychází z dlouholetých zkušeností. Objevují se však snahy o kvantitativní popisy dějů probíhajících uvnitř kůží. Právě řízením procesu námoku a odsolování kůží na základě kvantitativního popisu se zabývá tato disertační práce.

Minimalizaci nákladů na spotřebu energie a práci vody lze dosáhnout vhodným řízením celého procesu průtočného praní. Vhodnou regulací průtoku čisté vody lze dosáhnout

pozvolného klesání koncentrace solí prací lázně tak, aby docházelo ke snižování koncentrace soli v kůži rovnoměrně v celé tloušťce kůže. Důležité je také to, aby námok a proces odsolování netrval příliš dlouho nebo nevyžadoval zbytečně velké množství prací vody.

V rámci disertační práce bylo vytvořeno vhodnou úpravou automatické pračky experimentální modelové zařízení. Pračka byla vybavena potřebnými periferiemi k ověření navrženého algoritmu řízení námoku surových kůží. Kromě samotného praní umožňuje také měření spotřebované vody a měření vodivosti prací kapaliny, která je přímo úměrná koncentraci soli v prací lázni. Všechny hodnoty pak zpracovává řídicí jednotka vybavená 16ti bitovým mikropočítačem. V řídicí jednotce je také implementován algoritmus pro několik pracích režimů. Jednotku lze připojit k nadřazenému systému přes ethernetové nebo sériové rozhraní. Ovládací aplikace na webovém serveru mikropočítače pak ovládá celý model na dálku a umožňuje také zaznamenávání všech potřebných veličin a hodnot procesu odsolování.

V rámci experimentů byl ověřen průběh pracího procesu při různém stupni praní. Experimenty byly koncipovány tak, aby jimi byly ověřeny základní předpoklady a vlastnosti procesu odsolování.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Už naši předci před tisíci lety objevili unikátí vlastnosti kůží. Kůže je flexibilní, pevná, má dobré tepelně izolační vlastosti, je odolná vůči větru nebo tekoucí vodě [Kite & Thomson, 2006]. Téměř všechny kultury využívaly kůží k různým účelům a používali nejrůznější způsoby jejich zpracování. Proces činění kůží jak ho dnes známe, se však objevil až s průmyslovou výrobou [Kite & Thomson, 2006]. Jedná se o fyzikálně chemickou přeměnu surové kůže na useň pomocí vhodných síťovacích látek. V současné době jsou nejrozšířenější síťovací látkou soli chromu [Blažej a kol. 1984].

Čerstvě stažené kůže mohou být jen zřídka bezprostředně zpracovávány na useň nebo kožešinu. Pokud jsou kůže zpracovávány krátce po stažení, je nutné umístění jatečních i koželužských závodů v jednom místě. To vede k úsporám energie, chemikálií a netrpí příliš životní prostředí [Briš, 1989]. Tento způsob zpracování však nelze vždy použít a kůže je nutné konzervovat.

Mezi stažením kůže a jejím zpracováním uplyne obvykle nějaká doba potřebná pro uskladnění nebo dopravu. V této době enzymatický systém kožních kapalin a mikrobiální činnost vedou k rozkladu bílkovin kůže a ke zhoršování jejich vlastností. Baktérie přítomné v okolním prostředí, ve špíně ale také uvnitř kůží a kožní enzymy jsou za života zvířete kontrolovány obranným metabolickým systémem. Jakmile je však zvíře zabito, proces rozkladu okamžitě začíná. Zahnilé kůže jsou znehodnocené, zapáchají a jsou nepoužitelné pro jakékoliv zpracování. [Blažej a kol.,1984]

Další změny v kůži vyvolávají metabolické enzymy, které se vyskytují v biochemickém systému samotné kůže. Enzymy se obvykle po přerušení životních pochodů aktivují a některé z nich, zejména latentní kolagenasa, mohou vyvolávat hluboký autoproteolytický rozklad kůže dokonce i v jinak sterilních podmínkách. Autoproteolýzu kůže katalyzují také katepsiny, skupina vnitrobuněčných proteáz, které se účastní rozkladných procesů i za života zvířete, ovšem v rovnováze se syntetizujícími procesy. Po smrti se rovnováha porušuje a rozkladné exoenergetické procesy začnou převládat. [Blažej a kol.,1984]

Z výše uvedených důvodů je nutné surové kůže konzervovat. Kůže se mohou konzervovat několika způsoby. Patří sem sušení kůží, konzervace pevnou solí, solným

roztokem nebo piklováním [Blažej a kol.,1984]. Konzervace sušením kůží není předmětem disertační práce, a proto zde budou nastíněny jen ty procesy, které se týkají odsolování.

2.1 Konzervace pevnou solí

Kůže se po stažení vychladí a v oddělené místnosti konzervuje. Kůže je rozprostřena naplocho a je posypána od rubu vrstvou soli (NaCl) a okraje kůže se přehrnou dovnitř, aby ztráta vlhkosti byla co nejmenší. Další kůže se kladou na sebe, takže vytváří asi 1 až 1,5 m vysokou hromadu ve tvaru balíku. Mezi každou kůží je vrstva soli. Jedná se o značné množství soli. Běžně asi 0,5-1 kg na 1 kg kůže. Aby sůl pronikla hluboko do kůže, nechává se takto nasolená kůže asi tři týdny zaležet. Po této době se kůže odebírají a povrchová sůl je z nich ošřepáním odstraněna. [Blažej a kol.,1984] Takto ošetřené kůže lze uchovávat při mírných teplotách přibližně jeden rok [Briš, 1989].

2.2 Konzervace solným roztokem

Konzervace pevnou solí je poměrně zdlouhavá. Zrychlení se dosáhne použitím nasyceného solného (NaCl) roztoku. Kůže se musí nejprve upravit a pak je ve velkých nádobách propírána solným roztokem. V tomto nasyceném roztoku se nechávají asi 48 hodin. Proces je považován za ukončený při úplném prosycení kůže solným roztokem. Kůže se pak vytahují, ždímají a pak jsou ještě posypány malou vrstvou pevné soli. Takto ošetřené kůže lze skladovat až tři roky. [Blažej a kol.,1984]

2.3 Konzervace piklováním

Nároky na konzervování surových kůží se zjednoduší, podrobí-li se kůže ihned prvním koželužským operacím, tj. námoku, eventuálně i loužení a dalším procesům. Tím se z kůže odstraní nevláknité bílkoviny nejnáze podléhající hnilobě a také enzymatické systémy způsobující autoproteolýzu. Je však nutno zabránit růstu mikroorganismů během dopravy nebo skladování. Toto může být dosaženo tzv. piklováním. Piklování je proces, v němž se působí na kožní hmotu roztokem solí a sirných kyselin [Orhon, 2009]. Kyselé prostředí (pH 2 až 3) potlačuje rozvoj většiny mikroorganismů a zároveň připravuje kůži pro činění, takže zjednodušuje další proces v koželužně [Orhon, 2009]. Kůže se obvykle pikluje v prostředí 10% roztoku NaCl, asi 1% kyseliny (nejčastěji sírové) a vody. [Briš, 1989][Blažej a kol.,1984]

2.4 Námok a odsolování kůží

Kůže se dodávají do koželužen v částečně odvodněném stavu, nebo i zcela suché. Musí se proto nejdříve dobře rozmáčet, aby se staly ohebné a vláčné a aby jimi mohly lépe prostupovat chemické látky v dalších operacích [Blažej a kol.,1984][Floriánová, 2005]. Namáčení kůží se provádí ve velkých bubnech. Tento způsob námoku se kromě moderního pohonu motorů používá již více než sto let [Covington, 2009].

Kůže se rozmácejí ponořením do vody buď v klidu, nebo se proces urychluje mícháním. Namáčí se ve vodě o teplotě 12°C až 18°C [Floriánová, 2005]. Námok má také za úkol odstranit konzervovadla a nečistoty. Pokud je konzervovadlem sůl, tak se provádí odsolování kůží. Tento proces je závislý na objemu prací lázně v bubnu, neboť se vyrovnává při praní koncentrace soli v lázni a v kůži samotné [Covington, 2009]. Při použití většího objemu vody pak postačuje méně cyklů námoku, což zobrazuje tabulka 1.

Tabulka 1: Účinnost námoku kůží vzhledem k použitému objemu vody [Covington, 2009]

Poměr objemu kůže a vody	Odstranění soli [%] a objem použité vody [%]									
	Námok 1		Námok 2		Námok 3		Námok 4		Námok 5	
1:1	45	100	70	200	83	300	91	400	95	500
1:2	63	200	86	400	95	600				
1:3	70	300	91	600	97	900				
1:4	70	400	91	800	97	1200				
1:5	78	500	95	1000						

Z tabulky 1 je patrné, že při použití většího objemu vody a při akceptovatelné hodnotě odstranění 95% soli se sníží počet cyklů námoku, avšak za cenu větší spotřeby vody [Covington, 2009]. Běžně se používají tři námoky s 300% objemem vody vůči kůži [Kaul a kol., 2005]. V tomto případě se jedná o stacionární systém, při kterém se kůže namáčí v několika krocích v čisté vodě. Je-li však kůže namočena do čisté vody, dochází k velkým a náhlým změnám koncentrace na povrchu a těsně pod povrchem kůže. Dochází k velkým změnám osmotického tlaku, který působí na tkáň a tím ji poškozuje. Při velkém objemu odsolovaných kůží mohou být tyto ztráty významné. [Kolomazník a kol., 2006]. V současné době tento problém ze strany koželužského průmyslu není vůbec řešen [Covington, 2009].

Při procesu odsolování kůží se využívá jeden ze tří způsobů [Covington, 2009]:

- 1) Průtočný systém, kdy je čistá voda neustále přiváděna do rotačních bubnů. Zvyšování hladiny vody je kompenzováno odtokem odpadní vody. Výhodou tohoto způsobu je neustálý kontakt kůže s čistou vodou, což urychluje celý proces odsolování. Nevýhodou je značná náročnost na spotřebu čisté vody.
- 2) Postupné praní, kdy je kůže vypírána v několika krocích čistou vodou. V tomto případě je vždy nutné počkat do vyrovnání koncentrací v kůži a v prací lázni. Tento způsob je velmi náročný na čas, ale na druhé straně je spotřebováno mnohem méně čisté vody než v předchozím případě.
- 3) Posledním způsobem je možnost využití znečištěné vody v dalších krocích pracího procesu. Jediným odpadem je pak solí nasycená voda z posledního kroku postupného praní. Tímto způsobem lze výrazně snížit spotřebu při každém kroku praní [Kaul a kol., 2005].

Kůže se hydratují tak dlouho, dokud nedosáhnou stavu odpovídajícího čerstvé kůži po stažení [Floriánová, 2005]. Proces námoku, odsolování a činění kůží je jedním z nejnáročnějších průmyslových procesů na spotřebu vody [Kaul a kol., 2005]. Na jeho konci je také celá řada odpadu, který je v řadě případů nebezpečný [Krishanamoorthi a kol., 2009]. Na jednu tunu surové kůže se spotřebuje asi 15-80m³ vody, přičemž výsledkem je asi 250 kg použitelné usně [Orhon, 2009]. Kromě vody a živočišného odpadu se při úpravě surových kůží spotřebuje asi 5-6 kg chromu a asi 10 kg sulfidů [Orhon, 2009], které jsou klasifikovány jako nebezpečný odpad. Proto se dnes využívá celá řada recyklačních technologií, které dokáží využít znovu chemikálie nebo vyčištěnou vodu. Tím se ušetří značné množství finančních prostředků a také díky recyklaci netrpí životní prostředí.

V závěru je možno konstatovat, že odsolování se v současné době provozuje na základě zkušeností. Cílem této disertační práce je právě navržení algoritmu řízení, který bude schopen řídit odsolování dle vnitřních dějů, které probíhají v kůži při odsolování. Vhodnou regulací průtoku čisté vody lze dosáhnout rovnoměrného snižování koncentrace solí v celé tloušťce kůže, což zabezpečí zachování struktury a kvality kůže.

3 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

V současné době se odsolování provozuje na základě zkušeností a nikoliv na základně vnitřních dějů probíhajících v kůži. Cílem této práce je navržení postupu a algoritmu řízení námoku surových kůží na základě kvantitativního popisu systému průtočného praní. Důraz je kladen na zachování kvality kůží bez porušené struktury.

Kůže je ponořena do solného roztoku místo do čisté vody, čímž nedojde k velkému koncentračnímu šoku na povrchu kůže. Poté bude čistá voda ředit koncentrovaný roztok, čímž se bude pomalu měnit koncentrace soli. Z kůže se začne pomalu uvolňovat přebytečná sůl, takže nebude docházet k velkému pnutí vláken díky osmotickému tlaku. Aby odsolování netrvalo příliš dlouho a nevznikaly dodatečné náklady, bude průtok čisté vody pomalu urychlován. Při tomto procesu bude brán zřetel na náklady spojené s celým procesem odsolování a také na minimalizaci odpadu z důvodu potrhání tkání v kůžích.

Výsledkem disertační práce bude funkční algoritmus a řídicí jednotka pro řízení odsolování kůží a jejich implementace do experimentálního modelu pro ověření samotného algoritmu. Tento systém bude řízen mikropočítačem, který bude schopen komunikovat s nadřazeným systémem přes ethernetové rozhraní. Systém bude navržen tak, aby proces řízení optimalizoval průtok čisté vody systémem dle zadaných kritérií, které bude možné nastavit v obslužné aplikaci. Tyto parametry řídicího procesu jsou závislé na typu kůže, objemu prací lázně a jiných vlastnostech a mají za úkol zamezit poškození kůží způsobené náhlými změnami koncentrace. Cíle disertační práce lze shrnout do několika bodů:

- 1) Návrh algoritmu řízení námoku a odsolování surových kůží
- 2) Ověření algoritmu na matematickém modelu
- 3) Vytvoření experimentálního modelu řízeného mikropočítačem
- 4) Vytvoření obslužné aplikace ovládající řídicí jednotku modelu
- 5) Ověření algoritmu na vytvořeném experimentálním modelu

Přínosem této práce pro vědu a praxi je zavedení nového přístupu k odsolování kůží a nový pohled na kvalitativní úroveň tohoto procesu. Počítačový řídicí systém umožňuje minimalizovat ztráty způsobené nevhodností a poškozením kůží.

4 TEORETICKÝ RÁMEC

4.1 Řízení procesu odsolování

Procesu řízení námoku a odsolování předcházelo vytvoření matematických modelů. Pro porovnání byly vytvořeny modely pro lázně a průtočné praní.

Celý proces je závislý hlavně na nákladech, které by měly být minimální. Na druhou stranu však prací proces musí zachovat kvalitu praných kůží. Obě podmínky jsou dány cílovou funkcí, která stanovuje celkové náklady na tento proces v závislosti na průtoku prací tekutiny.

Pro odzkoušení navrženého algoritmu bude vytvořen systém, který demonstruje celý odsolovací proces. Pro proces odsolování bude využita pračka s přidavnými zařízeními pro sledování slanosti roztoku a průtoku vody. Odsolovací proces bude probíhat řízením průtoku čisté vody v závislosti na měřené vodivosti prací lázně. Systém bude řízen mikropočítačem, který bude možné připojit k nadřazenému systému (PC). Zde bude možné sledovat podrobně celý proces a archivovat jeho průběh.

Algoritmus řízení bude zvolen tak, aby proces odsolování minimalizoval náklady při současném zamezení prudkých koncentračních šoků, které poškozují kvalitu kůže.

4.2 Cílová funkce

Pro minimalizaci nákladů je nutné vycházet z cílové funkce (4.1) [Kolomazník, 1990]:

$$N = N_1 + N_2 \quad (4.1)$$

kde N_1 jsou náklady na spotřebovanou energii a N_2 náklady na spotřebovanou prací tekutinu. Ty lze vypočítat z rovnic (4.2) a (4.3) a jsou závislé na konkrétních cenách energie a prací tekutiny [Kolomazník, 1990]. Cílová funkce pak určuje základní charakteristiky práciho procesu jako je stupeň praní nebo průtok vody.

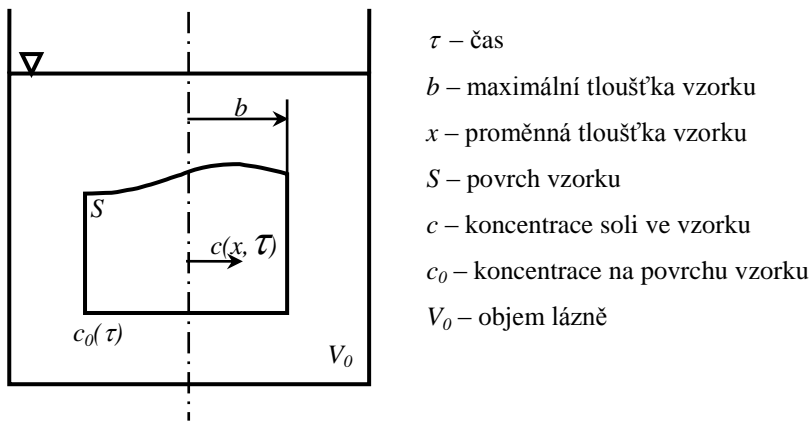
$$N_1 = k_E \cdot P \cdot t \quad (4.2)$$

$$N_2 = k_v \cdot \dot{V} \cdot t \quad (4.3)$$

kde k_E je měrná cena za energii, k_V je měrná cena za práci vodu, P je příkon elektrických spotřebičů, \dot{V} je objemový průtok a t je čas.

4.3 Model námoku čistou vodou

Model námoku kůží čistou vodou je znázorněn na obrázku (Obr. 1). Při tomto způsobu odsolování dochází k výrazným koncentračním šokům na povrchu a těsně pod povrchem odsolovaného vzorku. Tyto koncentrační šoky poškozují mnohdy velmi výrazně strukturu kůže, což má vliv na kvalitu produktů. Při tomto způsobu je odsolování prováděno ponořením vzorku do čisté vody. Proces může být urychlen mícháním.



Obr. 1. Model námoku čistou vodou [Kolomazník, 1990]

Vlastní námok surových kůží lze rozdělit z hlediska mechanismu procesu do dvou fází. V první fázi dochází k uvolnění vláknité struktury tuhé fáze difuzí vody dovnitř kůže. V druhé fázi se provádí praní, kdy se odstraní nevláknité podíly rozpustných bílkovin a značná část soli [Kolomazník, 1990].

Tento systém lze popsat jako nestacionární jednorozměrnou difuzi [Kolomazník a kol., 2006][Kolomazník, 1990][Crank, 1977]. Při něm přechází hmota z jedné části systému do druhé jako výsledek náhodného pohybu molekul [Crank, 1977]. Difuzi popisuje 2. Fickův zákon (4.4).

$$\frac{D\partial^2 c(b, \tau)}{\partial x^2} = \frac{\partial c(b, \tau)}{\partial \tau} \quad (4.4)$$

Vlastní rovnici reprezentují následující počáteční a okrajové podmínky v intervalu $0 < x < b$ a $\tau > 0$.

$$c(x,0) = c_p \quad (4.5)$$

$$c_0(0) = 0 \quad (4.6)$$

$$c(b,\tau) = \varepsilon \cdot c_0(\tau) \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial c(0,\tau)}{\partial x} = 0 \quad (4.8)$$

$$-\frac{DS\partial c(b,\tau)}{\partial x} = \frac{V_0\partial c_0(\tau)}{\partial \tau} \quad (4.9)$$

Rovnice (4.7) je okrajová podmínka dokonalého míchání kapalné fáze, rovnice (4.8) je podmínka osové symetrie a rovnice (4.9) vyjadřuje rovnost difuzního toku s rychlostí akumulace soli v kapalné fázi. Zavedením bezrozměrných veličin získáme rovnice (4.10) až (4.14):

$$C = \frac{c}{c_p} \quad (4.10)$$

$$X = \frac{x}{b} \quad (4.11)$$

$$F_0 = \frac{D \cdot \tau}{b^2} \quad (4.12)$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon \cdot c_0}{c_p} \quad (4.13)$$

$$N_a = \frac{V_0}{V} \quad (4.14)$$

Tímto dostaneme rovnici (4.4) v bezrozměrném tvaru (4.15):

$$\frac{\partial^2 C(X, F_0)}{\partial X^2} = \frac{\partial C(X, F_0)}{\partial F_0} \quad (4.15)$$

kde X je bezrozměrná tloušťka vzorku, F_0 je bezrozměrný čas a C je bezrozměrná koncentrace. Dále pak platí následující počáteční a okrajové podmínky:

$$C(X, 0) = 1 \quad (4.16)$$

$$C_0(0) = 0 \quad (4.17)$$

$$C(1, F_0) = C_0(F_0) \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial C(0, F_0)}{\partial X} = 0 \quad (4.19)$$

Difuzní bezrozměrnou rovnici pak lze napsat ve tvaru (4.20):

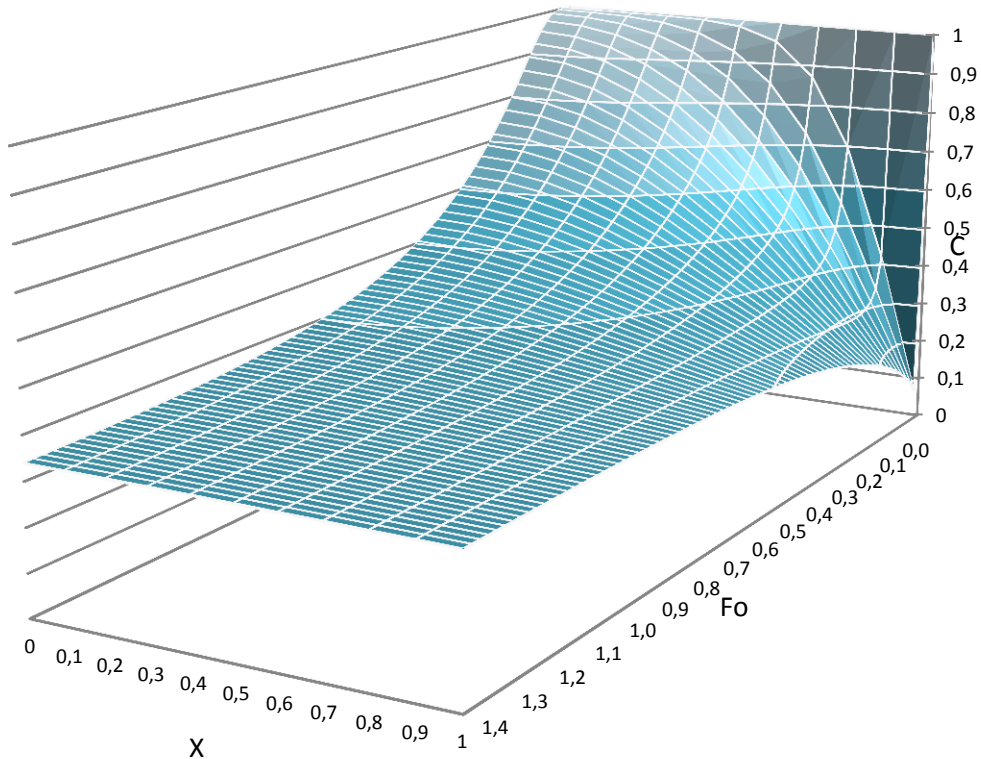
$$-\frac{\partial C(X, F_0)}{\partial X} = \frac{N_a}{\varepsilon} \frac{\partial C_0(F_0)}{\partial F_0} \quad (4.20)$$

Řešení uvedené rovnice (4.20) pro určení koncentrace při námoku čistou vodou je dáno následujícím vztahem (4.21):

$$C(X, F_0) = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + N_a} - 2 \cdot N_a \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(X \cdot q_n) \cdot e^{(-F_0 \cdot q_n^2)}}{\cos(q_n) \cdot [\varepsilon + N_a] - N_a \cdot q_n \cdot \sin(q_n)}, \quad (4.21)$$

kde kořeny transcendentní rovnice q_n lze vypočítat ze vztahu (4.22):

$$\operatorname{tg}(q) = -\frac{q \cdot N_a}{\varepsilon} \quad (4.22)$$

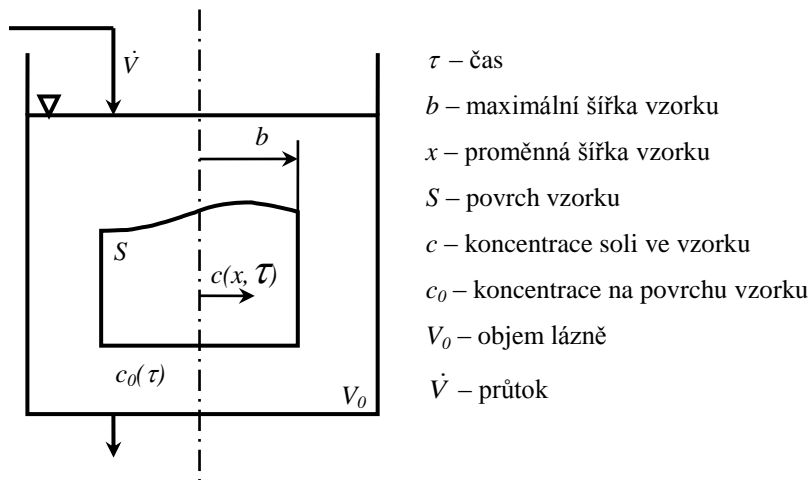


Obr. 2. Koncentrační pole nároku v čisté vodě

Na obrázku (Obr. 2) je znázorněno koncentrační pole při lázněm praní čistou vodou. Na povrchu kůže ($X=1$) dochází k dramatickému snížení koncentrace, což má za následek výrazné zvýšení osmotických tlaků, které mají negativní vliv na strukturu jemných vláken v povrchových vrstvách kůže. Poté začne koncentrace na povrchu narůstat a uvnitř kůže zase klesat až do okamžiku, kdy je koncentrace v celé tloušťce kůže stejná a v rovnováze s koncentrací soli v lázni.

4.3.1 Průtočný systém

Podobně lze určit model i pro průtočný systém, kdy je do nasyceného solného roztoku pomalu vháněna čistá voda, čímž se koncentrace pomalu snižuje.



Obr. 3. Model námoku průtočného systému

Model vychází opět z difuzní rovnice (4.4). Mění se však některé počáteční podmínky:

$$c_0(0) = c_{0p} \quad (4.23)$$

$$c(x, 0) = c_p = \varepsilon \cdot c_{0p} \quad (4.24)$$

$$-\frac{DS\partial c(x, \tau)}{\partial x} = \frac{V_0\partial c_0(\tau)}{\partial \tau} + \dot{V} \cdot c_0(\tau) \quad (4.25)$$

Zavedením bezrozměrných proměnných dostaneme následující rovnici (4.26):

$$-\frac{\partial C(X, F_0)}{\partial X} = L[C_0(F_0) + 1] + \frac{N_a}{\varepsilon} \frac{\partial C_0(F_0)}{\partial F_0} \quad (4.26)$$

kde bezrozměrné veličiny X , F_0 a N_a jsou definovány stejně jako u neprůtočného systému rovnicemi (4.11), (4.12) a (4.14). Další bezrozměrné veličiny mají tvar:

$$C = \frac{c - \varepsilon \cdot c_{0p}}{c_p} \quad (4.27)$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon(c_0 - c_{0p})}{c_p} \quad (4.28)$$

$$L = \frac{\dot{V} \cdot b}{S \cdot D \cdot \varepsilon} \quad (4.29)$$

Počáteční hodnota koncentrace je $C(X,0)=0$. Řešením průtočného systému je rovnice (4.30):

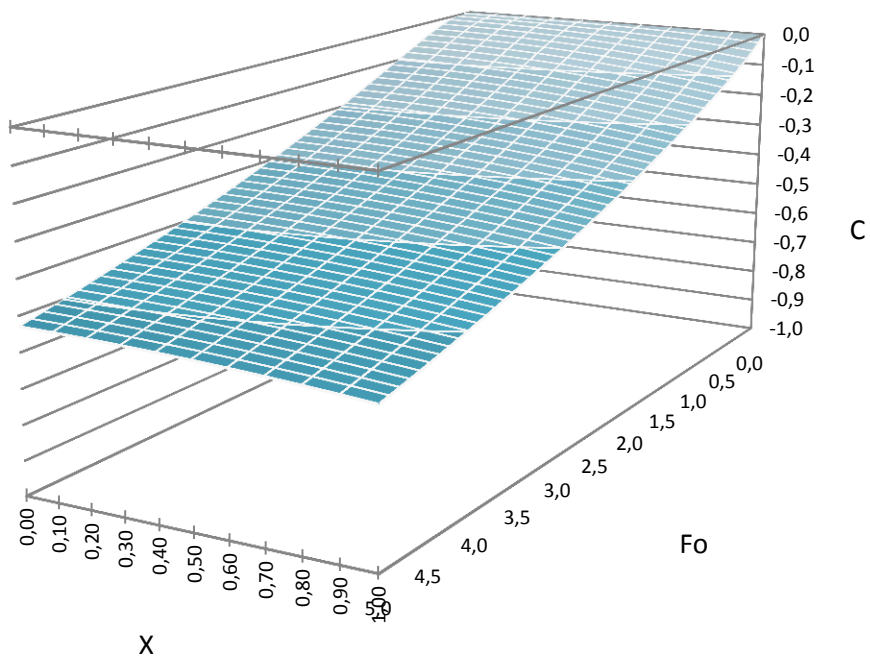
$$C(X, F_0) = -1 + 2L \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(X \cdot q_n) e^{(-F_0 \cdot q_n^2)}}{q_n \sin(q_n) + q_n^2 \cos(q_n) + q_n L \sin(q_n) + \frac{2N_a q_n^2 \cos(q_n)}{\varepsilon} - \frac{q_n^3 N_a \sin(q_n)}{\varepsilon}} \quad (4.30)$$

Kořeny q_n lze vypočítat z transcendentní rovnice (4.31):

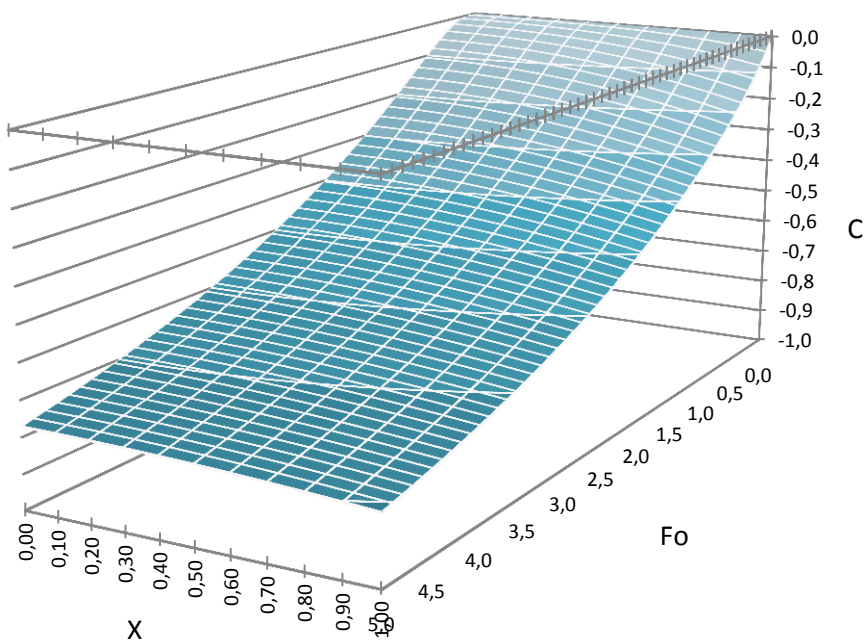
$$\operatorname{tg}(q) = \frac{L}{q} - \frac{N_a}{\varepsilon} q \quad (4.31)$$

Koncentrační pole průtočného systému je zobrazeno na následujících obrázcích (Obr. 4-7). Průběh koncentrace je závislý mimo jiné také na bezrozměrné veličině L , která definuje průtok čisté vody systémem. Tedy výsledné koncentrační pole je závislé na průtoku, a proto je nutné volit takový průtok, který při zachování nepoškozené struktury tkání kůže minimalizuje také spotřebu vody a čas námoku.

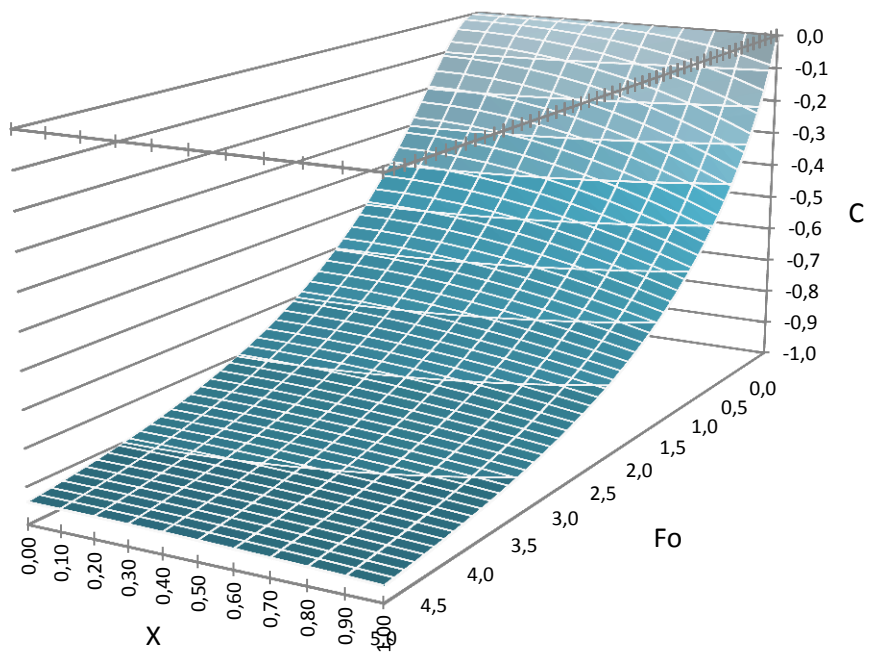
Z následujících obrázků (Obr. 4-7) je zřejmé, že koncentrace klesá postupně stejně v celé šířce vzorku kůže. Nedochozí tak k velkým změnám koncentrace na povrchu a tak i k velkým rozdílům osmotického tlaku, který trhá strukturu kůže.



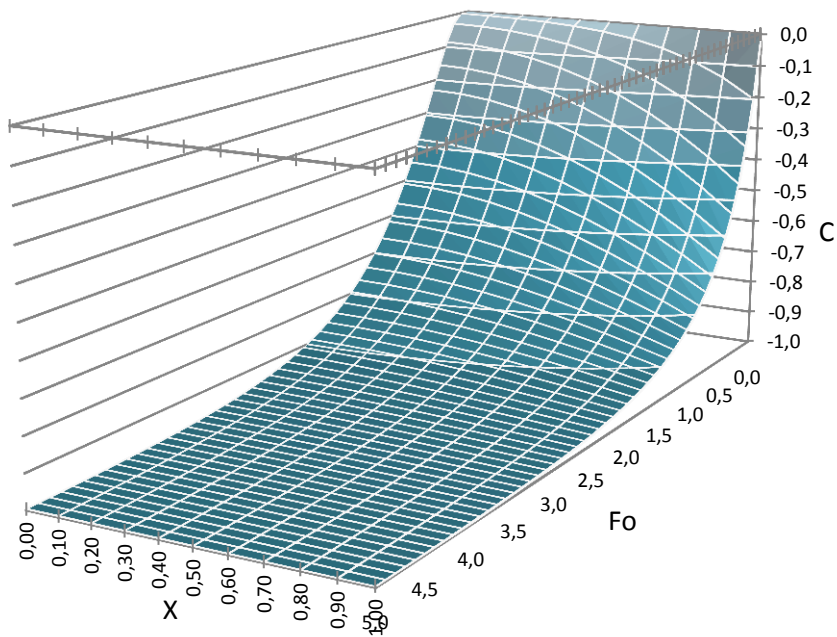
Obr. 4. Koncentrační pole u průtočného systému: $L=0,5$



Obr. 5. Koncentrační pole u průtočného systému: $L=1$



Obr. 6. Koncentrační pole u průtočného systému: $L=2$



Obr. 7. Koncentrační pole u průtočného systému: $L=5$

4.3.2 *Stupeň pracího procesu*

Řízení bude závislé na stupni pracího procesu, který určuje rychlost průtoku prací tekutiny. Vychází se z rovnice (4.32) [Kolomazník, 1990]:

$$y = \frac{\dot{V}}{c_p V} \int_0^{\tau} c_0 \cdot d\tau \quad (4.32)$$

Následující rovnice stupně pracího procesu platí pro sůl v kůži i v lázni:

$$y = \frac{\dot{V}}{c_p V + c_{0p} \varepsilon V_0} \int_0^{\tau} c_0 \cdot d\tau \quad (4.33)$$

Je tedy nutné vypočítat integrál c_0 , což je koncentrace na povrchu kůže tedy při $X=1$. Rovnice pro bezrozměrnou koncentraci je dána vztahem (4.34):

$$C = \frac{c - \varepsilon \cdot c_{0p}}{c_p} \quad (4.34)$$

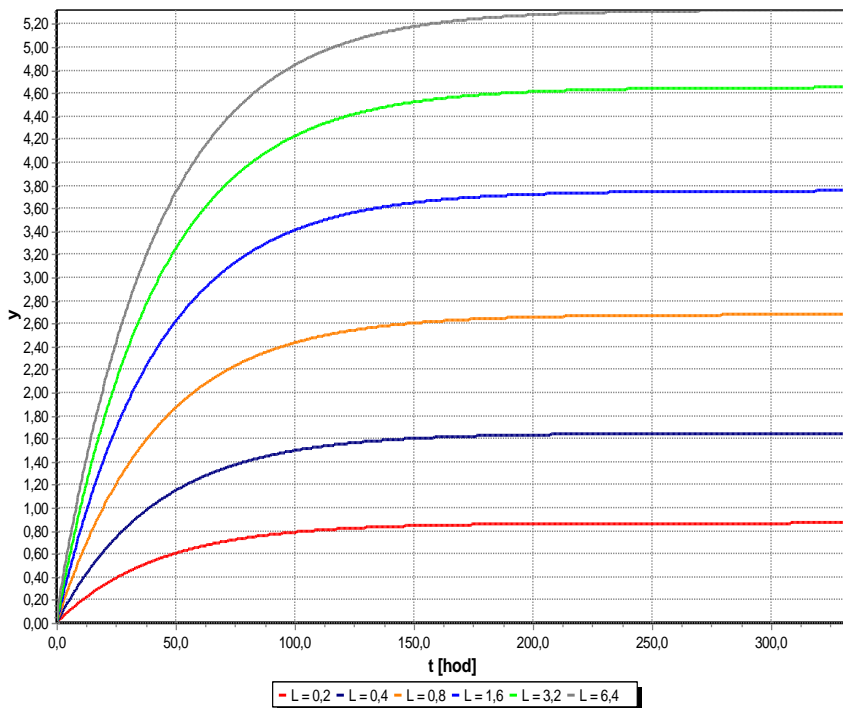
Z této rovnice je nutné vyjádřit c . Rovnice pak bude ve tvaru (4.35):

$$c = 2Lc_p \sum \frac{1}{L + L^2 + q^2 \left(\frac{N_a}{\varepsilon} - 2L \frac{N_a}{\varepsilon} + 1 \right) + q^4 \left(\frac{N_a}{\varepsilon} \right)^2} \cdot e^{-\frac{q^2 D \tau}{b^2}} \quad (4.35)$$

Po integraci pak bude mít rovnice tvar:

$$\int_0^{\tau} c \cdot d\tau = 2Lc_p \sum \frac{1}{L + L^2 + q^2 \left(\frac{N_a}{\varepsilon} - 2L \frac{N_a}{\varepsilon} + 1 \right) + q^4 \left(\frac{N_a}{\varepsilon} \right)^2} \cdot \frac{b^2}{q^2 D} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q^2 D \tau}{b^2}} \right) \quad (4.36)$$

Tento vztah je nutné dosadit do funkce pro stupeň pracího procesu. Ten je tedy závislý na rychlosti průtoku L a na dalších veličinách. Pro minimalizaci nákladů a maximalizaci kvality kůži je nutné vhodně regulovat právě průtok L . Algoritmus navržený v této práci bude navíc regulovat kontinuálně průtok čisté vody, a tím bude přecházet mezi jednotlivými stupni praní. Řešení je vhodné pro kůži v tzv. dobré kondici. To znamená, že hodnota difusního koeficientu je přibližně $10^{-9} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$.



Obr. 8. Cílová funkce pro různé průtoky L .

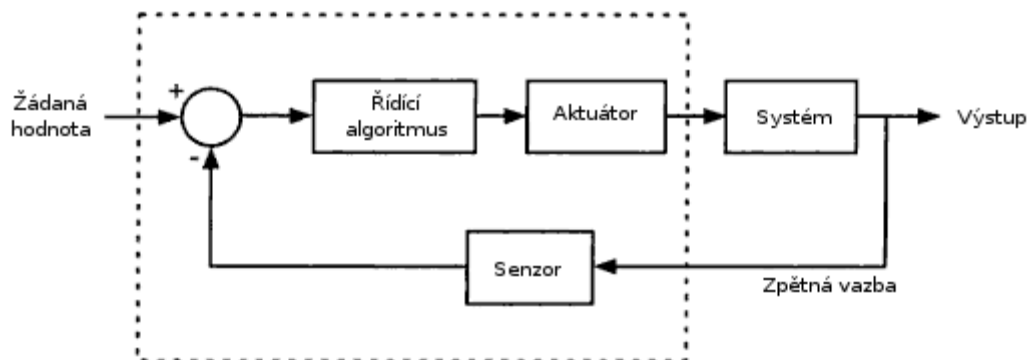
Na obrázku (Obr. 8) je vidět závislost stupně pracího procesu na čase pro různé průtoky prací tekutiny L . Jak bylo řečeno v teoretické části, je vhodné volit takový průtok L , aby koncentrace soli klesala rovnoměrně v celé kůži.

4.4 Řízení technologických procesů embedded systémy

Od šedesátých let minulého století, kdy se začalo s prvními pokusy o průmyslovou aplikaci řídicích algoritmů, došlo v oboru řízení technologických procesů k velkému pokroku. Stalo se to mimo jiné také díky vzestupu výpočetní techniky, která je dnes neodmyslitelnou součástí těchto systémů. Dostatečný procesorový výkon dokáže zpracovávat ohromné množství dat, a proto se počátkem 90. let začala do řídicích systémů zavádět právě mikroprocesorová technika. [Khaylova, 2002]

Většina technologických procesů, se kterými se lze běžně setkat, má stochastický charakter [Bobál, 1999]. Proto regulátory s pevně nastavenými parametry mnohdy nevyhovují, neboť při změně vlastností systému začne být řízení neoptimální. Taková změna může být způsobena změnami v provozním režimu, změnami surovin nebo typem zařízení [Tao, 2003].

Pro tyto systémy se využívá systém průběžné identifikace, během kterého se pomocí zpětné vazby neustále přepočítávají parametry systému [Bobál, 1999]. Pro malé a střední technologické procesy se pro tyto účely využívá embedded systémů.



Obr. 9. Schéma procesu řízení [Ledin, 2004]

Embedded systémy se vyznačují celou řadou vstupně/výstupních periferií, které jsou jejich přímou součástí. Právě přímá interakce s těmito periferiemi je jedním z hlavních rozdílů mezi embedded systémem a běžným počítačem. Jedním z hlavních cílů embedded systémů je zabezpečit minimální odezvu systému na vstupy. Je totiž jejich úkolem zpracovat velké množství dat za krátký čas. [Pasetti, 2002] Embedded systémy se běžně používají pro automatické úkoly, které nevyžadují přímou interakci s uživatelem, a proto většinou nemají žádné uživatelské rozhraní (klávesnice, displej,...). Jsou však připojeny k celé řadě senzorů a aktuátorů [Colnarič a kol., 2008].

4.5 Mikropočítače

Mikropočítač je integrovaný mikroprocesor s podpůrnými periferiemi (paměť a vstupně / výstupní zařízení). V dnešní době se využívá 8 až 32 bitových mikropočítačů. Ty se využívají pro řízení procesů v malých průmyslových provozech. Jejich využití je stále široké i přes nástup průmyslových počítačů.

Výhodou mikropočítačů je jejich nízká cena, malé rozměry a mnohdy bohaté funkční vybavení [Morton, 2001]. Mikropočítače jsou dnes schopné provádět i náročné výpočty a operace [Morton, 2001][Doležel & Vašek, 2006]. Navíc jsou mikropočítače vybaveny celou řadou periferních zařízení, jako jsou analogově-digitální převodníky, časovače, hodiny

reálného času, PWM (Pulse Width Modulation), sériová rozhraní, binární vstupy a výstupy apod.

Mikropočítače společnosti Freescale Semiconductor nabízí celou škálu různých typů vhodných pro nejrůznější použití. Jedná se hlavně o mikropočítače řady M68HC08 a M68HC12. Tyto dvě řady jsou mezi sebou nekompatibilní. M68HC08 má zcela jiný instrukční soubor a hlavně strukturu registrů a zásobníků [Dostálek & Vašek, 2004]. Rozdíl je také v kmitočtu jádra mikropočítače a hlavně ve vybavení. Mikropočítače řady M68HC12 jsou většinou dodávány s větší výbavou a hlavně jsou osazeny větší paměť. To je také mnohdy rozhodující při výběru mikropočítače pro určitý úkol. Paměťové nároky na řízení složitými algoritmy jsou mnohdy rozhodující.

Další výhodou řady M68HC12 je bohatší výbava v podobě 10-ti bitových převodníků, interní PWM, nebo několika časovačů [Morton, 2001].

Mikropočítače bývají dodávány i s celou řadou nadstandardních prvků, jako jsou LCD displeje, reproduktory, LED diody nebo klávesnice. Tato zařízení dovolují snadné ovládání mikropočítače nebo ladění programů.

4.5.1 Programování mikropočítačů

Software mikropočítačů je koncipován jako program běžící v nekonečné smyčce, který je spuštěn při zapnutí a který reaguje na události z okolí [Conarič a kol., 2008]. Dále se také využívá operačních systémů reálného času. Mikropočítače lze obecně programovat třemi základními způsoby – programování ve strojovém kódu, assembleru nebo v nějakém vyšším jazyce [Morton, 2001][Doležel & Vašek, 2006][Pack & Barrett, 2002].

Assembler je jazyk symbolických adres, ve kterém se přistupuje výhradně přes instrukce přímo k vlastnostem mikropočítače. Tento programovací jazyk je označován za programovací jazyk nižší úrovně. Poskytuje programátorovi značné výhody oproti strojovému jazyku.

V poslední době však výrobci mikropočítačů nabízejí programovací jazyky vyšší úrovně většinou založené na jazyku C. To je i případ společnosti Freescale a její dceřiné společnosti Metrowerks, která nabízí programovací nástroj CodeWarrior. CodeWarrior umožňuje programování v C, C++ a v assembleru. Je také možné tyto přístupy programování

kombinovat a v jednom projektu používat jazyk C i assembler. Tento programovací nástroj mimo jiné obsahuje i účinný simulátor mikropočítačů včetně debug módu. Výhody a nevýhody těchto dvou programovacích přístupů jsou shrnuty v tabulkách 2 a 3.

CodeWarrior umožňuje výpočty s čísly s pohyblivou desetinnou čárkou ve formátu IEEE [Morton, 2001]. Nabízí dva datové typy čísel – *single* a *double*. První z těchto dvou typů má velikost 4 byty a druhý 8 bytů. Rozdíl je také ve výpočetních funkcích, které s těmito čísly pracují. Funkce pro osmibytová čísla jsou mnohem náročnější na výpočetní čas a zabírají mnohem více paměti než funkce pro čtyřbytová čísla. Proto je nutné volit kompromis – buď přesné výpočty za cenu vyšších paměťových nároků a pomalejšího zpracování nebo méně přesné výpočty, které zabírají méně paměti a současně jsou rychlejší.

Tabulka 2: Výhody a nevýhody jazyka symbolických adres

<i>Výhody</i>	<i>Nevýhody</i>
Přehlednost obsazenosti RAM proměnnými	Složitost programování
Je rychlejší a potřebuje menší paměťový prostor	Nepřehlednost zdrojového kódu
	Špatná implementace modulů
	Nekompatibilita mezi různými řadami mikropočítačů

Tabulka 3: Výhody a nevýhody CodeWarrioru

<i>Výhody</i>	<i>Nevýhody</i>
Jazyk založený na C	Optimalizace kódu
Snadné ladění programu	Špatná kontrola nad obsahem RAM
Kompatibilita modulů řízení mezi všemi mikropočítači Freescale	
Jednoduchá implementace modulů do výsledné aplikace	
Snadný přístup k funkcím mikropočítače	
Snadná práce s čísly s pohyblivou desetinnou čárkou	

Jistou výhodou programování je i možnost využití objektové verze jazyka C++. Kód napsaný v objektovém jazyce je však zpravidla mnohem větší, než alternativní kód psaný v jazyce C. To je při omezené paměti mikrokontroléru mnohdy zásadní problém. Také optimalizace programu kompilérem v jazyce C++ znemožňuje u větších programů spolehlivé ladění aplikace.

4.5.2 *Komunikační rozhraní*

4.5.2.1 *Sériová komunikace*

Mezi nejběžnější sériová rozhraní patří RS-232, RS-485 a USB. Na běžném PC jsou nejméně dva sériové porty s rozhraním RS-232 označované COM1 a COM2 popřípadě ještě COM3 a COM4, jejichž konektory však nebývají vyvedeny a musí se proto použít přídatná rozšiřující karta. Kromě tohoto portu je běžně na počítačích k dispozici USB. Jediné rozhraní, které není v PC obsaženo, je RS-485 a pro jeho použití u PC je nutný převodník RS-232/RS-485. Na mobilních zařízeních (notebook, PDA,...) není většinou standardní port RS-232 obsažen vůbec. U těchto zařízení se pro periferní sériová zařízení téměř výhradně používají USB porty. Použití sériových portů má několik výhod [Doležel & Vašek, 2006]:

- Přístroje je možno připojovat a odpojovat při zapnutém počítači.
- Napájecí napětí pro malá zařízení lze odebírat přímo z portu.
- Rychlost přenosu (USB).
- Připojení více zařízení na delší vzdálenost (RS-485).

Jednotlivá rozhraní však mají také svá omezení. Je dán omezený počet možných připojených zařízení na konektor, přenosová rychlost a maximální délka kabelu. Také se jednotlivá zařízení liší použitým napětím. Parametry nejpoužívanějších sériových rozhraní jsou uvedeny v následující tabulce 4.

Tabulka 4: Parametry sériového rozhraní [Doležel & Vašek, 2006][Minaski 2002][Kainka & Berndt, 2000]

<i>Typ rozhraní</i>	RS 232	RS 485	USB
<i>Maximální počet zařízení</i>	1	32	127
<i>Maximální přenosová rychlost</i>	20 kbps	10 Mbps	12 MB/s
<i>Maximální délka vedení</i>	15 m	1200 m	5 m
<i>Maximální napětí</i>	± 25 V	± 12 V	± 5 V

Sériové rozhraní bylo v této práci využito pouze pro programování mikrokontroléru. Je však možné využít toto rozhraní pro řídicí aplikaci napsanou v libovolném programovacím jazyku. Při vývoji byl také využit převodník z dnes mnohem rozšířenějšího rozhraní USB na RS232.

4.5.2.2 Rozhraní USB

Univerzální sériové rozhraní USB patří mezi nejmladší zařízení sloužící pro sériovou komunikaci. Toto rozhraní postupně nahrazuje standardní sériové (COM1, COM2, atd.) a paralelní (LPT) porty. Obsahuje pouze dva datové a dva napájecí kabely a pro komunikaci na krátké vzdálenosti je ideální. Proto se používá především u osobních počítačů. Dokáže k jednomu konektoru přes rozbočovače připojit až 127 zařízení. Dnes už je na trhu celá řada produktů, které podporují toto rozhraní. Jsou to klávesnice, myši, tiskárny, skenery, pevné disky apod. Navíc se dnes využívají také RS232-USB převodníky hlavně u systémů, který nedisponují tímto konektorem. Využívá se toho například u notebooků, které dnes ve velké míře nejsou portem RS232 vybaveny, za to mají hned několik konektorů USB.

4.5.2.3 Ethernet a protokol TCP/IP

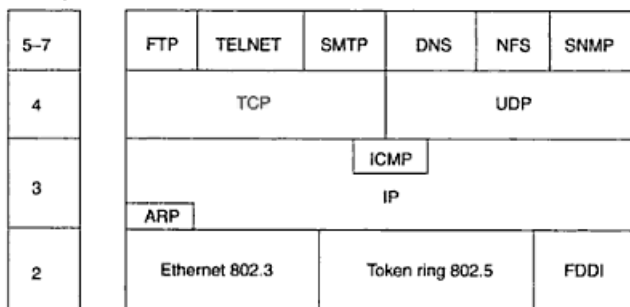
Ethernet je síťová technologie, která je používána pro komunikaci mezi zařízeními. Po mnoho let embedded systémy a ethernetové sítě byly odděleny. Ethernet byl k dispozici pouze u desktopových počítačů nebo notebooků. Embedded systémy, které potřebovaly komunikovat s okolím, byly odkázány na rozhraní s nízkou rychlostí, limitovaný dosah anebo na komunikaci bez standardního aplikačního protokolu. To se však v současné době mění a začínají se objevovat mikropočítače se zabudovanou podporou ethernetového rozhraní. [Axelson, 2003]

Síťová komunikace využívá několika vrstev, které jsou součástí standardu OSI (Open Systems Interconnection). Každá vrstva zabezpečuje jinou funkci a zpracovává jiná data. Jednotlivé vrstvy tohoto standardu shrnuje tabulka 5.

Tabulka 5: Přehled vrstev standardu OSI [Held, 2003]

Vrstva	Název	Popis
1	Fyzická	Zajišťuje fyzickou hardwarovou komunikaci
2	Spojovací	Utváří data do logických celků (rámců), které dále posílá fyzické vrstvě
3	Síťová	Tato vrstva zabezpečuje směrování v síti a síťové adresování
4	Transportní	Zabezpečuje přenos dat mezi koncovými uzly
5	Relační	Zabezpečuje organizaci a synchronizaci spojení
6	Prezentační	Transformuje data do formátu využitelného aplikacemi
7	Aplikační	Zajišťuje aplikacím přístup ke komunikačnímu systému

Ethernet patří do spojovací vrstvy. Vrstvu síťovou reprezentuje běžně IP a protokol TCP patří do vrstvy čtvrté transportní. Vrstvy pět až sedm je možné sloučit a prezentovat jako vrstvu jedinou, která zpracovává všechny potřebné funkce těchto vrstev. Další obrázek (Obr. 10) názorně ukazuje další protokoly a služby standardu TCP/IP.



Obr. 10. Protokoly a služby standardu TCP/IP [Held, 2003]

Protokol TCP (Transmission Control Protocol) pracuje na transportní vrstvě síťového rozhraní. Tento protokol umožňuje mezi počítači vytvořit spojení, přes které si vyměňují data.

4.6 Měření složení kapalin

Proces řízení odsolování je přímo závislý na koncentraci sodných iontů v roztoku. Proto je součástí modelu také snímač vodivosti pracující na principu konduktometrie. Vodivost roztoků elektrolytů je způsobena pohybem iontů, který se nazývá migrace. Aby došlo k

migraci, je nutné umístit do roztoku dvojici elektrod s elektrickým napětím. Síla F_1 , která nutí iont migrovat k opačně nabitě elektrodě, je dána součinem intenzity elektrického pole E a náboje iontu [Fuka & Jenčík, 1967]:

$$F_1 = z \cdot e \cdot E \quad (4.37)$$

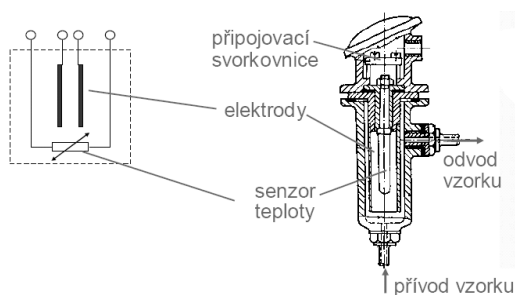
kde z je nábojové číslo a e elementární náboj. Proti této síle působí odpor, který je dán viskozitou kapaliny a velikostí částice. Ten lze spočítat podle Stokesova zákona [Fuka & Jenčík, 1967]:

$$F_2 = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \quad (4.38)$$

kde η je viskozita kapaliny, r poloměr částice a v rychlost pohybu iontu. Tyto síly působí proti sobě a při dosažení rovnovážného stavu je rychlost pohybu iontů stálá.

$$G = (N_k e |z_k| u_k + N_a e |z_a| u_a) \frac{A}{l} \quad (4.39)$$

Rychlost pohybu iontů v elektrickém poli se nazývá iontová pohyblivost kationtu u_k nebo aniontu u_a . Kromě vnějšího elektrického pole na sebe působí ionty elektrostatickými silami. Každý iont je obklopen ionty opačného náboje, čemuž se říká iontová atmosféra. S tím je spojeno brzdění iontů při pohybu.

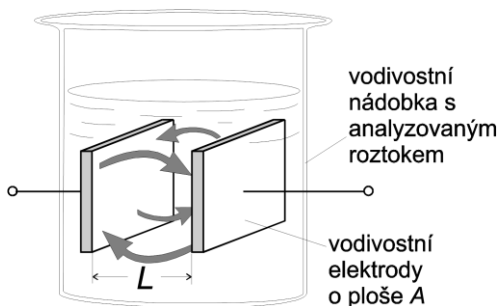


Obr. 11. Průtočný snímač vodivosti

Vodivost roztoků G (4.39) je v závislosti na složení roztoku určena počtem kationtů N_k a aniontů N_a v prostoru mezi elektrodami v nádobce. Ve vztahu k měrným elektrodám je vodivost roztoku přímo úměrná jejich velikosti a nepřímo úměrná jejich vzájemné vzdálenosti.

Na obrázku (Obr. 11) je zobrazen průtočný snímač vodivosti. Kromě tohoto typu senzorů existují i ponorné snímače [Hruška, 2000].

Konduktometrie se dělí do několika skupin. Jedná se například o přímou konduktometrii, konduktometrickou titraci nebo vysokofrekvenční konduktometrii.



Obr. 12. Konduktometrie

Přímá konduktometrie je neselektivní, a proto se nejčastěji používá ke stanovení koncentrace jednosložkových roztoků. U směsí lze změřit celkovou koncentraci iontů. Nejčastěji se pomocí přímé konduktometrie kontroluje čistota vod s přihlédnutím k obsahu rozpouštěných solí. Každému zvýšení koncentrace soli o 0,5 mg v 1 litru vody odpovídá při 20°C zvýšení vodivosti asi o $1 \cdot 10^{-4} \text{ Sm}^{-1}$.

Vysokofrekvenční konduktometrie využívá k měření vodivosti nádobku, která má na vnějších stranách elektrody (kapacitní typ) nebo se měří indukční cívkou, kde nádobka tvoří jádro (indukční typ). Používá se vysokých frekvencí v rozmezí od 1 až do 100 MHz. Proud procházející obvodem je přímo závislý na vodivosti roztoku.

V praxi má měření elektrické vodivosti velký význam, protože umožňuje průběžnou kontrolu a regulaci koncentrace vodivých kapalin. Měření koncentrace se používá zejména v energetice, v chemickém a papírenském průmyslu (kontrola výroby kyselin, čpavku, stupně znečištění odpadních vod, čistoty napájecí vody apod.). [Fuka & Jenčík, 1967]

4.7 Měření průtoku

Měření průtoku tekutin je v průmyslové praxi běžné a důležité. Na trhu dnes existuje celá řada přístrojů pro měření hmotnostního nebo objemového průtoku pracujících na různých

principech. Průtokoměry lze rozdělit do dvou základních skupin – průtokoměry mechanické a průtokoměry pracující na principu rozdílu tlaků.

Tlakové snímače průtoku pracují na principu snížení tlaku před a za škrtícím členem v potrubí. Zvýšením rychlosti tekutiny zúžením trubice nebo při proudění přes clonu dochází ke snížení tlaku [Baker, 2002]. Tento úbytek před a za škrtícím členem je pak přímo úměrný celkové rychlosti průtoku tekutiny v potrubí. K tomuto typu průtokoměru patří například venturiho trubice, clona, pitotova trubice nebo dýza. Tento typ průtokoměru dnes na trhu dominuje, přestože mechanické alternativy jsou ve všech ohledech srovnatelné [Baker, 2002].

U mechanických průtokoměru se měří rychlost pohybu mechanických částí v potrubí. Může se jednat o rotační nebo posuvné členy. Rotační členy využívají rotorů vsazených do potrubí v ose proudění tekutiny (turbínkové) nebo kolmo na osu potrubí (lopatkové). U těchto průtokoměru je rychlost proudění přímo úměrná rychlosti otáčení rotačního členu. Dalším typem je tzv. plovákový průtokoměr, ve kterém se v kónické trubici pohybuje plovák nahoru a dolů. Plovák je z materiálu hustšího, než je proudící tekutina. Rychlost průtoku je pak přímo úměrná svislé poloze plováku v potrubí. [Bird & Ross, 2002]

Existují také speciální průtokoměry určené pro zvláštní tekutiny. Jsou to hlavně ultrazvukové a elektromagnetické průtokoměry. Hlavní výhodou těchto průtokoměru je princip, na kterém pracují. Jedná se o bezkontaktní snímače, které nezpůsobují úbytek tlaku v potrubí.

V této disertační práci byl u experimentálního modelu použit rotační lopatkový průtokoměr. Tento typ průtokoměru měří množství tekutin, které proteče potrubím za určitý čas. Průtokoměr se skládá z válcové komory, ve které se nachází rotor s lopatkami. Tekutina procházející lopatkami otáčí rotorem, čímž odměruje přesný objem proudící tekutiny. Otáčky lze snímat mechanicky nebo elektronicky. Tento typ průtokoměru se používá běžně pro měření protečeného objemu vody, u benzinových pump pro odměření množství čerpaného paliva, v průmyslu při měření průtoku dehtu, rozpouštědel nebo také v potravinářství.[Bird & Ross, 2002]

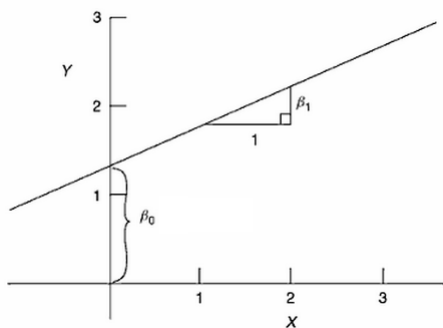
4.8 Určování gradientu vodivosti

Regresní analýza je jednou z nejpoužívanějších statistických metod. Poprvé byla tato metoda představena Franciscopem Galtonem, renomovaným biologem, v roce 1908. Tento biolog použil regresní analýzu při studiu dědičnosti [Yan & Su, 2009]. Jedním z cílů regresní analýzy je jednoduchá lineární regrese, která stanovuje parametry přímky, která nejlépe odpovídá reálným datům.

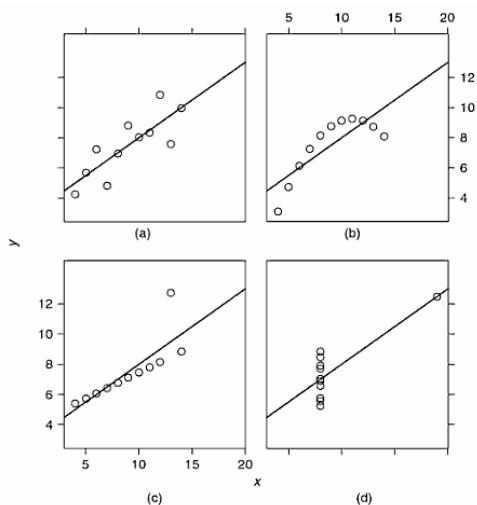
Lineární regrese byla použita pro určení gradientu klesání vodivosti (koncentrace) v práci lázni při procesu odsolování. Pro lineární regresi byla zvolena metoda nejmenších čtverců [Weisberg, 2005].

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_i \quad (4.40)$$

Rovnice (4.40) popisuje regresní přímku s úsekem $\hat{\beta}_0$ a směrnici $\hat{\beta}_1$. Tuto přímku a její parametry vysvětluje následující obrázek (Obr. 13). Regresní přímka má nahradit soubor bodů na křivce jednou přímkou.



Obr. 13. Znáornění přímky s vyznačením úseku a směrnice [Weisberg, 2005]



Obr. 14. Různé proložení bodů regresní přímkou [Weisberg, 2005]

V disertační práci byl pomocí lineární regrese počítán gradient vodivosti při odsolování. Při sledování gradientu klesání vodivosti je důležitá pouze směrnice přímky $\hat{\beta}_1$. Tento parametr lze stanovit pomocí celé řady vztahů:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{SXY}{SXX} = r_{xy} \frac{SD_y}{SD_x} = r_{xy} \left(\frac{SYY}{SXX} \right)^2 \quad (4.41)$$

Symboly v rovnicích (4.41) jsou dány následujícími vztahy [Weisberg, 2005]:

$$SXX = \sum(x_i - \bar{x})^2 = \sum(x_i - \bar{x})x_i \quad (4.42)$$

$$SXY = \sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum(x_i - \bar{x})y_i \quad (4.43)$$

$$s_{xy} = \frac{SXY}{(n-1)} \quad (4.44)$$

$$r_{xy} = \frac{s_{xy}}{SD_x SD_y} \quad (4.45)$$

$$SD_x = \sqrt{\frac{SXX}{(n-1)}} \quad (4.46)$$

$$SD_y = \sqrt{\frac{SYY}{(n-1)}} \quad (4.47)$$

Pro stanovení směrnice přímky byl využit vztah $\hat{\beta}_1 = SXY/SXX$. Regulace procesu odsolování probíhá na žádanou hodnotu odpovídající právě směrnici přímky lineární regrese.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

5.1 Experimentální model

5.1.1 *Popis modelu*

Pro ověření procesu řízení odsolování bylo nutné vytvořit experimentální model, na kterém by bylo možné provádět příslušná měření. Pro tento případ byla zvolena upravená automatická pračka, která obsahuje potřebné vybavení pro provedení experimentu (viz příloha A). Pračka je vybavena přívodem a odvodem prací vody, dále rotačním bubnem pro zvýšení efektivity pracího procesu a hlavně pro dokolané vyrovnání koncentrace v celém objemu prací lázně a v neposlední řadě také cirkulačním okruhem, který čerpá prací vodu přes snímač vodivosti. Tento snímač pak měří vodivost vody, která je přímo úměrná koncentraci soli ve vodě.

Ventil přívodu prací vody je ovládán elektronicky. Výstup je zabezpečen přepadem (hadice na výstupu musí být výš než hladina prací tekutiny v bubnu pračky) a čerpadlem, které odčerpává vodu z bubnu pračky. Cirkulaci vody pro snímač vodivosti zabezpečuje sekundární okruh, který je poháněn dalším čerpadlem.

Pro správnou funkci pracího procesu je také nutné hlídat objem prací lázně v bubnu pračky. To lze zabezpečit několika způsoby. Buď přímým měřením výšky hladiny v bubnu, nebo například měřením objemu průtoku na vstupu a výstupu a z těchto hodnot určit objem prací lázně. Vzhledem ke komplikované instalaci snímače pro měření výšky hladiny a také vzhledem k tomu, že v pračce se při pracím procesu neustále otáčí buď, byl zvolen druhý způsob. Objem prací lázně je tak měřen pomocí dvou průtokoměrů vody na vstupu a výstupu. Nevýhodou tohoto způsobu je vyšší náročnost na kalibraci obou průtokoměrů. Výhodou je přímé měření spotřeby prací vody při odsolování a také možnost přesného řízení průtoku vody systémem.

5.1.2 *Řízení modelu*

Experimentální model je řízen pomocí řídicí jednotky, jejímž jádrem je mikropočítač Freescale řady HC12. Řídicí jednotka také umožňuje jednoduché ovládání modelu nebo jeho

připojení k nadřazenému systému přes RS232 nebo přes Ethernet. Nadřazený systém pak nastavuje parametry a spouští automatické řízení pracího procesu.

Základní ovládání modelu je zabezpečeno tlačítky přímo na řídicí jednotce. Ta obsahuje také diodu, která indikuje průběh pracího procesu. Při spuštěném procesu dioda svítí, při přerušení řízení dioda bliká.

5.1.3 *Snímač vodivosti Aseko WT Cnd*

Pro experimentální model byl použit snímač vodivosti WT Cnd (Obr. 15) s rozsahem měření 0-2000 μ S/cm, což pro ověření modelu a řídicího algoritmu dostačuje, přestože pro využití v plném provozu by bylo nutno použít přístroj s větším rozsahem. Řídicí algoritmus je však na velikosti vodivosti resp. na koncentraci soli v roztoku nezávislý.



Obr. 15. Snímač vodivosti Aseko WT Cnd a průtokoměr FTB 4605

Pro měření vodivosti je využita speciální elektroda, jejíž potenciál je vyhodnocen a převeden na proudový signál 4-20mA. Proudový signál je dále v řídicí jednotce převeden na napětí 0-5V, které zpracuje AD převodník mikropočítače. Hodnota vodivosti je také zobrazena na instalovaném displeji nebo je přenášena do ovládací aplikace na PC. Převodník vyžaduje napájení 24V a je napájen přímo z řídicí jednotky.

Tabulka 6 shrnuje nejdůležitější parametry snímače vodivosti:

Tabulka 6: Parametry snímače vodivosti WT Cnd

<i>Napájení</i>	24 (12) V _{ss}
<i>Příkon</i>	12 VA
<i>Měřicí rozsah</i>	0-2000 μS/cm
<i>Výstup</i>	Displej, 4-20 mA
<i>Počet propojovacích vodičů</i>	4
<i>Maximální délka vodičů</i>	200 m

Snímač vodivosti je připevněn na desku, která je součástí pračky. Přívod měřené kapaliny je naspodu jímky. Přívod i odvod tekutiny je zabezpečen PE hadičkami o průměru 6mm, které jsou zajištěny převlečnou maticí.

5.1.4 Průtokoměry FTB 4605

V experimentálním modelu byly pro měření průtoku použity lopatkové průtokoměry FTB 4605 (Obr. 15). Jedná se o jednoduché snímače průtoku s impulsním výstupem. Ten je pak přiveden na port H mikropočítače, kde obsluha přerušení přičítá impulzy k čítači. Lze tak měřit objem spotřebované vody nebo objem lázně v bubnu pračky. Průtokoměry jsou napájeny přímo z řídicí jednotky napětím o velikosti 12V. Tabulka 7 uvádí základní vlastnosti těchto průtokoměrů.

Tabulka 7: Základní charakteristiky průtokoměrů

<i>Průměr šroubení</i>	1/2"
<i>Minimální průtok</i>	0,57 l/min
<i>Kontinuální průtok</i>	24,99 l/min
<i>Maximální průtok</i>	49,21 l/min
<i>Impulsů na litr</i>	40

Použité průtokoměry bylo nutné zkalibrovat. Průtokoměr na vstupu načítá 0,02089 litru na jeden impuls. Průtokoměr na výstupu načítá 0,02750 litru na impuls. Dále bylo nutné změřit maximální rychlost průtku na vstupu i výstupu. Vzhledem k tomu, že nebylo možné

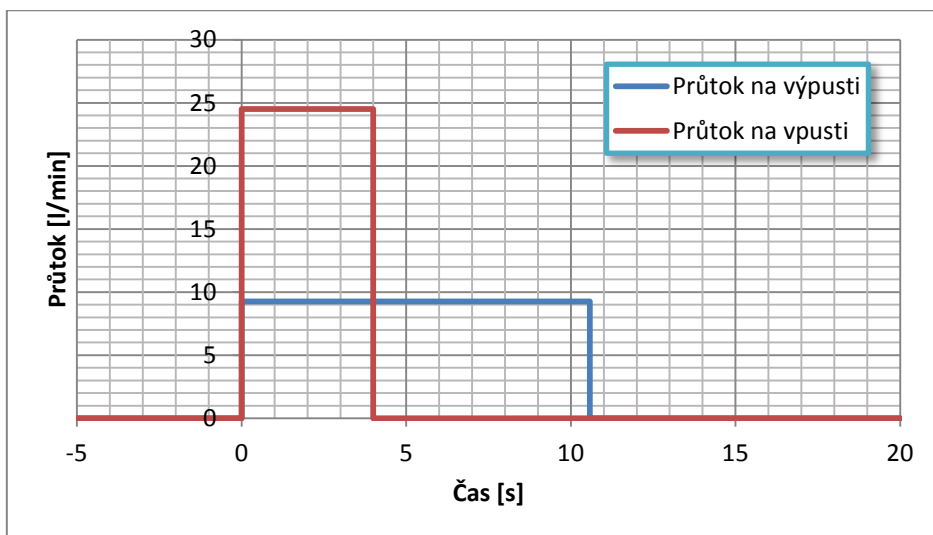
regulovat průtok přímo, bylo nutné vyřešit tento problém využitím PWM (pulse width modulation). Tabulka 8 ukazuje změřené rychlosti průtoku na vstupu i výstupu:

Tabulka 8: Měření objemu při maximálním průtoku na vstupu i výstupu

<i>Místo</i>	<i>Objem [l]</i>	<i>Čas [s]</i>	<i>Průtok [l/min]</i>
Vstup	10,57	25,9	24,49
Vstup	10,00	24,2	24,49
Vstup	10,00	24,4	24,59
Vstup	10,10	24,6	24,60
Výstup	9,97	64,4	9,39
Výstup	10,10	65,4	9,27
Výstup	9,73	62,4	9,36
Výstup	9,98	65,5	9,14

Z tabulky 8 vyplývá výsledný průtok na vstupu **24,54 l/min** a na výstupu **9,29 l/min**. Průtok na výstupu je mnohem menší než na vstupu. Z toho důvodu je tato nižší hodnota použita jako maximální průtok pro celý systém. Ventil na vstupu pak musí za danou dobu napustit odpovídající množství vody, které odteče na výpusti. Pro řízení průtoku byla použita PWM modulace s periodou 20 s. Na začátku periody se vždy pustí maximální průtok po dobu, která je nutná pro napuštění ekvivalentního vypočteného množství tekutiny tak, aby se přítok na vstupu rovnal odtoku na výstupu. Musí se totiž udržovat neustále konstantní objem prací lázně.

Navíc bylo nutné kompenzovat zpětný tok na výpusti. Je-li dostatek času, nateče po zastavení čerpadla zpět do bubnu asi 0,35 l tekutiny. Pokud čas nepřesáhne 2 s, nateče zpět do bubnu vody o objemu asi 0,15 l. Jedná se pouze o přibližnou korekci, která je doplněna o úplnou korekci na naplnění přesného množství prací lázně. Tento přístup udržuje konstantní objem prací lázně při dosažení požadovaného průtoku.

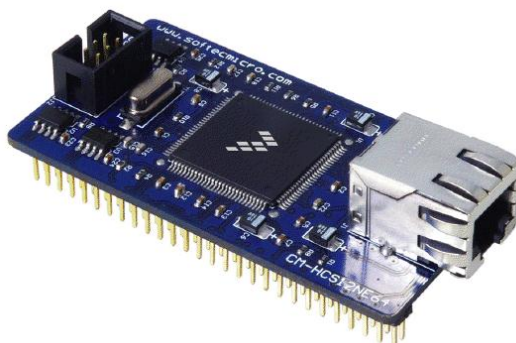


Obr. 16. Ukázka průběhu řízení průtoku na vpusť a výpustí

5.1.5 Mikrokontrolér MC9S12NE64

Při řízení procesu námoku a odsolování byl využit 16ti bitový mikropočítač Freescale MC9S12NE64. Tento model nabízí kromě standardních funkcí také modul pro ethernetové rozhraní, které bylo využito jako komunikační rozhraní s nadřazeným systémem. Samotná komunikace probíhá pomocí protokolu TCP/IP.

Při vývoji byl využit vývojový kit obsahující vyjímatelný modul se samotným mikrokontrolérem, ethernetovým jádrem CM-HCS12NE64 a patičí se vstupy a výstupy (Obr. 17). Tento modul byl využit přímo pro danou aplikaci jako řídicí prvek.



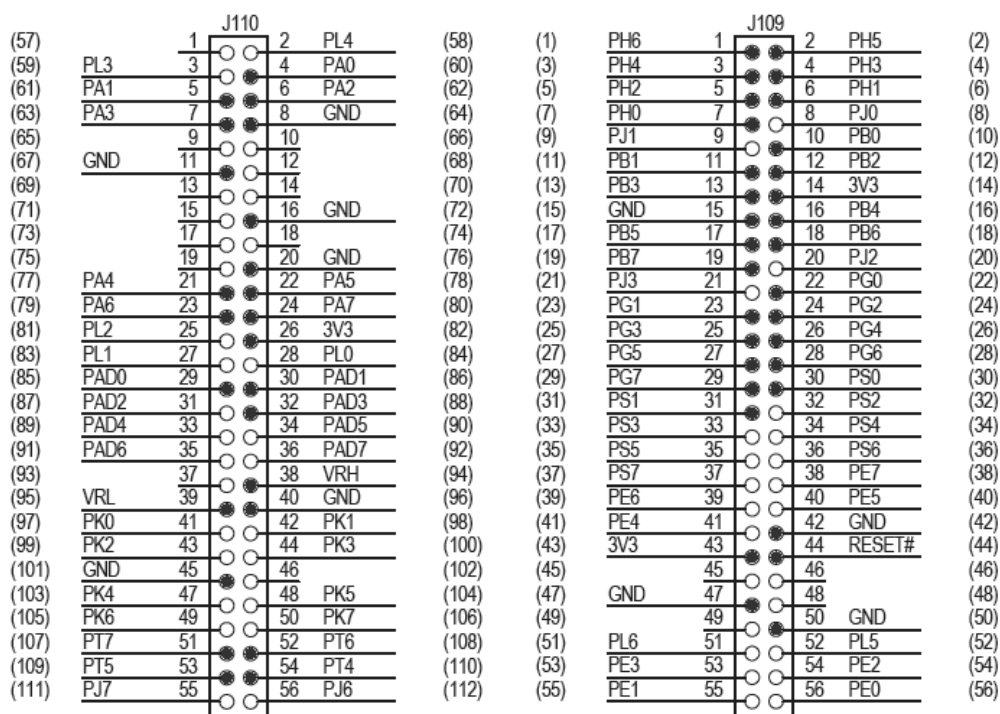
Obr. 17. Jádrový ethernetový modul s mikropočítačem MC9S12NE64

Tento ethernetový modul je vybaven následujícími funkcemi:

- 112 pinový mikročip MC9S12NE64
- Konektor RJ45 ethernetového portu 10/100 Base T
- 1MB sériová Flash paměť
- 512 bytů sériová EEPROM
- 25 MHz krystal
- Resetovací mikroobvod
- BDM obvod pro programování a ladění aplikací
- Dvě patice pro připojení k základní desce

Patice pro připojení k základní desce řídicí jednotky jsou zobrazeny na obrázku 18.

Tmavě vyznačené piny byly využity v řídicí jednotce a jsou rozvedeny na základní desce.



Obr. 18. Zapojení a využití jednotlivých pinů mikropočítače na patičkách jádrového modulu

Z obrázku 18 je patrné, které funkce byly využity pro řídicí jednotku experimentálního modelu. V následující tabulce (Tabulka 9) je uveden seznam využitých portů, jejich rozsah a použití.

Tabulka 9: Využití funkcí mikropočítače v řídicí jednotce

<i>Port</i>	<i>Rozsah</i>	<i>Použití</i>
A, B	0-7, 0-7	Porty pro digitální vstupy a výstupy
G	0-7	Tlačítka a diody na řídicí jednotce, debug mód
H	0-6	Průtokoměry, rezervované vstupy / výstupy
S	0-1	Sériové rozhraní
T	4-7	Rezervované vstupy / výstupy
PAD	0-3	AD převodník pro snímač vodivosti, rezervováno

5.1.5.1 Funkce mikropočítače

Stejně jako jiné mikropočítače řady HC12 je mikrokontrolér MC9S12NE64 vybaven kromě výše zmíněného ethernetového rozhraní také sériovým portem. Pro komunikaci s nadřazeným systémem bylo upřednostněno ethernetové rozhraní kvůli jeho dostupnosti na jakékoliv platformě PC. Sériové rozhraní RS232 již není na PC standardem. Pochopitelně lze využít i standardních portů USB s převodníkem USB/RS232, nicméně při využití ethernetu není nutná instalace žádného dodatečného ovladače, který je u převodníku sériového rozhraní nezbytný.

Další nemalá výhoda ethernetového rozhraní u tohoto modelu mikrokontroléru je možnost využití vestavného webového serveru, který disponuje dostatečnou pamětí pro uložení obslužné aplikace. Je tedy možné aplikaci ovládat prakticky z libovolného počítače bez nutnosti instalace jakéhokoliv dodatečného softwaru.

5.1.5.2 Knihovna OpenTCP

Vývojový kit mikrokontroléru obsahuje zdrojové kódy knihovny OpenTCP. Jedná se o open source balík vyvíjený kompletně v jazyce C firmou Viola Systems. OpenTCP přináší vysoce kvalitní software pro komunikaci přes protokol TCP/IP. Knihovnu je možné integrovat pro libovolný mikrokontrolér, který umožňuje vývoj programů v jazyce C. Knihovna OpenTCP podporuje následující protokoly a služby: ARP, BOOTP, DHCP klient, DNS klient, HTTP web server, POP3 klient, SMTP klient, TCP, IP, TFTP klient, UDP a ICMP.

Tento model mikrokontroléru obsahuje také jednoduchý webový server, který však neobsahuje žádný souborový systém. Toto bylo vyřešeno pomocí jednoduchého souborového systému, který není nic víc než datová struktura obsahující samotný obsah souborů a

informace o nich. Nejedná se o skutečný souborový systém, ale pouze jednodušší náhradu skutečného souborového systému. Soubory jsou uloženy na jádrovém modulu ve flash paměti o velikosti 1MB. Soubory se nahrávají jednouchou terminálovou aplikací.

Webový server mikrokontroléru MC9S12NE64 má několik omezení, která jsou však dostatečná pro uložení celé obslužné aplikace. Webový server může obsahovat standardní webové soubory, jako jsou html stránky, css soubory, java applety nebo obrázky. Vzhledem k povaze embedded systémů dovoluje webový server pouze malý počet simultánních dotazů. Ve výchozím stavu každá webová stránka může obsahovat pouze 3 externí objekty (obrázky, kaskádové styly, flash animace,...). Toto je číslo, které odpovídá počtu simultánně obsluhovaných požadavků, které je mikrokontrolér schopen řídit. Přestože je toto číslo pro tuto aplikaci dostatečné, je možné ho změnit ve zdrojových souborech změnou konstanty `NO_OF_HTTP_SESSIONS`.

6 VÝSLEDKY

V této kapitole jsou popsány výsledky disertační práce. Kromě samotného algoritmu použitého při řízení odsolování obsahuje kapitola také popis výsledné řídicí jednotky, která byla vytvořena pro řízení procesu, dále obslužnou aplikaci, její funkce a ovládání. V poslední části jsou diskutovány samotné výsledky simulací a experimentů provedených na modelu.

6.1 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka obsluhuje všechny vstupy a výstupy experimentálního modelu. Jednotka je snadno rozšířitelná a obsahuje celou řadu nepoužitých (rezervovaných) vstupů a výstupů. Použité vstupy a výstupy jednotky shrnuje tabulka 10:

Tabulka 10: Vstupy a výstupy řídicí jednotky

<i>Značka</i>	<i>Vstup/Výstup</i>	<i>Funkce</i>
C	Vstup	Snímač vodivosti
P1	Vstup	Průtokoměru na vstupu
P2	Vstup	Průtokoměr na výstupu
V	Výstup	Ventil přívodu prací tekutiny
R	Výstup	Ovládání rotoru bubnu
M1	Výstup	Ovládání čerpadla cirkulace
M2	Výstup	Ovládání čerpadla výpusti
Eth	Vstup/Výstup	Ethernetový konektor
RS232	Vstup/Výstup	Konektor sériového portu

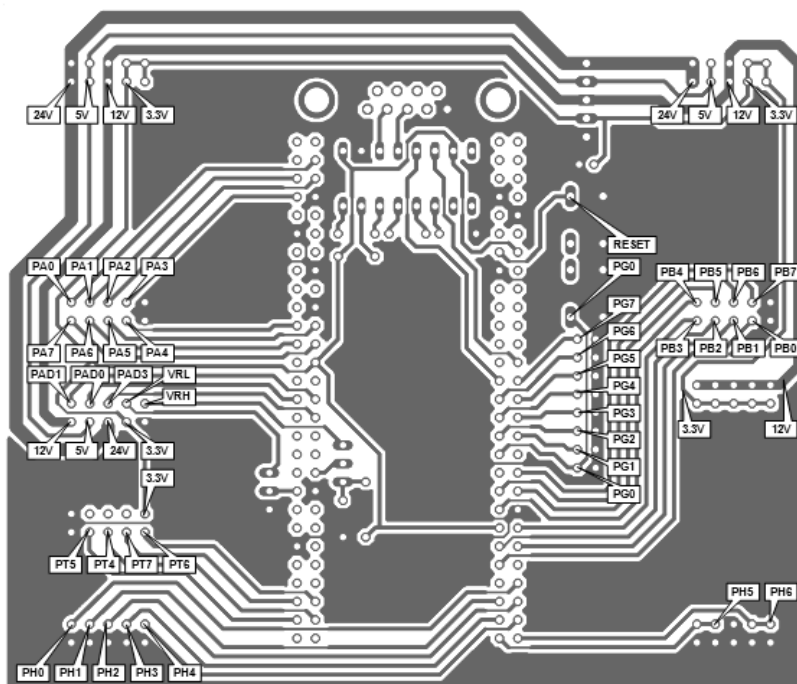
6.1.1 Popis částí řídicí jednotky

Řídicí jednotka je složena z několika samostatných částí. Hlavní část řídicí jednotky je tvořena základní deskou, která obsahuje patici pro jádrový ethernetový modul. Dále je jednotka vybavena napájecím modulem zabezpečujícím stabilizované napětí, které je dále rozvedeno k jednotlivým částem jednotky. Dále řídicí jednotka obsahuje moduly pro vstupy a výstupy.

6.1.1.1 Základní deska

Základní deska je tvořena jednovrstvou deskou plošných spojů (schéma viz příloha B). Obsahuje patici pro ethernetový modul, patice pro moduly vstupů a výstupů nebo pro tlačítka či signalizační LED diody, sériový port a patici pro vstupní napětí. Základní deska také rozvádí jednotlivá vstupní napětí.

Na základní desce je také možné nastavit komparační napětí AD převodníků, které lze měnit mezi uživatelským nastavením a nastavením výchozím. Přepínání se provádí pomocí jumperů. Základní deska také obsahuje port G vyvedený ve formě pinů. Tento port slouží k připojení tlačítek nebo signalizačních diod. Pro jednodušší programování a vývoj obsahuje základní deska také tlačítko reset a tlačítko připojené na pin 0 portu G. Zmáčknutí kombinace těchto dvou tlačítek se mikrokontrolér přepíná do debug módu a módu pro nahrání programu do paměti. V neposlední řadě deska obsahuje obvod MAX3232CPE sloužící pro připojení k mikrokontroléru přes sériové rozhraní RS232. Jádrový ethernetový modul se pak připojuje k základní desce přes dvě padesátišesti pinové patice (Obr. 18 a Obr. 19).



Obr. 19. Tištěný spoj základní desky řídicí jednotky a popisem jednotlivých pinů

6.1.1.2 Napájecí modul

Další částí řídicí jednotky je napájecí modul, který zabezpečuje napájení jak mikropočítače, tak všech periférií včetně snímače vodivosti. Řídicí jednotka je napájena napětím 24V stejnosměrného napětí, které je dále rozděleno na napětí 12V, 5V a 3,3V. Napájení 24V je využito pro snímač vodivosti, 12V pro průtokoměry, 5V je využitelné pro ostatní periférie a napětí 3,3V je využito pro napájení mikropočítače. Vzhledem k vyššímu výkonu je zdroj chlazen pasivním i aktivním chladičem. Napájecí modul se připojuje k základní desce pomocí pětipinového konektoru. Konektor propojuje všechna čtyři napětí a zem se základní deskou.

6.1.1.3 Modul pro snímač vodivosti

Snímač vodivosti je napájen napětím o velikosti 24V. Konektor dále obsahuje jeden signální vodič a zem. Modul je zasunut do patice na základní desce a převádí proudový signál 4-20mA na napětí 0-5V. Toto napětí pak zpracovává AD převodník mikrokontroléru. Snímač vodivosti je připojen na port PAD0.

6.1.1.4 Modul výstupů

Modul výstupů je připojen přes patice na základní desce. Tento modul spíná relé, které ovládají motory čerpadel, ventil vstupu prací vody nebo rotor bubnu. Tento modul obsahuje šest výstupů, které lze připojit na konektory řídicí jednotky. Pro experimentální model jsou využity pouze čtyři z nich. Ostatní jsou rezervovány na případné další funkce modelu. Tento modul se vkládá do dvou patic na základní desce. Modul lze připojit na port A nebo port B mikrokontroléru. Základní deska obsahuje místo pro dva takové moduly. Pro tuto aplikaci však postačoval modul jeden a ten byl zapojen přes port A.

6.1.1.5 Moduly pro snímání impulsů průtokoměrů

Modul pro snímání impulsů průtokoměrů obsahuje obvody pro oba dva průtokoměry použité v tomto experimentálním modelu. Oba jsou připojeny na port H a obsluhují je příslušná přerušení. Do tohoto modulu je přivedno také napětí 12V, které je nutné pro chod průtokoměrů.

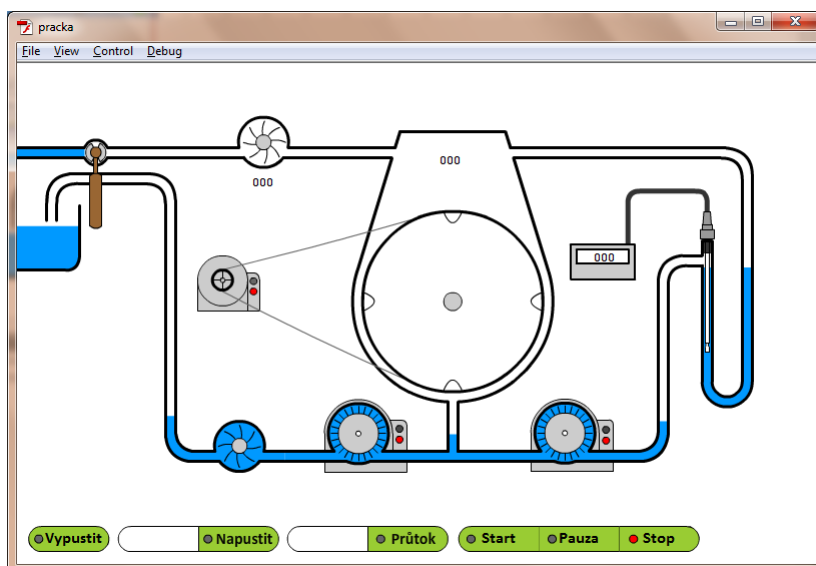
6.1.2 Připojení zařízení

Veškerá zařízení jsou připojena k řídicí jednotce ze strany vstupů a výstupů. Naopak komunikační porty jsou umístěny na straně protilehlé. Horní strana řídicí jednotky slouží k základnímu nezávislému ovládní experimentálního modelu. (viz příloha C)

Binární vstupy a výstupy jsou připojeny k řídicí jednotce pomocí konektorů typu cinch. Červeně jsou označeny výstupy a černě vstupy. Signální vstupy a výstupy vyžadující více vodičů jsou připojeny k řídicí jednotce konektory typu jack.

6.2 Obslužná aplikace

Řídicí modul je možné připojit přes ethernetové rozhraní k nadřazenému zařízení. V tomto případě se jedná o libovolný počítač, který obsahuje internetový prohlížeč. Po zadání IP adresy řídicího modulu je uživatel přesměrován na úvodní stránku webového serveru mikropočítače. Řídicí aplikace pak umožňuje nastavovat proces řízení a celý proces vizualizovat. Samotný řídicí proces je plně implementován v řídicím modulu, je tedy možné stránku opustit a později se k ní vrátit. Vizualizace pak poskytuje průběžnou ukázkou stavu pracího procesu.



Obr. 20. Vizualizace pracího procesu v programu Flash

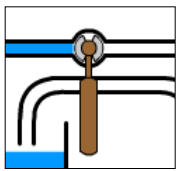
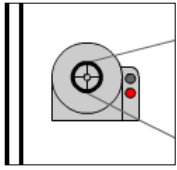
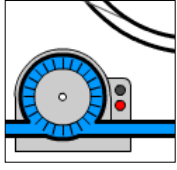
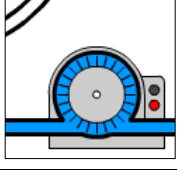
Obslužná aplikace je vytvořena v programu Adobe Flash (Obr. 20). Díky snadné vizualizaci v programu Flash je celý proces znázorněn graficky. Proces lze ovládat ručně

kliknutím na akční prvky nebo příslušná tlačítka. Flashová animace také obsahuje informace o aktuálním objemu a vodivosti prací tekutiny, dále obsahuje informace o celkovém objemu spotřebované prací tekutiny, čase praní nebo průběhu pracího procesu.

6.2.1 Ovládání modelu

Model je plně ovladatelný přes obslužnou aplikaci. Kliknutím na akční prvky dojde k okamžitému přepnutí akčního členu na modelu. Akční prvky a jejich stručnou funkci popisuje tabulka 11.

Tabulka 11: Akční prvky a popis jejich funkce

Obrázek	Funkce
	Ovládá hlavní ventil přívodu prací tekutiny
	Ovládání otáčení bubnu pračky.
	Zapíná čerpadlo výpusti pro odvod prací tekutiny
	Ovládání čerpadla cirkulace okruhem snímače vodivosti

Dále obslužná aplikace obsahuje funkce pro automatické řízení jednoduchých funkcí. Jedná se o funkci napuštění určitého objemu prací tekutiny do bubnu pračky. Objem je zadán do pole vedle tlačítka **Napustit**. Hodnota objemu se zadává s přesností na jedno desetinné místo a je v řídicí jednotce vyhodnocena a omezena na minimální hodnotu 0 litrů a maximální hodnotu 25 litrů.

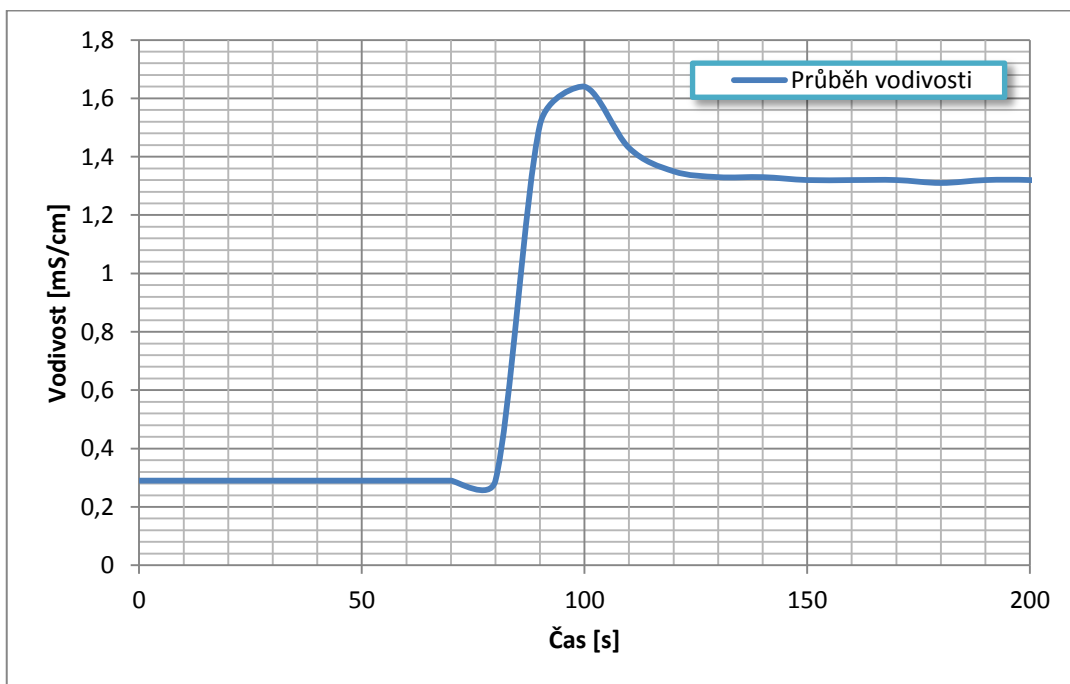
Další funkcí je možnost nastavení konstantního průtoku. Průtok lze nastavit od nuly do sta procent. Vždy záleží na maximální rychlosti průtoku vpusti nebo vypusti.

6.3 Výsledky simulací a měření

Pro vývoj a ověření algoritmu byly mimo jiné použity simulace řízení odsolování a dále výše popsán experimentální model.

6.3.1 Lázněvé praní

Při lázněvé prání nedojde nikdy k úplnému odstranění soli ze vzorku. Buben pračky je napuštěn čistou vodou, do které je vložen vzorek. Ten je pak vypírán bez průtoku čisté vody. Vyrovnání koncentrací ve vzorku a v prací tekutině dojde při ustálení koncentrace na určité hodnotě. V dalším kroku je buben pračky vypuštěn a napuštěn čistou vodou a celý proces se opakuje opět do vyrovnání obou koncentrací. Jedinou výhodou tohoto systému je nižší spotřeba vody. Nevýhodou je mnohem delší čas potřebný pro odsolování a také vznik koncentračních šoků při kontaktu čisté vody a vzorku s vyšší koncentrací soli. Výše popsané vlastnosti názorně zobrazuje obrázek 21.

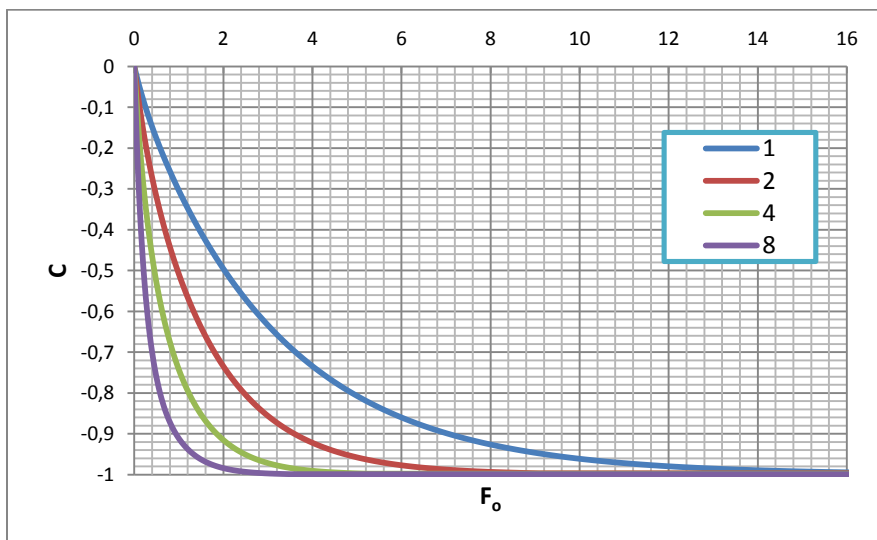


Obr. 21. Koncentrační šok po namočení soli prostoupeného vzorku do čisté vody

6.3.2 Průtočné praní

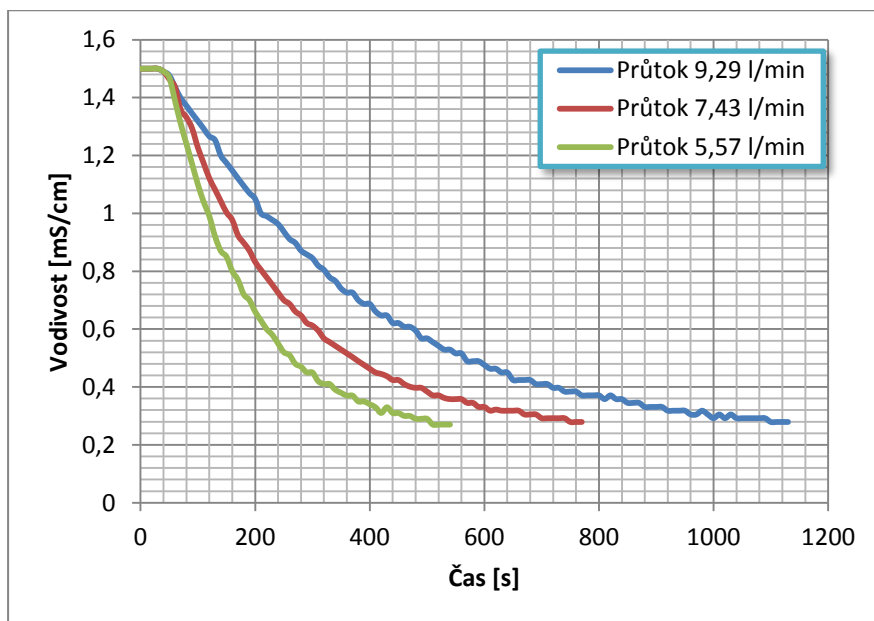
Průběh vodivosti v průtočném systému znázorňuje obrázek 22 (simulace) a obrázek 23 (měření na experimentálním modelu). Koncentrace resp. vodivost při průtoku čisté vody klesá po exponenciální křivce, kde největší pokles je na počátku regulace. Tam také nejvíce hrozí poškození vypíraných kůží koncentračním šokem při rychlé změně koncentrace soli.

Pro odstranění počátečního koncentračního šoku je nutné začít prací proces ve vodě s vyšší koncentrací soli. Nedojde tak k náhlému a velkému koncentračnímu šoku na povrchu kůže. Při pracím procesu se však zvýší objem spotřebované vody. Slanou vodu s vysokou koncentrací soli však lze recyklovat v dalším odsolovacím procesu a tak ušetřit další náklady na odsolování.



Obr. 22 Rychlost odsolení v závislosti na průtoku

Na obrázku 22 jsou průběhy simulací. Odpovídající charakteristiky byly naměřeny také na experimentálním modelu, což dokládá obrázek 23.

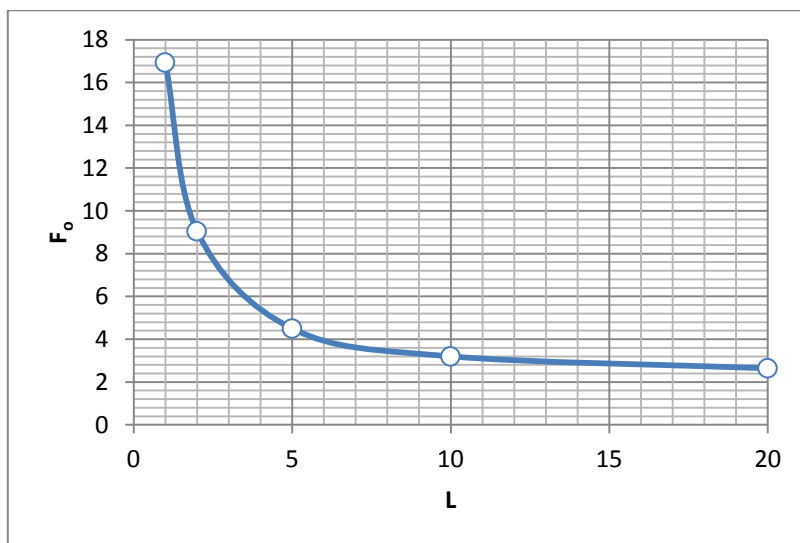


Obr. 23. Přehled průběhu vodivosti pro různé průtoky

Závislost průtoku a celkové doby potřebné pro odsolení znázorňuje obrázek 24. Rychlost průtoku a pokles vodivosti nemá lineární závislost. Čím větší průtok, tím menší rozdíl v rychlosti odsolování. Je tedy zbytečné zvyšovat rychlost průtoku nad určitou hodnotu, neboť efekt je pak minimální. To vše závisí pochopitelně na objemu prací lázně nebo na objemu vypírané kůže.

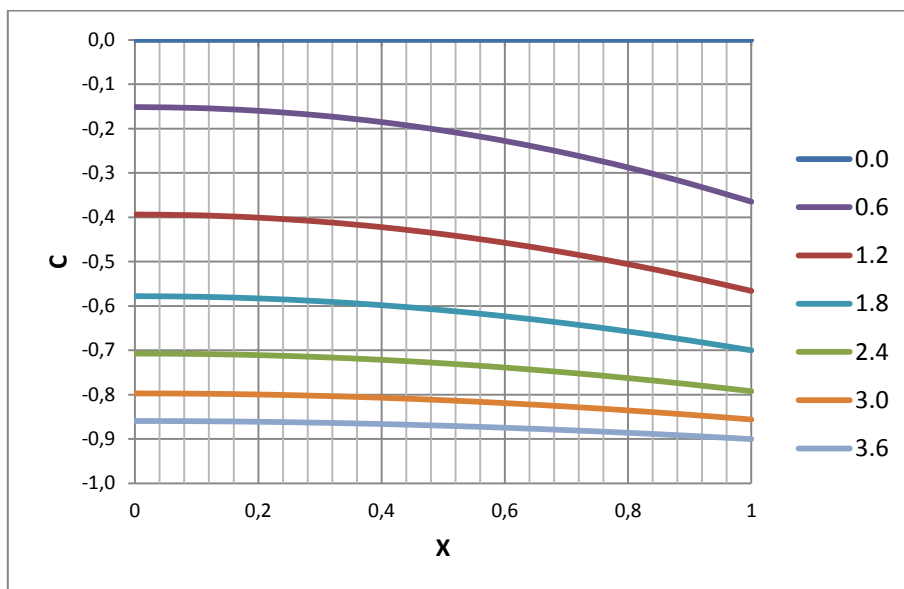
Tabulka 12: Rychlost odsolování pro různé průtoky

Průtok		Doba odsolování		Spotřeba vody [m³]
L	Ṃ [l/min]	F_o	t [hod]	
1	12	16,94	29,41	47,4
2	24	9,05	15,71	50,4
5	60	4,50	7,81	61,5
10	120	3,20	5,56	85,0
20	240	2,64	4,58	138,0



Obr. 24. Závislost doby potřebné pro odsolení v závislosti na průtoku

Tabulka 12 a obrázek 24 odpovídá procesu odsolování kůže v dobré kondici (tj. kůže s difusním koeficientem $D=1.10^{-9}m^2s^{-1}$) o objemu $V=5m^3$, poloviční tloušťce $b=0,0025m$ a poměru prací lázně ku objemu vypírané kůže 1:1 ($Na=1$).



Obr. 25 Průběh koncentrace soli v závislosti na čase v celé šířce kůže

Z obrázku 25 je patrné, jak velký rozdíl v koncentraci může být v průběhu odsolování na povrchu a uvnitř kůže. Na obrázku je maximální rozdíl koncentrace v čase $Fo=0,6$. Tento rozdíl je téměř 0,2. Tento rozdíl může být mnohem větší a závisí na velikosti průtoku. Čím je průtok vyšší, tím je vyšší i rozdíl mezi koncentrací na povrchu a uvnitř kůže (viz tabulka 13).

Tabulka 13 Maximální rozdíly koncentrace uvnitř a na povrchu kůže v závislosti na průtoku

<i>Průtok L</i>	<i>Rozdíl koncentrace C uvnitř a na povrchu</i>
1	0,12582
2	0,21344
5	0,38418
10	0,54354
20	0,70321

Aby byl rozdíl těchto koncentrací v průběhu odsolování co nejmenší, je nutné průtok vhodně řídit. Algoritmus navržený v této práci snižuje rozdíl koncentrací uvnitř a na povrchu kůže a současně optimalizuje spotřebu vody a celkovou rychlost odsolování.

6.3.3 Řízení průtoku v průtočném systému

Řízení průtoku čisté vody navržené v této disertační práci je založeno na udržení gradientu koncentrace soli v lázni. Gradient je nutné zvolit s ohledem na typ kůže a na její vlastnosti, ale také vzhledem k požadované spotřebě vody a čase potřebném k odsolení.

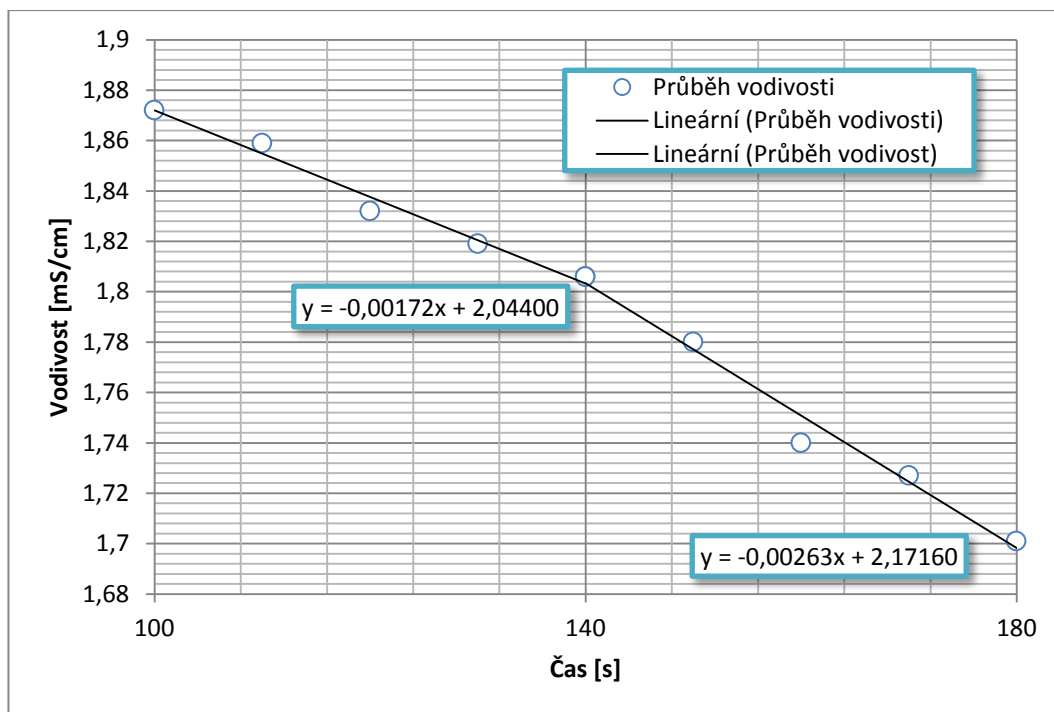
6.3.4 Princip algoritmu

Proces řízení je rozdělen do několika kroků:

1. Napuštění požadovaného objemu prací lázně.
2. Pozastavení potřebné pro:
 - a. úpravu prací lázně: zvýšení koncentrace soli ve vodě.
 - b. vložení kůže do bubny pračky.
3. Ustálení koncentrace soli.
4. Nastavení minimálního průtoku vody do prvního poklesu koncentrace soli v lázni.
5. Výpočet průtoku pro další periodu na základě předchozího chování systému.

6. Krok 5) se opakuje v pravidelných periodách do doby, než dojde k trvalé změně průtoku na maximální hodnotu nebo dokud nebude hodnota koncentrace taková, jaká je v čisté vodě (gradient bude roven nule).

V detailu grafu (Obr. 26) je znázorněn postup výpočtu gradientu z posledních pěti bodů. Proto je nutný krok 4 a 5, díky kterým je možné stanovit další akční zásah. Soustava se totiž chová jako soustava se zpožděním, takže akční zásah se projevuje se zpožděním. Proto je nutné ustálení koncentrace při minimálním průtoku v kroku 5. Je také nutné zvolit vhodnou periodu vzorkování, která musí odpovídat daným podmínkám odsolování a danému systému, který se v reálném provozu zcela jistě bude lišit od použitého experimentálního modelu. Zpoždění systému bude mnohem větší při objemech několika mterů krychlových, proto bude také zvolena přiměřeně větší perioda vzorkování.



Obr. 26. Stanovení směrnice

Předchozí obrázek zobrazuje stanovení gradientu v každé periodě vzorkování. Pro správnou funkci algoritmu je nutné zaznamenávat výstupní veličinu ve čtyřikrát menší periodě než je vzorkovací perioda pro výpočet akčního zásahu.

Při aplikaci algoritmu, lze nastavit několik parametrů, které závisí na provozních podmínkách (objem prací lázně, typ, objem a druh odsolované kůže, požadovaný gradient klesání koncentrace). Všechny tyto parametry lze nastavit v obslužné aplikaci nebo přímo v jádru aplikace. V algoritmu lze nastavit tyto parametry:

1. Nastavení periody vzorkování T
2. Nastavení meze neurčitosti
3. Minimální hodnotu průtoku
4. Požadovaný gradient klesání

Na základě nastavených parametrů lze stanovit také periodu načítání dat vodivosti T_R , která je dána vztahem (6.1).

$$T_R = \frac{T}{4} \quad (6.1)$$

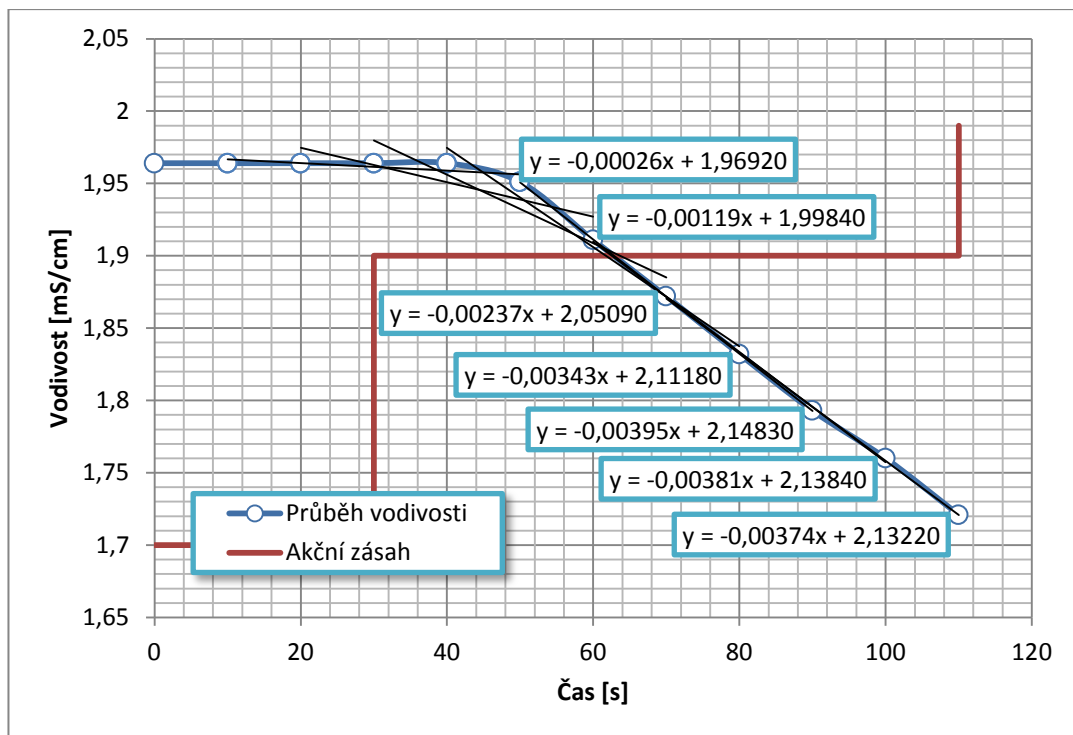
Pro správné nastavení periody vzorkování a periody načítání je nutné nastavit i mez neurčitosti. Při pracím procesu může docházet k chybám měření a odchylkám od ideálního stavu. Například při ustálení systému bude jistě hodnota vodivosti mírně kolísat. Dlouhodobý gradient ustáleného stavu se však bude pohybovat v učitých mezích. Na základě experimentálních dat se osvědčila hodnota $\pm 0,0006$. Pohybuje-li se tedy výstupní veličina (gradient) v hodnotách $\pm 0,0006$, je systém považován za ustálený.

Této meze neurčitosti se využívá pro stanovení periody načítání dat. Při zapnutí minimálního průtoku je klesnutí hodnoty gradientu pod tuto úroveň (v tomto případě pod hodnotu $-0,0006$) považováno za odezvu systému na průtok čisté vody. Periodu vzorkování T pak lze stanovit podle následujícího vztahu.

$$T = \frac{(t_2 - t_1)}{2} \quad (6.2)$$

Kde t_1 je čas spuštění průtoku a t_2 je doba, kdy došlo k poklesu gradientu pod mez neurčitosti. Minimální hodnota průtoku musí být vždy menší než průtok, při kterém se počáteční ustálený stav začne snižovat v požadovaném gradientu. Pokud by byl minimální průtok větší, došlo by tímto průtokem k překročení požadované hodnoty. Je vhodné volit raději nižší počáteční průtok než vyšší. Algoritmus v dalších krocích průtok upraví tak, aby koncentrace v prací lázni klesala v požadovaném gradientu.

Následující obrázek (Obr. 27) zobrazuje princip stanovení optimální periody vzorkování. Nutné je vždy spustit ve čtvrtém kroku minimální akční zásah a vyčkat na ustálení gradientu vodivosti.



Obr. 27. Zobrazení gradientů a jejich ustálení ve čtvrtém kroku regulace

Periodu vzorkování pak lze stanovit ze tří po sobě jdoucích gradientů, jejichž hodnoty se od sebe neliší více než o $\pm 10\%$. Tabulka 14 tento postup názorně zobrazuje.

Tabulka 14: Ustálení gradientů po spuštění minimální hodnoty akčního zásahu

Čas	Gradient	-10%	+10%
50	-0,00026	-0,00023	-0,00029
60	-0,00119	-0,00107	-0,00131
70	-0,00237	-0,00213	-0,00261
80	-0,00343	-0,00309	-0,00377
90	-0,00395	-0,00356	-0,00435
100	-0,00381	-0,00343	-0,00419
110	-0,00374	-0,00337	-0,00411

Nejmenší rozpětí posledních tří gradientů je -0,00356 až -0,00411. Tyto hodnoty jsou v tabulce vyznačeny červeně. Do tohoto intervalu spadají všechny tři poslední hodnoty vyznačeny v tabulce tučně. Minimální akční zásah byl spuštěn v čase $t_1=30s$ (viz Obr. 27). Poslední hodnota gradientu, který současně spadá jako třetí hodnota do stanoveného intervalu, je v čase $t_2=110s$. Požadovanou periodu vzorkování T pak lze stanovit podle následujícího vztahu.

$$T = \frac{(t_2-t_1)}{2} = \frac{(110-30)}{2} = \frac{80}{2} = 40s \quad (6.3)$$

Je však možné stanovit periodu vzorkování předem ručně z odezvy systému na minimální průtok a tuto hodnotu uložit do programu jako výchozí. Pak není nutné automatické počítání periody vzorkování a periody načítání dat.

Výpočet akčního zásahu je závislý na předchozí hodnotě akčního zásahu a velikosti aktuálního gradientu. Akční zásah je počítán dle následujícího vztahu:

$$u_k = \frac{w \cdot u_{k-1}}{y_k} \cdot K \quad (6.4)$$

kde w je žádaná hodnota gradientu, u_k je aktuální akční zásah, u_{k-1} je předchozí akční zásah, y_k je aktuální hodnota gradientu spočtená z pěti předchozích hodnot vodivosti a K je koeficient zesílení.

Koeficient zesílení K se pohybuje mezi hodnotou 1-1,6. Koeficient lze nastavit pevně na optimální hodnotu 1,2, nebo lze tento koeficient stanovit na základě parametrů procesu. Převedeme-li veškeré parametry soustavy do bezrozměrných veličin (viz kapitola 4.3.1) je možné koeficient stanovit dle vztahu (6.5):

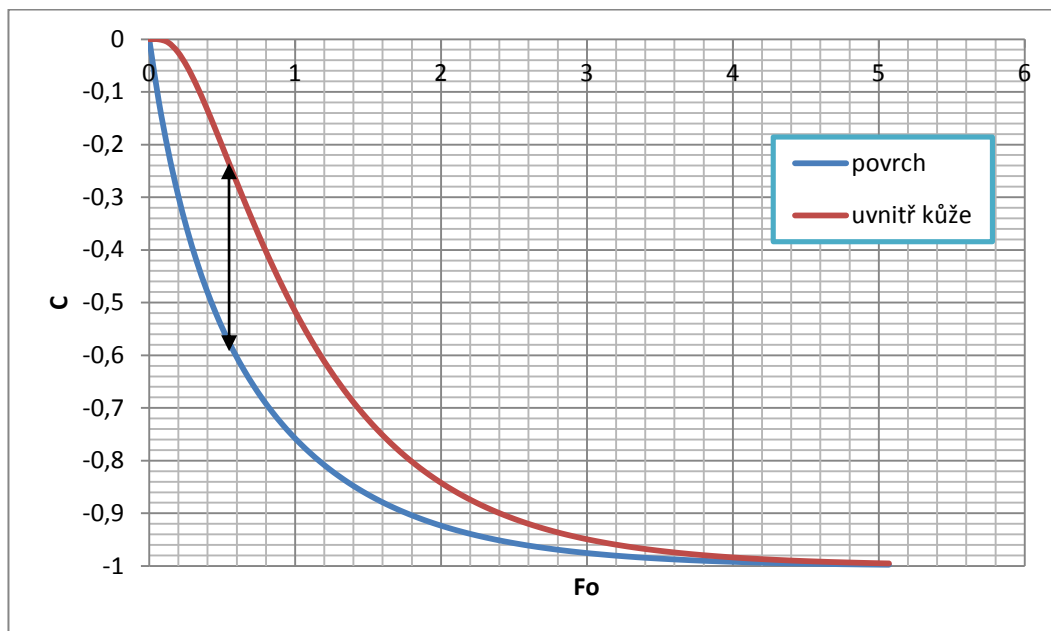
$$K = 8.75 \cdot w^2 - 5.5 \cdot w + 0.0625 \quad (6.5)$$

Kde w je požadovaný gradient v závislosti na bezrozměrných veličinách.

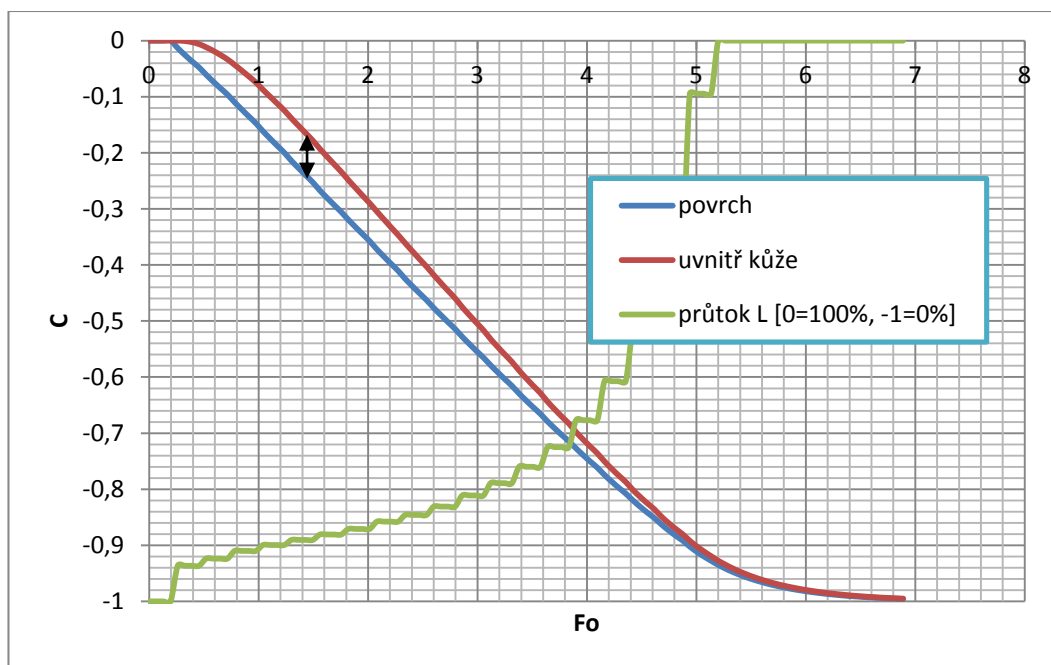
6.3.5 Simulace

Algoritmus byl ověřen na matematickém modelu a jeho simulaci. Algoritmus byl v tomto případě použit pro řízení veličin v bezrozměrném tvaru (viz kapitola 4.3.1). Matematický model umožňuje nahlédnout i do nitra vzorku a sledovat chování přímo uvnitř

kůže. Na obrázku 28 je znázorněn průběh odsolení při konstantním průtoku s koncentrací na povrchu a uvnitř kůže.



Obr. 28 Průběh koncentrace v čase pro $L=4.2$



Obr. 29 Řízení na požadovanou hodnotu $w=-0,2$

Z obrázku 28 je patrný velký pokles koncentrace v počátcích odsolování. Největší rozdíl koncentrace $\Delta C=0,347$ je vyznačen šipkami. Další rozdíly uvádí tabulka 13. Použitím navrženého algoritmu a řízením na požadovanou hodnotu gradientu $-0,2$ (viz Obr. 29) lze docílit výrazněji menšího rozdílu $\Delta C=0,075$ se stejnou spotřebou vody nicméně za cenu delší doby odsolení. V tabulce 15 je porovnání dvou typů řízení s alternativním průběhem pro konstantní průtok.

Tabulka 15 Porovnání průběhu s konstantním průtokem a řízeného průběhu

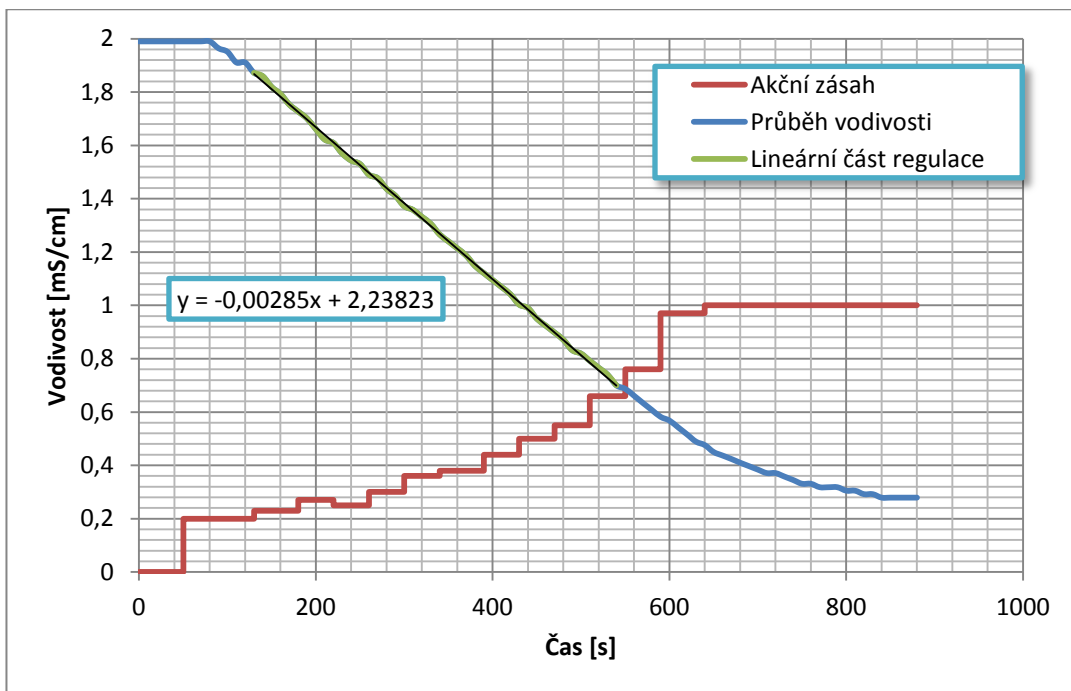
<i>Průtok</i>		<i>Spotřeba vody [m3]</i>	<i>Celkový čas</i>		<i>ΔC</i>	<i>Gradient</i>
<i>L</i>	<i>\dot{V}[l/min]</i>		<i>Fo</i>	<i>t [hod]</i>		
2.8	67.2	53	6.8	11.8	0.269	-
4.2	100.8	58	5.1	8.8	0.347	-
0.45-7.08	10.8-169.9	58	6.8	11.8	0.075	-0.2
0.80-7.08	19.2-169.9	62	5.1	8.8	0.129	-0.34

Z tabulky je patrné, že výrazného snížení rozdílu koncentrací uvnitř a na povrchu kůže lze dosáhnout buď vyšší spotřebou vody, nebo delším časem odsolování.

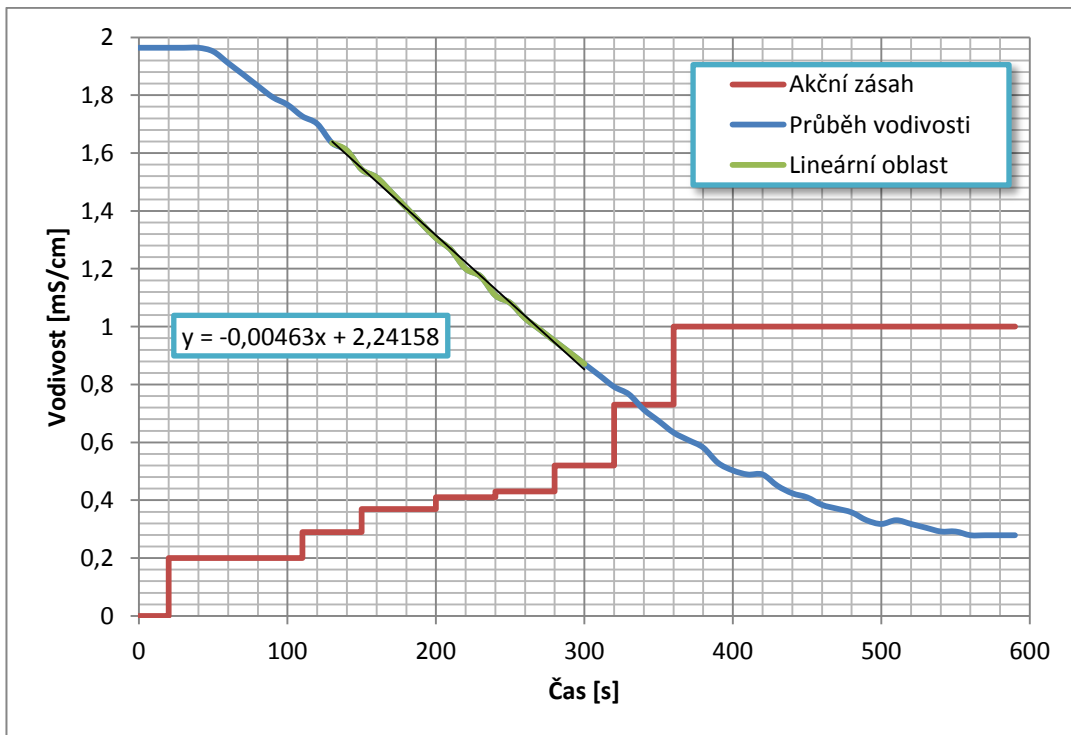
6.3.6 Měření

Ve všech grafech, kde je zobrazen akční zásah, je tato hodnota zobrazena v procentech (0=0% a hodnota 1=100%). Procentuální hodnoty jsou počítány pro maximální průtok systémem v experimentálním modelu, kde tato maximální hodnota činí 9,29 l/min.

Na obrázku (Obr. 30) je ukázka řízení procesu pro požadovaný gradient $-0,003$. Proces řízení se tomuto gradientu přiblížil v lineární části regulace na hodnotu $-0,00285$, což dokládá regresní přímka v této oblasti grafu a její rovnice.



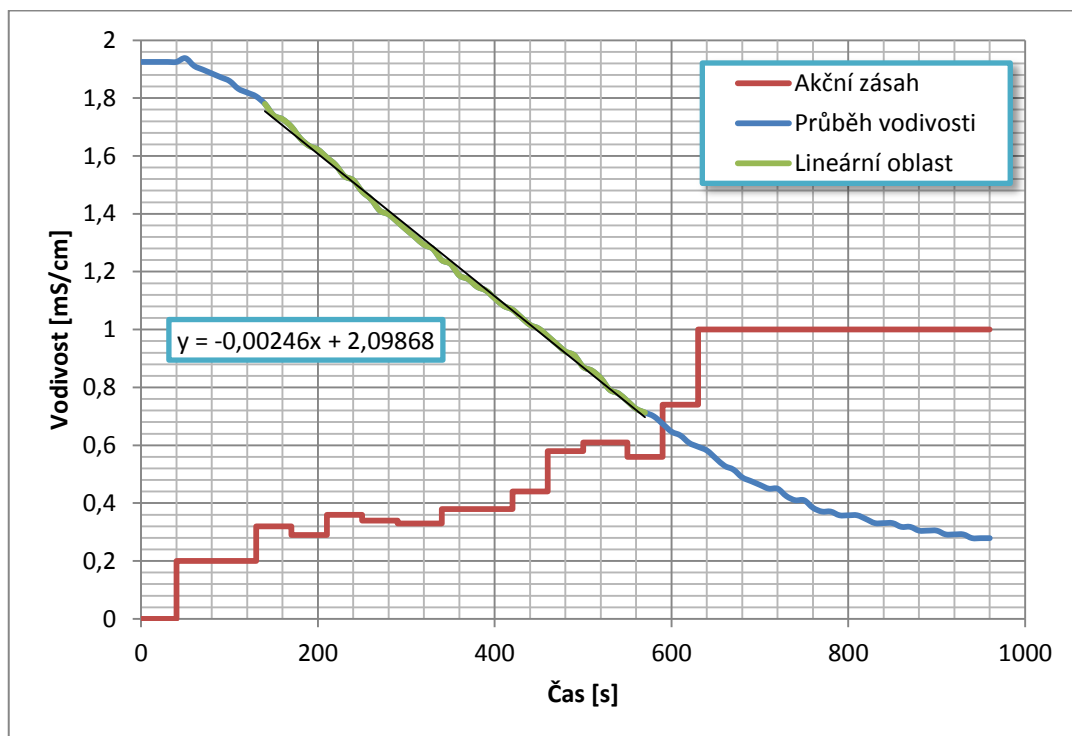
Obr. 30. Průběh řízení pro požadovaný gradient $-0,003$



Obr. 31. Průběh regulace na požadovaný gradient $-0,0049$

Na obrázku (Obr. 31) je ukázka regulace na požadovaný gradient $-0,0049$. Regresní přímka a rovnice ukazuje, že byla dosažena hodnota $-0,00463$. Regulace probíhala v objemu lázni 15 litrů. Je také patrné, že je dobré volit minimální hodnotu průtoku přiměřeně k požadovanému průběhu regulace. Z grafu je patrný zlom, kdy se původní rychlost $1,86$ l/min změnila na průtok $2,69$ l/min. Pro optimální průběh regulace by měl tento prvotní rozdíl být minimální. To ale závisí na vlastnostech regulovaného systému. Pro algoritmus jako takový to vliv nemá žádný.

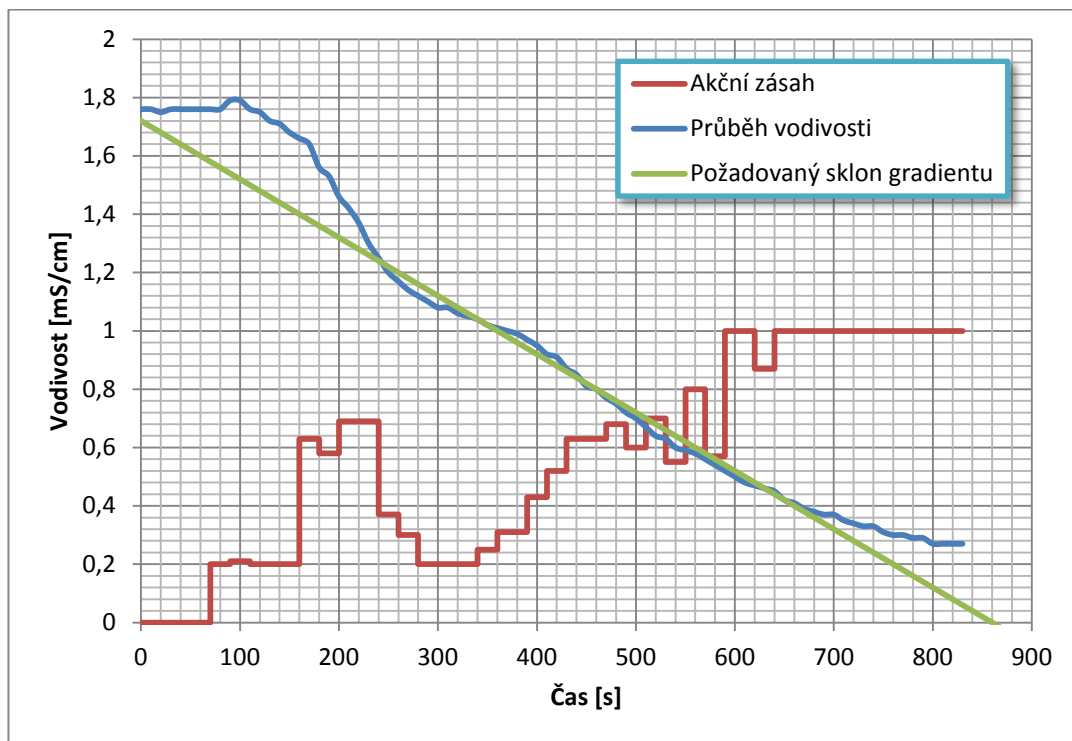
Poslední příklad regulace ukazuje řízení gradientu na hodnotu $-0,0025$ v práci lázni o objemu 25 litrů. Regresní přímka lineární oblasti průběhu ukazuje dosaženou hodnotu regulace $-0,00246$, což je $98,4\%$ žádané hodnoty.



Obr. 32. Regulace na hodnotu gradientu $-0,0025$

Výsledky řízení byly provnány také s využitím adaptivního řízení s průběžnou identifikací. Výsledky však ukazují, že tento způsob řízení nedokáže zareagovat dostatečně rychle na prvotní impuls průtoku. Dochází tak k mnohem většímu překmitu, který je znázorněn

na dalším obrázku. Po dostatečných krocích průběžné identifikace se systém ustálí, ale za cenu radikálního přesahu požadovného gradientu klesání.



Obr. 33. Řízení nároku pomocí adaptivního regulátoru druhého řádu

Všechny experimenty byly prováděny pouze pro ověření funkce algoritmu řízení. Experimentální model neumožňoval měření vysokých koncentrací solí, které se objevují v reálném provozu. Také možnosti regulace průtoku byly omezené. Nicméně pro ověření funkčnosti algoritmu tento model postačoval. V reálném provozu jsou pouze hodnoty regulovaných veličin větší. Doba námoku a odsolování se pohybuje v řádu desítek hodin a objemy prací lázně v řádu kubických metrů vody. Nicméně charakteristika poklesu vodivosti prací lázně je stejná jako v použitém experimentálním modelu. Na vliv funkce algoritmu tyto skutečnosti nemají vliv, neboť algoritmus pracuje na základě předchozího chování systému.

7 VYUŽITELNOST VÝSLEDKŮ ŘEŠENÍ

Řešení, které nabízí tato disertační práce je využitelné v kožedělném průmyslu. Přináší výhodu optimalizace procesu tak, aby byla zachována kvalita odsolovaných kůží a současně, aby byly náklady na tento proces minimální. Jedná se o nový způsob regulace, který bere v úvahu kvantitativní popis procesu. Zohledňuje vnitřní děje probíhající v kůži při odsolování. Algoritmus navržený v této disertační práci je řešením, které lze použít pro celou řadu případů. Je nutné stanovit počáteční parametry řídicího procesu a algoritmus zajistí požadované chování procesu odsolení. Algoritmus není závislý na objemu prací lázně, na hodnotě vodivosti ani na množství vypírané kůže.

V běžné praxi se pohybuje vodivost respektive koncentrace soli ve vyšších hodnotách, než byly řešeny v experimentálním modelu této disertační práci. Algoritmus však zvládá libovolný gradient vyžadovaný technologickým procesem, což dokazují simulace provedené pro běžné provozní podmínky.

Algoritmus lze aplikovat na libovolný systém, u kterého je žádoucí změna chování z exponenciálního průběhu na lineární. Stejně tak i řídicí jednotku lze využít pro jiné účely a systémy. Reservované vstupy a výstupy řídicí jednotky umožňují připojení dalších akčních prvků, které jsou použity v reálném provozu.

8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrzení algoritmu řízení odsolování surových kůží průtočným propíráním v čisté vodě. Řešení vychází z matematického modelu průtočného systému, který byl popsán v teoretické části. Základem navrženého způsobu odsolování je změna celého postupu, kdy není kůže ponořena do čisté vody, ale do vody s vyšší koncentrací soli. Už tato samotná změna počátečních podmínek zamezí vzniku koncentračního šoku, který nastává při ponoření solí prosycené kůže do čisté vody. Tento koncentrační šok vyvolává velký osmotický tlak, který porušuje jemnou povrchovou strukturu kůže, která se skládá z jemných vláken. Zatímco tlustší a odolnější hovězí kůže tak netrpí, tak pro jemnější a tenší kůže jako jsou teletiny, koziny nebo ovčiny je vliv vysokého osmotického tlaku výrazný. Zpřetrháním těchto jemných vláken ztrácí kůže své nenahraditelné vlastnosti, je snížena jejich kvalita a také cena.

Navržený algoritmus tedy vychází z kvantitativního popisu vnitřních dějů, které probíhají v kůži při odsolování. Cílem bylo dosažení pozvolného a hlavně v celé šířce vzorku kůže rovnoměrného klesání koncentrace. To zajišťuje šetrný postup při odsolování, při kterém nedochází k nežádoucím účinkům na strukturu kůže. V rámci disertační práce byl navržen algoritmus a vytvořeno experimentální zařízení, které demonstruje tento proces při požadovaných vlastnostech. Nastavitelnou hodnotou algoritmu je požadovaný gradient, podle kterého klesá koncentrace solí v kůži. Původně exponenciální průběh s velkými rozdíly koncentrací uvnitř a na povrchu kůže je změněn v hladký lineární průběh s minimálními rozdíly koncentrací uvnitř vzorku. Koncentrace tak klesá pozvolna a nevytváří žádné koncentrační šoky ani jiné nežádoucí vlivy, které mohou při odsolování ovlivňovat kvalitu kůže.

V rámci disertační práce byla také vytvořena řídicí jednotka, která umožňuje řízení experimentálního modelu. Modelem je v tomto případě upravená automatická pračka, která byla doplněna o cirkulační okruh s průtokovým čidlem vodivosti. Na vstupu a výstupu jsou instalovány průtokoměry, které sledují spotřebu vody a umožňují udržovat konstantní objem vody v bubnu pračky. Samotná řídicí jednotka je vybavena šestnácti bitovým mikroprocesorem Freescale MC9S12NE64. Tato řídicí jednotka ovládá celý model a řídí odsolování na základě požadovaných parametrů odsolování. Tyto parametry lze nastavit pevně přímo v mikroprocesoru nebo pomocí obslužné flash aplikace, která je uložena na webovém serveru v paměti

mikropočítače. Řídicí jednotka je vybavena ethernetovým rozhraním, které umožňuje přístup k obslužné aplikaci přes libovolný internetový prohlížeč na PC.

Řídicí jednotka má také řadu rezervovaných vstupů a výstupů, které lze využít pro další akční prvky. Záleží pouze na požadovaném rozsahu a přesnosti měření použitých přístrojů. Lze ji tedy využít i k jiným podobným úlohám.

Z matematického modelu vyplývá, že lineární průběh úbytku koncentrace soli v kůži výrazně snižuje rozdíly koncentrací soli v celé šířce kůže. Značného zmenšení rozdílů koncentrací lze dosáhnout za cenu mírného zvýšení času nebo spotřeby čisté vody. Vzhledem k tomu, že odsolovací proces začíná ponořením kůži do vody s vysokou koncentrací soli, je možné pro tuto počáteční lázeň využít odpadní vodu z předchozích odsolovacích procesů, ze kterých odchází voda právě s vyšší koncentrací soli. Tím lze ušetřit dodatečné náklady na spotřebu čisté vody. Tento způsob odsolování je co do spotřeby vody hospodárnější než běžné průtočné praní, při kterém se na počátku ponoří kůže do čisté vody.

9 PUBLIKAČNÍ AKTIVITY

- DANIELEWSKA-TULECKA, A., GRODECKA, K., DOLEŽEL, P., WILD, F., SIGURDARSON, S. E. (2008). Interoperability In Open Learning Environment – Solutions For Moodle. *MoodleMoot Conference*. Alpen-Adria-University, Klagenfurt 2008.
- DOLEŽEL, P. (2003). *Připojení přístroje pro seřizování nástrojů k PC*. Diplomová práce. Zlín 2003.
- DOLEŽEL, P., VAŠEK, V., VAŠEK, L. (2004). Improvement of the Measuring Process in CIM Systems. *Annals of DAAAM for 2004 & Proceedings*. Vienna 2004. pp. 97-98. ISBN 3-901509-42-9
- DOLEŽEL, P., VAŠEK, V. (2005). Optimalizace modulů pro M68HC08. *Proceedings of XXXth Seminary ASR'05*, Ostrava, 2005, ISBN 80-248-0774-2
- DOLEŽEL, P., VAŠEK, V. (2005). Utilization of USB in Measurement Techniques. *Proceedings of 6th ICCO*. 2005. pp. 203-206. ISBN 963-661-645-0
- DOLEŽEL, P., VAŠEK, V. (2005). Modules for Adaptive Process Control for the M68HC08 Microcontroller. *Annals of DAAAM for 2005 & Proceedings*. Vienna 2005. ISBN 3-901509-46-1
- DOLEŽEL, P., VAŠEK, V. (2006). Control Algorithms for Microcontrollers. *Proceedings of 7th ICCO*. Ostrava 2006. pp. 117-120. ISBN 80-248-1066-2
- DOLEŽEL, P., VAŠEK, V. (2006). Utilization of Microcontrollers in Process Control. *Trends in the Development of Machinery and Associated Technology TMT 2006 Proceedings*. Zenica 2006. pp. 1451-1454. ISBN 9958-617-30-7
- DOLEŽEL, P., VAŠEK, V. (2006). Control Algorithms for Microcontrollers. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava*. Ostrava 2006. ISBN 80-248-1211-8
- DOLEŽEL, P., DULÍK, T. (2008). Data Mining Service for OAIster Digital Library. *In Proceedings of the IADIS International Conference e-Learning 2008 Amsterdam*. The Netherlands IADIS Press 2008. ISBN 978-972-8924-58-4.

DOLEŽEL, P., VAŠEK, V., KOLOMAZNÍK, K., JANÁČOVÁ, D. (2011). Computer Control of Soaking Process. *Recent Researches in Communications, Automation, Signal Processing, Nanotechnology, Astronomy & Nuclear Physics*. Cambridge, UK, 2011. ISBN 978-960-474-276-9

DOLEŽEL, P., VAŠEK, V., KOLOMAZNÍK, K., JANÁČOVÁ, D. (2011). Microcontroller Utilization in Soaking Process Control. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*. V tisku

Výzkumné zprávy:

DOLEŽEL, P. spoluředitel VAŠEK, V. (2005) Knihovna pro práci s maticemi pro mikropočítač Motorola. *FRVŠ – 2738/2005/G1*.

Mimo výše popsaných konferenčních příspěvků jsem uveden jako ***vedoucí bakalářské práce:***

DOLEŽEL, Pavel. (2006). Knihovna pro práci s maticemi pro mikropočítač Motorola

HROZNÍČEK, Marek. (2006). Software pro výdejnu nářadí.

10 LITERATURA

- AXELSON, J. (2003). *Embedded Ethernet and Internet Complete*. Lakeview Research LLC, Madison, 2003. ISBN 1-931448-00-0
- BAKER, C. R. (2002). *An Introductory Guide to Flow Measurement – Second Edition*. The Cromwell Press, Suffolk 2002. ISBN 1-86058-348-2
- BIRD, J., ROSS, C. (2002). *Mechanical Engineering Principles*. Oxford 2002. ISBN 0-7506-5228-4
- BLAŽEJ, A., kolektiv autorů. (1984). *Technologie kůže a kožešin*. Praha 1984
- BRIŠ, P. (1989). *Kožedělná výroba*. Brno 1989. ISBN 80-214-1048-5
- BOBÁL, V., BÖHM, J., PROKOP, R., FESSL, J. (1999). *Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů*. VUT Brno 1999. ISBN 80-214-1299-2
- COLNARIČ, M., VERBER, D., HALANG, W. A. (2008). *Distributed Embedded Control Systems*. Springer, 2008. ISBN 978-1-84800-052-0
- COVINGTON, D. A., (2009). *Tanning Chemistry: The Science of Leather*. RSC Publishing, Cambridge, 2009. ISBN 978-0-85404-170-1
- CRANK, J. *The Mathematics of Diffusion*, 2nd Ed. Clarendon Press, Oxford 1977. ISBN 0-19-853411-6.
- DOLEŽEL, P., VAŠEK, V. (2005). Utilization of USB in Measurement Techniques. *Proceedings of 6th ICCO*. 2005. pp. ISBN
- DOLEŽEL, P., VAŠEK, V. (2006). Utilization of Microcontrollers in Process Control. *Trends in the Development of Machinery and Associated Technology TMT 2006 Proceedings*. Zenica 2006. pp. 1451-1454. ISBN 9958-617-30-7
- DOSTÁLEK, P., VAŠEK, V. (2004). *Programová přenositelnost mezi 8-bitovými mikropočítači Motorola*. Říp 2004
- FLORIÁNOVÁ, O. (2005) *Kůže – zpracování a výroba*. Praha 2005. ISBN 80-247-1091-9
- FUKA, J., JENČÍK, J. (1967). *Měření složení látek v automatizaci*. Nakladatelství technické literatury, Praha 1967

- HELD, G. (2005). *Ethernet Networks: Design, Implementation, Operation and Management - Fourth Edition*. Wiley, West Sussex, 2005. ISBN 0-470-84476-0
- HRUŠKA, F. (2000). *Projektování systémů integrované automatizace*. VUT v Brně, Zlín 2000. ISBN 80-214-1653-1
- KAINKA, B., BERNDT, H.J. (2000). *Využití rozhraní PC pod Windows*. 1. vyd. Ostrava-Plesná: HEL, 2000. ISBN 80-86167-13-5
- KAUL, S. N., NANDY, T., SZPYRKOWICZ, L., GAUTAM, A., KHANNA, D. R. (2005). *Waste Water Management With Special Reference to Tanneries*. Discovery Publishing House, New Delhi, 2005. ISBN 81-7141-918-6
- KHAYLOVA, N., KÁRNÝ, M., NEDOMA, P., BŮCHA, J. (2002). *Apriorní znalost pro počítačový návrh adaptivního řízení*. Automa, 2002. Číslo 10, str. 45-49.
- KITE, M., THOMSON, R. (2006). *Conservation of Leather and Related Materials*. Elsevier, Oxford, 2006. ISBN-13: 978-0-7506-4881-3
- KOLOMAZNÍK, K. *Modelování zpracovatelských procesů*. Brno 1990. ISBN 80-214-0114-1
- KOLOMAZNÍK, K., PROKOPOVÁ, Z., VAŠEK, V., BAILEY, D. G. (2006) Development of a Control Algorithm for the Optimized Soaking of Cured Hádes. *The Journal of the American Leather Chemists Association*. Volume 101/9, 2006, pages 309-345.
- KRISHANAMOORTHY, S., SIVAKUMAR, V., SARAVANAN, K., SRIRAM PRABHU, T. V. (2009). Treatment and Reuse of Tannery Waste Water by Embedded System. *Modern Applied Science*. Vol. 3, No. 1, 2009
- LEDIN, J. (2004). *Embedded Control Systems in C/C++*. CMP Books, 2004. ISBN 1-57820-127-6
- MINASKI, M. (2002). *Velký průvodce hardwarem*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing a.s., 2002. ISBN 80-247-0273-8
- MORTON, D. TODD. (2001). *Embedded Microcontrollers*. Prentice Hall, New Jersey. 2001. ISBN 0-13-907577-1.
- PACK, DANIEL J., BARRETT, STEVEN F. (2002). *68HC12 Microcontroller – Theory and Applications*. Prentice Hall, New Jersey, 2002. ISBN 0-13-033776-5.

- PASETTI, A. (2002). *Software Frameworks and Embedded Control Systems*. Springer, 2002. ISBN 3-540-43189-6
- ORHON, D., BABUNA, F. G., KARAHAN, O. (2009). *Industrial Wastewater Treatment by Activated Sludge*. IWA Publishing, London, 2009. ISBN 1843391449
- TAO, G. (2003). *Adaptive Control Design and Analysis*. Wiley, New Jersey, 2003. ISBN 0-471-27452-6
- WEISBERG, S. (2005). *Applied Linear Regression: Third Edition*. Wiley-Interscience, Minneapolis, 2005. ISBN 0-471-66379-4
- YAN, X., SU, X. (2009). *Linear Regression Analysis: Theory and Computing*. World Scientific, Singapore, 2009. ISBN 978-981-283-410-2

ŽIVOTOPIS

Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Petr Doležel, Ing.

Datum narození: 12. 4. 1980

Vzdělání:

1994 – 1998 Střední průmyslová škola E. Beneše Břeclav ukončeno maturitní zkouškou

1998 – 2003 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně (obor automatizace a řídicí technika)
ukončeno státní zkouškou

2003 → Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, doktorské studium (obor technická
kybernetika)

Pracovní zkušenosti:

2001-2007 Zakázková tvorba a administrace webových stránek

2003-2006 Vývoj obslužného softwaru pro seřizovací stroj v Tajmac-ZPS

2005-2006 UTB ve Zlíně, VPP na výzkumném záměru (implementace regulančních
algoritmů pro mikropočítače)

2006-2008 UTB ve Zlíně, HPP na sedmém rámcovém projektu evropské unie (zaměření
na e-learningové systémy)

2008-2011 Ecommerce CZ, a.s., Staré Město u UH, vývojář webových aplikací

2011 → NextData, s.r.o., Staré Město u UH, .NET vývojář

Znalost cizích jazyků:

anglický jazyk – aktivní znalost slovem i písmem

německý jazyk – pasivně

PŘÍLOHY

Příloha A: Experimentální zařízení – upravená automatická pračka

Příloha B: Schéma základní desky řídicí jednotky

Příloha C: Řídicí jednotka

Příloha A: Experimentální zařízení – upravená automatická pračka



Příloha C: Řídicí jednotka

