

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
FAKULTA CHEMICKÉJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE

Evidenčné číslo: FCHPT-11035-115961

Experimentálna prevádzka membránového procesu

BAKALÁRSKA PRÁCA

2024

Jakub Gaborčík

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

**FAKULTA CHEMICKEJ A POTRAVINÁRSKEJ
TECHNOLÓGIE**

Evidenčné číslo: FCHPT-11035-115961

Experimentálna prevádzka membránového procesu

BAKALÁRSKA PRÁCA

Študijný program: chémia, medicínska chémia a chemické materiály
Študijný odbor: chemické inžinierstvo a technológie, chémia
Školiace pracovisko: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov
Vedúci práce: doc. Ing. Radoslav Paulen, PhD.

2024

Jakub Gaborčík



ZADANIE BAKALÁRSKEJ PRÁCE

Študent: **Jakub Gaborčík**
ID študenta: 115961
Študijný program: chémia, medicínska chémia a chemické materiály
Kombinácia študijných odborov: chemické inžinierstvo a technológie, chémia
Vedúci práce: doc. Ing. Radoslav Paulen, PhD.
Vedúci pracoviska: doc. Ing. Martin Klaučo, PhD.
Miesto vypracovania: Oddelenie informatizácie a riadenia procesov FCHPT STU

Názov práce: **Experimentálna prevádzka membránového procesu**

Jazyk, v ktorom sa práca vypracuje: slovenský jazyk

Špecifikácia zadania:

Membránová separácia je jedným z najmodernejších a najrentabilnejších separačných procesov v chemickom a biochemickom priemysle. Cieľom tohto projektu je experimentálna prevádzka laboratórneho zariadenia na membránovú separáciu. Medzi čiastkové ciele patrí návrh regulátorov pre riadenie cezmembránového tlaku a teploty separovaného roztoku. Takisto bude študovaná možnosť optimálnej prevádzky vsádzkového procesu filtrácie.

Zoznam odbornej literatúry:

- ŠATURA, Lukáš; PAULEN, Radoslav. *Modelling and Optimisation of Membrane Process Operation*. Bakalárska práca. 2018.
- PAULEN, Radoslav; FIKAR, Miroslav. *Optimal Operation of Batch Membrane Processes*. Cham: Springer, 2016. 158 s. ISBN 978-3-319-20474-1.
- MULDER, Marcel. *Basic Principles of Membrane Technology*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1996. 564 s. ISBN 0-7923-4248-8.

Termín odovzdania bakalárskej práce: 05. 05. 2024
Dátum schválenia zadania bakalárskej práce: 10. 04. 2024
Zadanie bakalárskej práce schválil: doc. Ing. Dana Dvoranová, PhD. – garantka študijného programu

Podakovanie

Mojej mame, otcovi a bratovi. Za to, že aj keď som sa k nim nie vždy správal najlepšie, tak oni pri mne vždy stáli. Ing. Monike Krajčijovej, vďaka ktorej som sa dostal k prírodným vedám. Ing. Daniele Čekovskej, vďaka ktorej som sa rozhodol pre vysokoškolské štúdium chémie. A v neposlednom rade môjmu školiteľovi, doc. Ing. Radoslavovi Paulenovi, PhD., ktorý ma ako prvý zasvätil do sveta automatizácie a informatizácie.

Abstrakt

Procesy súvisiace s membránovou filtráciou a reverznou osmózou priniesli do priemyselného sveta veľké zmeny, no napriek tomu nie je ich opis stále dostatočný, a tak vzniká potreba skúmať a zdokonaľovať ich. Cieľom tejto práce je prispieť k pokroku v tejto oblasti. Ako sme zistili, vďaka teoretickým základom týkajúcich sa týchto pojmov a ich následným prevedením do praxe na skutočnej laboratórnej membránovej stanici dokážeme konkrétne a jednoducho určiť závislosť veličín merateľných pri týchto procesoch od jednotlivých vstupov a následne ich aj riadiť. Naším konkrétnym záujmom boli merané teploty a tlaky, pre ktoré sme nelineárnou regresiou stanovili prenosové funkcie a následne pre ne navrhli a otestovali rôzne proporcionálno-integračné regulátory. Tieto výsledky možno využiť prakticky pri priemyselne využívaných membránových procesoch alebo pre ďalšie podrobnejšie skúmanie.

Kľúčové slová: membránový proces, reverzná osmóza, modelovanie, riadenie procesov

Abstract

Processes that are connected to membrane filtration and reverse osmosis have brought essential changes to the world of industry, but instead of that their descriptions are still not sufficient, so there is always need for their study improvement. Goal of this thesis is to contribute to the progress in this field. As we found out, because of theoretical foundations related to these concepts and their practical usage in real laboratory membrane station we can specifically and simply determine relations between measurable quantities of these processes and various entries, and then to control them. Our concrete interests were measured temperatures and pressures, for which we found transfer functions by nonlinear regression and next we schemed and tested different proportional and integral controllers. These conclusions can be used practically for industrial membrane processes or for next more-detailed research.

Keywords: membrane process; reverse osmosis; modelling; process management

Obsah

Podakovanie	iii
Abstrakt	v
Abstract	vii
1 Úvod	1
2 Teoretická časť	3
2.1 Reverzná osmóza	3
2.2 Opis a riadenie lineárnych systémov 1. rádu	6
2.2.1 Prenosové a prechodové funkcie	6
2.2.2 Spätnoväzbové riadenie	8
3 Metodológia	11
3.1 Membránová stanica	11
3.1.1 Používané súčasti	11
3.1.2 Spotreba a výkon čerpadla	12
3.2 MATLAB a simulačné prostredie Simulink	15
3.3 Nelineárna regresia pomocou Riešiteľa	15

4 Praktická časť	17
4.1 Príprava zariadenia na experimenty	17
4.1.1 Postup čistenia membrány	17
4.1.2 Vyhodnotenie účinnosti čistenia	19
4.2 Skokové zmeny	21
4.2.1 Pokus V1	21
4.2.2 Pokus V23	22
4.2.3 Pokus Čerpadlo	25
4.3 Zisťovanie parametrov prenosových funkcií	30
4.4 Návrh regulátorov	34
4.4.1 Testovanie v simulačnom prostredí	36
4.4.2 Testovanie na skutočnom zariadení	37
4.4.3 Experimentovanie s proporcionálnou zložkou regulátorov	41
4.5 Vplyv otvorenia V1 a otáčok čerpadla na spotrebu elektrickej energie	42
5 Záver	47
Literatúra	49

Zoznam obrázkov

2.1	Schématické znázornenie usporiadania separácie priečnym tokom (cross-flow) a normálnej filtrácie (dead-end)	4
2.2	Prehľad molekúl v tlakových membránových procesoch	5
2.3	Konkrétne znázornenie oddeľovacej schopnosti jednotlivých tlakových membránových procesov	5
2.4	Príklady prechodových charakteristík pre lineárne systémy 1. rádu	8
2.5	Schéma spätnoväzbového riadenia s veličinami v klasickom a Laplaceovom tvare	9
3.1	Zariadenie na úpravu kvapalín reverznou osmózou SUPER RO, typ BM 30	12
3.2	Priložená technická schéma používaného zariadenia	13
3.3	Softvérové užívateľské rozhranie zariadenia	14
3.4	Modifikované užívateľské rozhranie zariadenia používané na našej fakulte	14
3.5	Všeobecný schématický postup používania Riešiteľa pre nelineárnu regresiu	16
4.1	Grafy časovej závislosti počas pokusu V1: a) otvorenia ventilu V1, b) tlaku vody v nádrži, c) tlaku retentátu, d) transmembránového tlaku a e) objemového prietoku permeátu	23
4.2	Grafy časovej závislosti počas pokusu V1: f) objemového prietoku retentátu, g) konduktivity permeátu, h) konduktivity retentátu, i) teploty permeátu a j) teploty retentátu	24

4.3	Grafy časovej závislosti počas pokusu V23: a) otvorenia ventilu V23, b) tlaku vody v nádrži, c) tlaku renetátu, d) transmembránového tlaku a e) objemového prietoku permeátu	26
4.4	Grafy časovej závislosti počas pokusu V23: f) objemového prietoku renetátu, g) konduktivity permeátu, h) konduktivity renetátu, i) teploty permeátu a j) teploty renetátu	27
4.5	Grafy časovej závislosti počas pokusu Čerpadlo: a) frekvencie čerpadla, b) tlaku vody v nádrži, c) tlaku renetátu, d) transmembránového tlaku a e) objemového prietoku permeátu	28
4.6	Grafy časovej závislosti počas pokusu Čerpadlo: f) objemového prietoku renetátu, g) konduktivity permeátu, h) konduktivity renetátu, i) teploty permeátu a j) teploty renetátu	29
4.7	Výsledné prechodové charakteristiky funkcií lineárneho systému prvého rádu pre tlakovú zmenu ventilom V1	33
4.8	Výsledné prechodové charakteristiky funkcií lineárneho systému prvého rádu pre teplotnú zmenu ventilom V23	35
4.9	Schéma regulátora v programe Simulink	36
4.10	Grafické závislosti transmembránového tlaku a otvorenia V1 od času s použitím regulátora v simulácii	38
4.11	Grafické závislosti teploty renetátu a otvorenia V23 od času s použitím regulátora v simulácii	39
4.12	Graf závislosti transmembránového tlaku od času pri riadení regulátorom otvorenia ventilu V1	40
4.13	Graf závislosti teploty renetátu od času pri riadení regulátorom otvorenia ventilu V23	40
4.14	Graf závislosti transmembránového tlaku od času pri riadení regulátorom otvorenia ventilu V1 s násobkom proporčionálnej zložky 2	41
4.15	Graf závislosti transmembránového tlaku od času pri riadení regulátorom otvorenia ventilu V1 s násobkom proporčionálnej zložky 0,5	42
4.16	Graf závislosti teploty renetátu od času pri riadení regulátorom otvorenia ventilu V23 s násobkom proporčionálnej zložky 2	43
4.17	Graf závislosti spotreby čerpadla od transmembránového tlaku	44
4.18	Graf závislosti spotreby čerpadla od frekvencie čerpadla	44

Zoznam tabuliek

4.1	Čistenie RO membrány - príprava kyslého roztoku	18
4.2	Čistenie RO membrány - príprava zásaditého roztoku	18
4.3	Výstup z pokusu Čistenie RO membrány	20
4.4	Konečné hodnoty pokusu Čistenie RO membrány	21
4.5	Plán experimentu V1	22
4.6	Plán experimentu V23	25
4.7	Plán experimentu Čerpadlo	30
4.8	Výsledky nelineárnej regresie parametrov prenosovej a prechodovej funkcie lineárneho systému prvého rádu pre tlakové zmeny vyvolané zmenou otvorenia ventilu V1	32
4.9	Výsledky nelineárnej regresie parametrov prenosovej a prechodovej funkcie lineárneho systému prvého rádu pre teplotné zmeny vyvolané zmenou otvorenia ventilu V23	34
4.10	Parametre navrhovaných PI regulátorov	36

Zoznam symbolov

Δu	rozdiel vstupných veličín
\dot{n}	tok látkového množstva
\dot{n}_f	tok látkového množstva vody v nádrži
\dot{n}_p	tok látkového množstva permeátu
\dot{n}_r	tok látkového množstva retentátu
\dot{V}	objemový tok (prietok)
\dot{V}_f	objemový tok (prietok) vody v nádrži
\dot{V}_p	objemový tok (prietok) permeátu
\dot{V}_r	objemový tok (prietok) retentátu
μm	mikrometer
μS	mikrosiemens
ρ	hustota
σ_f	konduktivita vody v nádrži
σ_p	konduktivita permeátu
σ_r	konduktivita retentátu
*	veličina v ustálenom stave
A, B, C, D	prirodzené čísla
a_1, a_2	reálne čísla
c	koncentrácia
c_f	koncentrácia vody v nádrži
c_p	koncentrácia permeátu
c_r	koncentrácia retentátu

d	priemer
$F(s)$	Laplaceov obraz funkcie $f(t)$
$f(t)$	funkcia s časovou premennou
$f_{\dot{c}}$	frekvencia čerpadla
$G, G(s)$	prenosová funkcia
I	integračná zložka regulátora
J	lineárny operátor
K_1, K_2	koeficienty parciálnych zlomkov
L	Laplaceov obraz
M	molárna hmotnosť
m	hmotnosť
$O(s)$	Laplaceov obraz regulačnej odchýlky
$o(t)$	regulačná odchýlka
P	proporcionálna zložka regulátora
P_f	tlak vody v nádrži
P_p	tlak permeátu
P_r	tlak retentátu
P_{TMP}	transmembránový tlak
$P_{\dot{c}}$	výkon čerpadla
R	súčiniteľ retencie
s	komplexná premenná Laplaceovej transformácie
T	časová konštanta
T_p	teplota permeátu
t_p	približný, plánovaný čas
T_r	teplota retentátu
$U(s)$	Laplaceov obraz vstupnej veličiny
$u(t)$	vstupná veličina, resp. akčný zásah
V	objem
w	hmotnostný zlomok
$X(s)$	Laplaceov obraz žiadanej veličiny

$x(t)$	žiadaná veličina
$Y(s)$	Laplaceov obraz výstupnej veličiny, resp. akčného zásahu
$y(t)$	výstupná veličina/prechodová funkcia
y_0	počiatočná podmienka výstupnej veličiny
Z	zosilnenie
Z_m	skutočná zadrživacia schopnosť membrány
A	angström
a),...,j)	označenia podobrázkov jednotlivých obrázkov
bar	bar
$C_6H_8O_7$	kyselina octová
$C_6H_8O_7 \cdot H_2O$	monohydrát kyseliny octovej
Cl^-	chloridový anión
cm	centimeter
D	derivačný regulátor
e	Eulerovo číslo
h	hodina
H_2O	voda
Hz	hertz
I	integračný regulátor
kg	kilogram
kW	kilowatt
L	liter
LT	Laplaceova transformácia
LT^{-1}	spätná Laplaceova transformácia
m	meter
MF	mikrofiltrácia
min	minúta
mL	mililiter
mS	minisiemens
Na^+	sódny kation
NaOH	hydroxid sodný

NF	nanofiltrácia
nm	nanometer
OH^-	hydroxidový anión
P	proporcionálny regulátor
Pa	pascal
pH	acidita (vodíkový exponent)
RO	reverzná osmóza
s	sekunda
STOP TIME	čas zastavenia experimentu
UF	ultrafiltrácia
URO	uzavretý regulačný obvod
Zn^{2+}	zinočnatý kation
$^{\circ}\text{C}$	stupeň Celzia

Separácia látok predstavuje oddeľovanie jednotlivých zložiek zmesí a patrí medzi základné deje využívané či už v chemickom laboratóriu alebo priemysle. Membránové procesy sú procesy, ktorých separačný účinok sa zakladá na odlišnej priepustnosti jednotlivých zložiek kvapalných alebo plyných zmesí cez membránu – neúplnú bariéru medzi dvoma tekutinami [4].

Skúmanie, modelovanie a následné riadenie membránových procesov je vzhľadom na ich perspektívu veľmi dôležité, keďže ich využitie je a môže byť skutočne veľmi široké. V potravinárskom priemysle napríklad táto technológia priniesla revolúciu pri spracovávaní mlieka a výrobe mliečnych výrobkov. Konkrétne môžeme uviesť získavanie smotany, ktoré je membránovými procesmi ako sú mikrofiltrácia (MF) a ultrafiltrácia (UF), narozdiel od tradičného odstredovania, energeticky menej náročné. Ďalej môžeme taktiež spomenúť efektívnejšie separovanie mliečnych bielkovín, ako sú kazeín alebo srvátkové "whey" proteíny [9].

Ďalším dôležitým odvetvím, v ktorom má používanie membránových procesov svetlú budúcnosť, je medicína a farmaceutický priemysel. Liečivá a látky vhodné na prípravu liečiv sa vo všeobecnosti vyrábajú viacstupňovými organickými syntézami, a mnohokrát je potrebné výsledné produkty izolovať z rozpúšťadiel odlišných od reakčných, aby sa, okrem iného, zabránilo spätným reakciám. Tu opäť nachádzajú využitie membrány, pretože konvenčné metódy ako destilácia nie sú v mnohých takýchto prípadoch vhodné z dôvodu častej tepelnej nestálosti týchto produktov. Konkrétny príklad môže byť izolácia erytromycínu, zlúčeniny používanej na výrobu širokospektrálnych antibiotík, z roztoku etylacetátu a výmena rozpúšťadla za metanol [5]. Zaujímavosťou je, že okrem farmácie a západnej medicíny si membrány pre dobré výsledky v súčasnosti našli miesto už aj v tradičnej čínskej medicíne [10].

Univerzálne najväčší význam má však filtrácia vody, a to nie len v rôznych priemyselných odvetviach, kde je potrebná ako rozpúšťadlo alebo reagent, ale vzhľadom k tomu, že je

to esenciálna kvapalina pre život, aj pre väčšie časti populácie ako také. Práve z týchto dôvodov sa hľadajú stále lacnejšie spôsoby na jej získavanie, akými sú aj recyklácia a úprava už použitej znečistenej vody.

Do budúcnosti predpovedané zvyšovanie množstva emisií oxidu uhličitého a deficitu vody si vyžaduje pozornosť vedeckej obce, a jedným z vhodných spôsobov na zabezpečovanie dostatku pitnej vody a zároveň udržiavanie prírody a životného prostredia sú membránové prevádzky poháňané solárnou energiou. Tu je často využívaná napríklad reverzná osmóza (RO), ktorou sme sa zapodievali aj v tejto práci, pretože je dobrým základom pre takúto výrobu, najmä v štátoch s nedostatkom pitnej vody [12].

V praxi sa napríklad reverzná osmóza využíva z dôvodu deficitu pitnej vody v Španielsku. Tam riešenie občasného nedostatku vody na ostrovoch, kde boli prírodné zdroje povrchovej a podzemnej vody vzácnosťou, získalo väčší význam s technologickým pokrokom, nižšími výrobnými nákladmi a zároveň minimalizovaním dopadu na životné prostredie [3]. V Barcelone je ku príkladu postavená najväčšia prevádzka pre odsolovanie morskej vody v Európe – jej obyvatelia tak môžu piť vodu, ktorá pochádza pôvodne zo Stredozemného mora [13]. Ako uvádzajú rozličné články, podobným smerom sa začínajú uberať aj ďalšie mestá, ostrovy a krajiny, kde sa znižuje dostatok pitnej vody, ako napríklad Bangladeš [14] alebo ostrov Pulau Pinang v Indonézii [8].

Je teda zrejmé, že v budúcnosti budú reverzná osmóza a ďalšie membránové procesy aj naďalej zohrávať pre svet dôležitú úlohu, a že je na mieste sa nimi zaoberať.

2.1 Reverzná osmóza

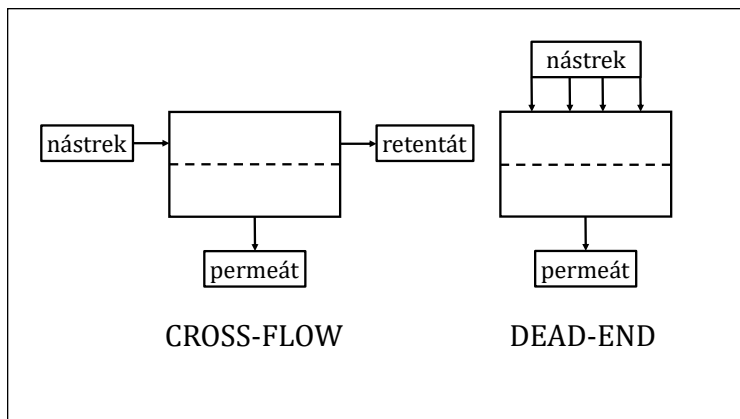
Reverzná alebo aj obrátená osmóza, v literatúre často označovaná skrátkou RO, patrí spolu s mikrofiltráciou (MF), ultrafiltráciou (UF) a nanofiltráciou (NF) k jedným zo štyroch základných typov oddeľovacích techník, ktoré sa spoločne označujú ako tlakové membránové procesy [5].

RO má s týmito ostatnými základnými typmi mnoho podobných znakov – ich základným princípom je využitie rozdielu tlaku ako hnacej sily prechodu cez semipermeabilnú (polopriepustnú) membránu [5]. Cezmembránový alebo transmembránový tlak je definovaný ako pokles tlaku na membráne [15] a je jedným z elementárnych parametrov všetkých membránových procesov. Vieme ho vypočítať ako:

$$P_{TMP} = \frac{P_f + P_r}{2} - P_p \quad (2.1)$$

Rovnako je pre ne základným parametrom usporiadanie toku na spôsob priečného toku alebo cross-flow, pri ktorom je narozdiel od klasickej filtrácie obmedzený vznik filtračného koláča, pretože relatívny pohyb medzi spracovávanou disperziou a membránou zabraňuje nahromadzovaniu častíc. Tento princíp názorne ukazuje schéma na obrázku 2.1.

Odlišnosti spočívajú vo veľkosti tlakových rozdielov, ktoré používame, vlastnostiach membrán a prevažujúcim transportným mechanizmom. Pri UF a MF je mechanizmom delenia tzv. sitový efekt. Pod ním rozumieme delenie podľa veľkosti častíc. Pri NF a RO sa uplatňuje sorpčno-difúzny mechanizmus založený na fyzikálno-chemických interakciách delených zložiek s membránou [4]. Membrány využívané v RO majú najmenšiu veľkosť pórov, a to až pod 1 nm. Ďalej, zatiaľ čo pri MF a UF sú tlakové



Obr. 2.1: Schématické znázorenie usporiadania separácie priečnym tokom (cross-flow) a normálnej filtrácie (dead-end)

rozdiely nízke (pod 10 bar), pre NF a RO sú tieto diferencie vyššie (10–40 bar pre NF a 20–100 bar pre RO) [5].

Z praktických dôvodov sa pri membránach mnohokrát používa odvodená jednotka tlaku bar – tá predstavuje stotisícnásobok základnej jednotky Pascal a tú používame pre matematických opisoch aj v tejto práci.

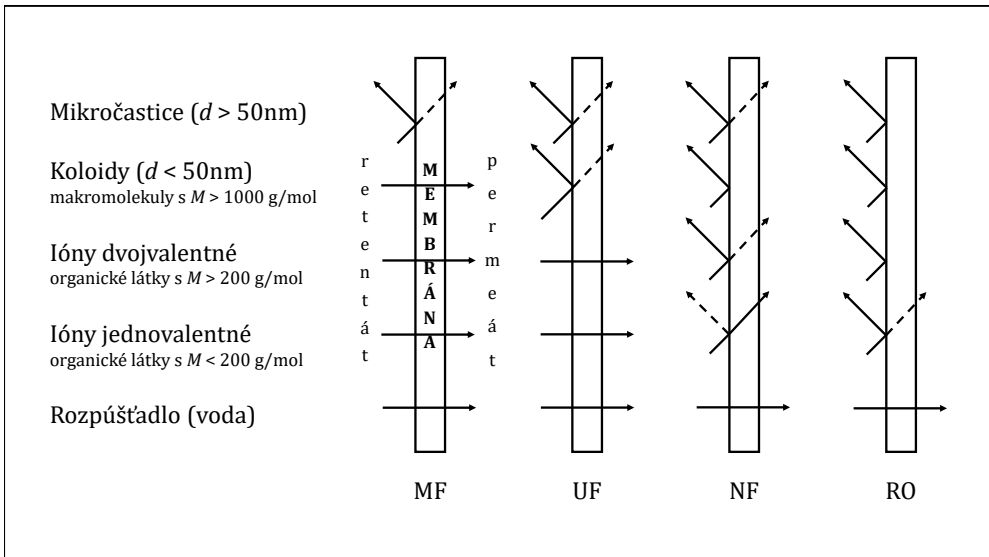
$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2} \quad (2.2)$$

Prakticky umožňujú tieto odlišnosti (ako veľkosť pórov či odlišné rozdiely tlakov) iné možnosti využitia pre RO ako pre ostatné typy membránových procesov. Na obrázkoch 2.2 a 2.3 sú schematicky znázornené možnosti použitia vzhľadom na priepustnosť membrány pri podmienkach daného procesu. Prerušovanou čiarou sú vyznačené častice čiastočne zadržované membránou.

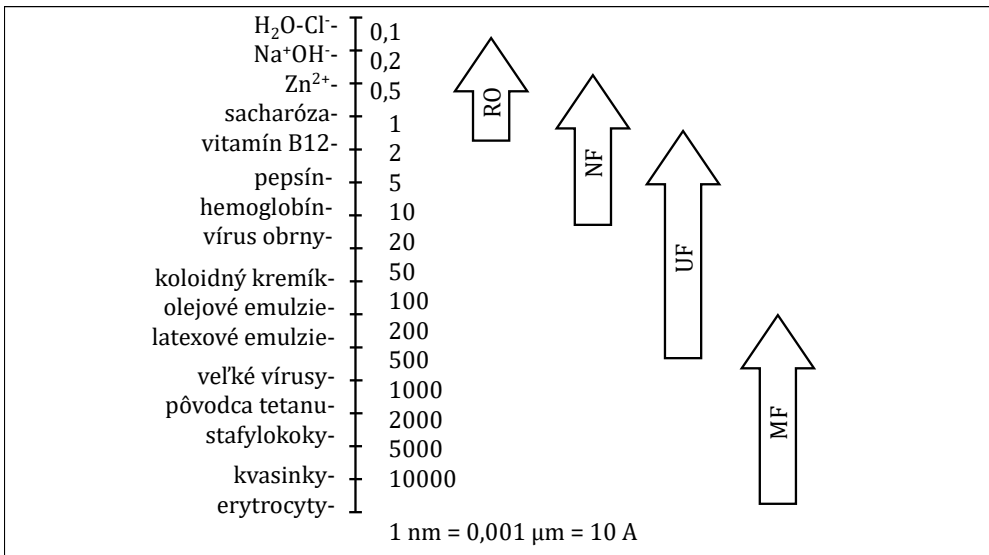
Vyššie sme spomínali transmembránový tlak ako parameter membrány. Ďalším zo základných parametrov charakterizujúcim konkrétne jej selektivitu je tzv. súčiniteľ retencie alebo skutočná zadrživacia schopnosť membrány, v literatúre označovaný často ako R [5] alebo aj Z_m [4]. Ten vyjadrujeme pomocou koncentrácií vo vstupnom a výstupnom prúde ako:

$$R = \frac{c_f - c_p}{c_f} = 1 - \frac{c_p}{c_f} \quad (2.3)$$

Tento parameter môže byť vhodne použitý ako indikátor kvality používanej membrány.



Obr. 2.2: Prehľad molekúl v tlakových membránových procesoch



Obr. 2.3: Konkrétne znázornenie oddeľovacej schopnosti jednotlivých tlakových membránových procesov

2.2 Opis a riadenie lineárnych systémov 1. rádu

Systém možno definovať ako objekt alebo súbor objektov s definovanými veličinami a vzájomnými vzťahmi medzi nimi. Často sa používa na matematické modelovanie fyzikálnych procesov a zariadení, napríklad chemický reaktor, výmenník tepla a podobne. Na systém pôsobí v čase t vstupná veličina $u(t)$, respektíve A vstupných veličín $u_1(t), \dots, u_A(t)$, a výsledkom je pozovateľná výstupná veličina $y(t)$, respektíve B výstupných veličín $y_1(t), \dots, y_B(t)$ [2].

Existujú rôzne typy klasifikácii systémov - podľa spojitosti, premenlivosti koeficientov atď. Pre základné modelovanie procesov je snád najsignifikantnejším pojmom pre jeho jednoduchosť pojem lineárny systém - systém, pre ktorý platí zákon superpozície - ak existujú nejaké riešenia lineárnej rovnice, potom aj ich lineárna kombinácia je riešením tej istej rovnice:

$$y = J(a_1u_1 + a_2u_2) \quad (2.4)$$

$$y = a_1J(u_1) + a_2J(u_2) \quad (2.5)$$

$$y = a_1y_1 + a_2y_2 \quad (2.6)$$

Všeobecne vieme takýto lineárny systém zapísať v tvare diferenciálnej rovnice, kde najvyššia derivácia vstupnej veličiny je C a najvyššia derivácia výstupnej veličiny D , ako:

$$a_n \frac{d^C y(t)}{dt^C} + a_{C-1} \frac{d^{C-1} y(t)}{dt^{C-1}} + \dots + a_0 y(t) = b_m \frac{d^D u(t)}{dt^D} + \dots + b_0 u(t) \quad (2.7)$$

Z hľadiska najvyššej derivácie použitej v diferenciálnej rovnici vieme ďalej deliť lineárne systémy podľa rádov. Napríklad nasledujúca rovnica predstavuje lineárny dynamický systém 1. rádu, pretože obsahuje práve a maximálne prvú deriváciu. Ide o najjednoduchší systém, ktorý o procese hovorí to, že vonkajší vstup spôsobuje zmenu výstupu [2]:

$$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 u(t) \quad (2.8)$$

2.2.1 Prenosové a prechodové funkcie

Prechodová funkcia je matematická funkcia definujúca výstup systému ako funkciu času v reakcii na jednotkovú skokovú zmenu. V podstate predstavuje riešenie diferenciálnej rovnice predstavujúcej model systému, pričom $u(t)=1$.

V rámci riadenia procesov sa veľmi často na riešenie diferenciálnych rovníc využíva Laplaceova transformácia LT, vďaka ktorej dokážeme nájsť riešenie pomocou jednoduchých

algebraických operácií a vieme sa vyhnúť zložitejšiemu derivovaniu a integrovaniu. Vo všeobecnosti je Laplaceova transformácia funkcie $f(t)$ definovaná ako:

$$F(s) = L\{f(t)\} \triangleq \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2.9)$$

Prakticky tento vzťah ale nemusíme používať, pretože Laplaceove obrazy jednoduchých funkcií sú tabelované [2]. V Laplaceovej oblasti je nezávislou premennou s . Transformáciou rovnice (2.7) pri úvahe nulových počiatkových podmienok dostaneme:

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0)Y(s) = (b_m s^m + \dots + b_0)U(s) \quad (2.10)$$

Z tohto vzťahu vieme vytvoriť tzv. prenosovú funkciu $G(s)$, ktorá predstavuje podiel Laplaceových obrazov výstupu a vstupu, ktorá už v podstate predstavuje Laplaceov obraz prechodovej funkcie:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0} \quad (2.11)$$

Konkrétnym príkladom je odvodenie prenosovej funkcie lineárneho systému 1. rádu:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_0}{a_1 s + a_0} = \frac{Z}{Ts + 1} \quad (2.12)$$

Jednoduchým delením dostávame tvar tejto rovnice s parametrami, ktoré nazývame zosilnenie a časová konštanta.

Ak teda $u(t) = 1$, potom $U(s) = 1/s$, a dostávame:

$$Y(s) = G(s)U(s) = \frac{b_m s^m + \dots + b_0}{(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0)s} \quad (2.13)$$

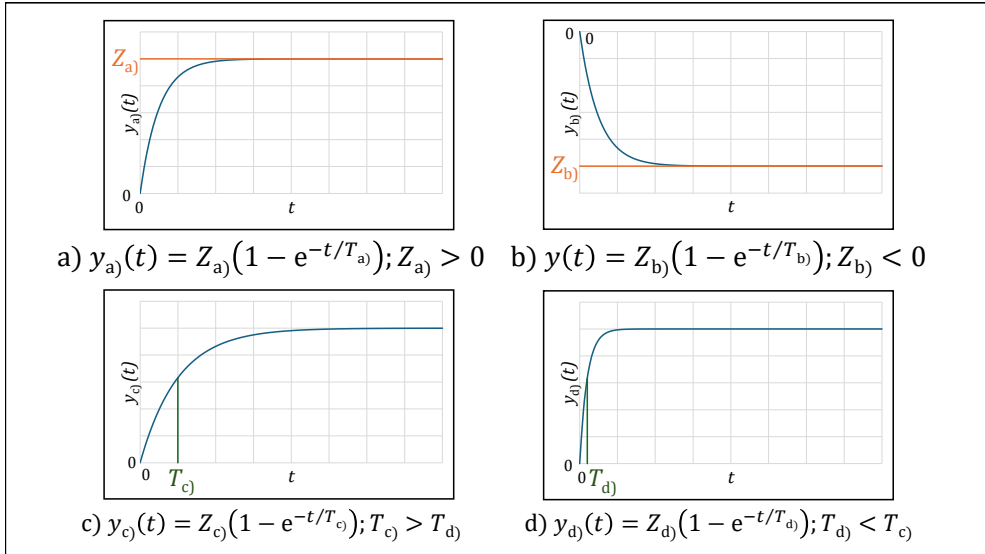
Spätnou Laplaceovou transformáciou dostaneme konkrétne riešenie $y(t)$ - prechodovú funkciu. To závisí od koeficientov a od rádu pôvodnej rovnice.

Pre lineárny dynamický systém 1. rádu vyzerá prechodová funkcia:

$$y(t) = Z(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (2.14)$$

Pre túto funkciu platí, že so zvyšujúcim sa časom sa funkčná hodnota limitne blíži práve k hodnote zosilnenia. Ak dosadíme za čas práve hodnotu časovej konštanty, zistíme, že ako funkčnú hodnotu dostaneme cca 63% zosilnenia. Časová konštanta nám teda hovorí o tom za aký čas dosiahneme práve takúto zmenu výstupnej veličiny.

Prechodová charakteristika predstavuje grafické znázornenie prechodovej funkcie. Na obrázku 2.4 sú znázornené prechodové charakteristiky lineárneho systému 1. rádu pre rôzne parametre zosilnenia a časovej konštanty: a) pre kladné zosilnenie, b) pre záporné zosilnenie a c) a d) pre dve odlišne veľké časové konštanty [5].



Obr. 2.4: Príklady prechodových charakteristík pre lineárne systémy 1. rádu

2.2.2 Spätnoväzbové riadenie

Po vytvorení matematického modelu procesu nasleduje otázka toho, ako v procese cielavedome nastaviť vstupnú veličinu, aby sme dosiahli taký výstup, ktorý si konkrétne želáme. Často sa na to využíva takzvané spätnoväzbové riadenie. Jeho princíp spočíva v tom, že na základe výstupu systému sa vypočíta aktuálna regulačná odchýlka (rozdiel aktuálnej a želanej výstupnej veličiny), tá vstúpi do regulátora (zariadenia vyhodnocujúceho regulačnú odchýlku s vlastnou prenosovou funkciou), a ten vplyvom na proces (akčným zásahom) zmení aktuálny výstup. To je znázornené na stručnej schéme na obrázku (2.5). Takúto schému nazývame uzavretý regulačný obvod a vieme preňho definovať prenosovú funkciu [2]:

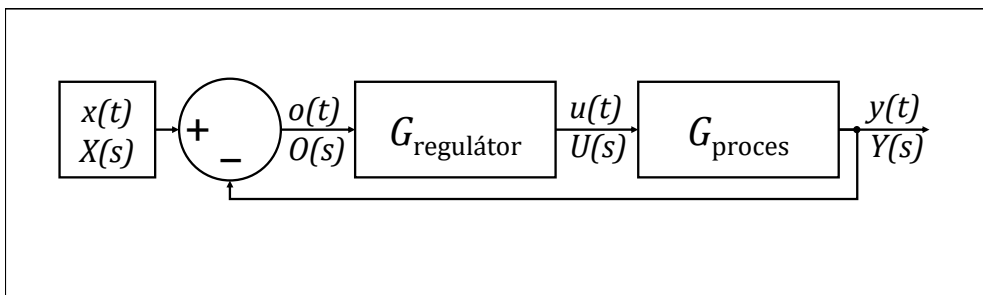
$$G_{URO} = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{G_{\text{regulátor}} G_{\text{proces}}}{1 + G_{\text{regulátor}} G_{\text{proces}}} \quad (2.15)$$

Vyššie sme spomínali zariadenie nazývané regulátor. Z definície prenosu vieme preňho zaviesť vzťah:

$$G_{\text{regulátor}} = \frac{U(s)}{O(s)} \quad (2.16)$$

Existuje viacero typov, základné sú:

- proporcionálny P - prenos sa rovná konštante - zosilneniu regulátora;



Obr. 2.5: Schéma spätnoväzbového riadenia s veličinami v klasickom a Laplaceovom tvare

- integračný I - prenos sa rovná podielu súčinu premennej s so zosilnením regulátora a časovej integračnej konštanty, spätnou Laplaceovou transformáciou dostávame integrál;
- derivačný D - prenos sa rovná súčinu premennej s , zosilnenia regulátora a časovej derivačnej konštanty, spätnou Laplaceovou transformáciou dostávame deriváciu;

a ich kombinácie ako proporcionálno-integračný PI, proporcionálno-derivačný PD, proporcionálno-integračno-derivačný PID a podobne.

3.1 Membránová stanica

Ako vsádzkovú membránovú procesnú stanicu v experimentálnej časti tejto práce používame zariadenie na úpravu kvapalín reverznou osmózou SUPER RO, typ BM 30. Jeho fotografia je na obrázku 3.1. Technická schéma s nákresmi jednotlivých ventilov, objektov, snímačov a s legendou sú vyobrazené na obrázku 3.2. Podrobnejšie informácie o SUPER RO, typ BM 30 sú voľne dostupné v manuáli ku prístroju [1], preto v nasledujúcich odsekoch stručne zhrnieme len najdôležitejšie informácie k našej problematike.

3.1.1 Používané súčasti

Táto stanica ponúka pre experimentovanie viacero rôznych modulov. My budeme konkrétne pracovať so vstupom vody zo vodovodnej siete a membránou označenou RO1 – reverzná osmóza 1. V krátkosti môžeme schému stručne popísať nasledovne: voda zo siete môže prúdiť cez malý filter T1 do veľkej zásobnej nádrže F1, kde ju môžeme skladovať. Odtiaľ ju vieme otvorením správnych ventilov pomocou vysokotlakového piestového čerpadla P3 (ďalej už len čerpadlo) podľa nákresu dostať ku filtru RO1, kde prebieha membránový proces. Odtiaľ sa retentát vracia späť do nádrže a oddelený permeát môžeme nechať prúdiť do inej úložnej nádoby. Samozrejme, pre naše skúmanie môžeme priviesť tento výstup tiež do zásobnej nádoby F1 a proces zacykliť, aby sme šetrili množstvo použitej vody.

Pre naše skúmanie budú dôležité snímače vodivosti QIRA 01 a 02, tlakové snímače PIRCA01 a PIRCA02, prietokometre FIRC01, FIR02 a snímače teploty TICA01 a TICA02.

Celá stanica je prepojená s počítačovým softvérom Siemens WinCC flexible runtime s



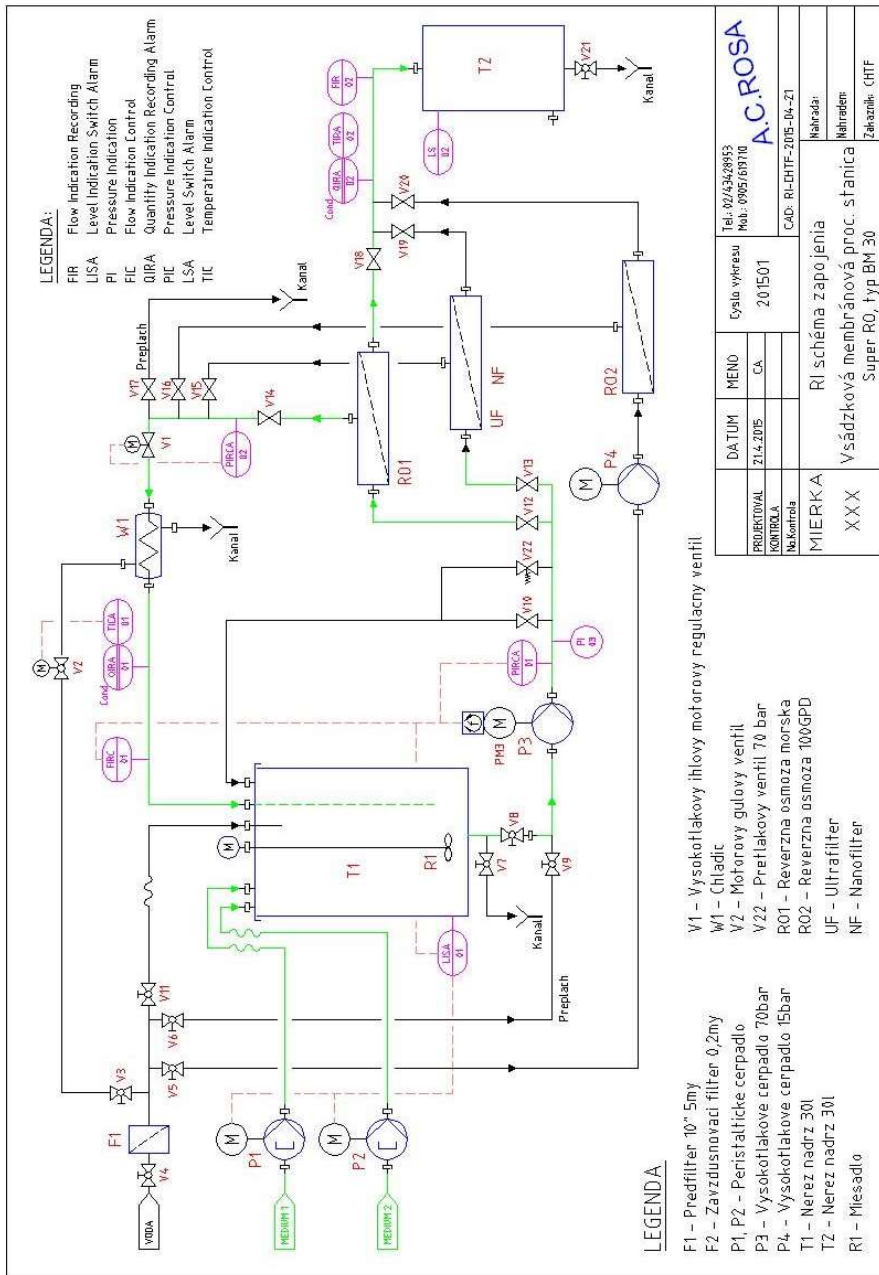
Obr. 3.1: Zariadenie na úpravu kvapalín reverznou osmózou SUPER RO, typ BM 30

jednou licenciou pre všetky základné činnosti. Vďaka nej vieme tento proces sledovať a ovládať pomocou externého počítača. Na obrázku 3.3 je softvérové prostredie tohto programu na ovládanie stanice z manuálu ku vsádzkovej stanici [6], a na obrázku 3.4 skutočné, predchádzajúcimi užívateľmi mierne modifikované počítačové prostredie, ktoré sme počas experimentovania používali aj my.

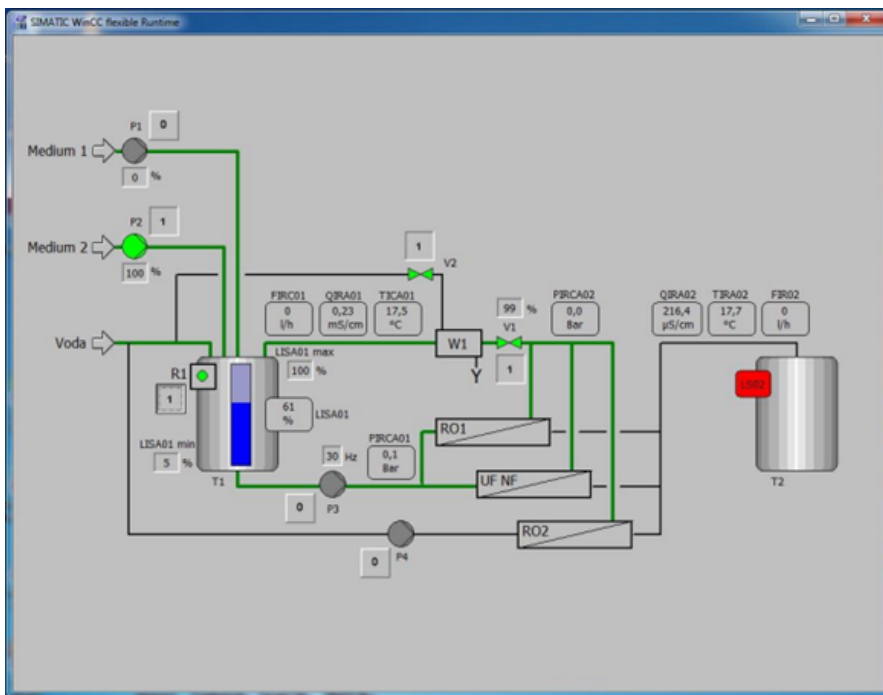
Tento softvér predstavuje zjednodušenú schému 3.2 a ukazuje aktuálne hodnoty posielané z jednotlivých snímačov. Dokážeme cez neho otvárať niektoré automatizované ventily ako V1, V2 a V23, a ovládať čerpadlo.

3.1.2 Spotreba a výkon čerpadla

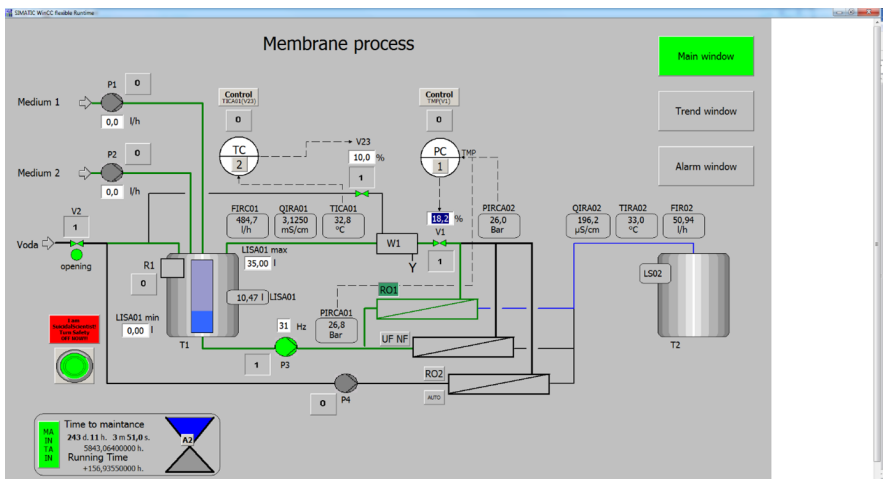
Počas procesu membránovej separácie je dôležité sledovať spotrebu elektrického prúdu, najmä z finančného hľadiska. Záujem o štúdium závislosti funkčnosti filtrácie a výslednej ceny je kľúčovou najmä pre veľké firmy s potenciálne veľkou produkciou, a to z dôvodu konkurencieschopnosti. Celková spotreba sa teoreticky môže skladať z časti energie, ktorá je nevyhnutná pre fungovanie elektrických súčastí stanice, externého počítača na riadenie a ďalších významných súčastí, a z časti energie, ktorú vieme meniť. Jedinou súčasťou, ktorej príkon a následne teda výkon vieme ovládať, je čerpadlo. Jeho výrobca preto v rámci online dostupného dokumentu [7] uviedol jednoduchý vzťah na výpočet



Obr. 3.2: Priložená technická schéma používaného zariadenia



Obr. 3.3: Softvérové užívateľské rozhranie zariadenia



Obr. 3.4: Modifikované užívateľské rozhranie zariadenia používané na našej fakulte

elektrickej spotreby:

$$\frac{P_c}{\text{kW}} = \frac{900 f_c s}{84\,428} + \frac{60(\dot{V}_p + \dot{V}_r) P_{TMP s}}{511 \text{ L bar}} \quad (3.1)$$

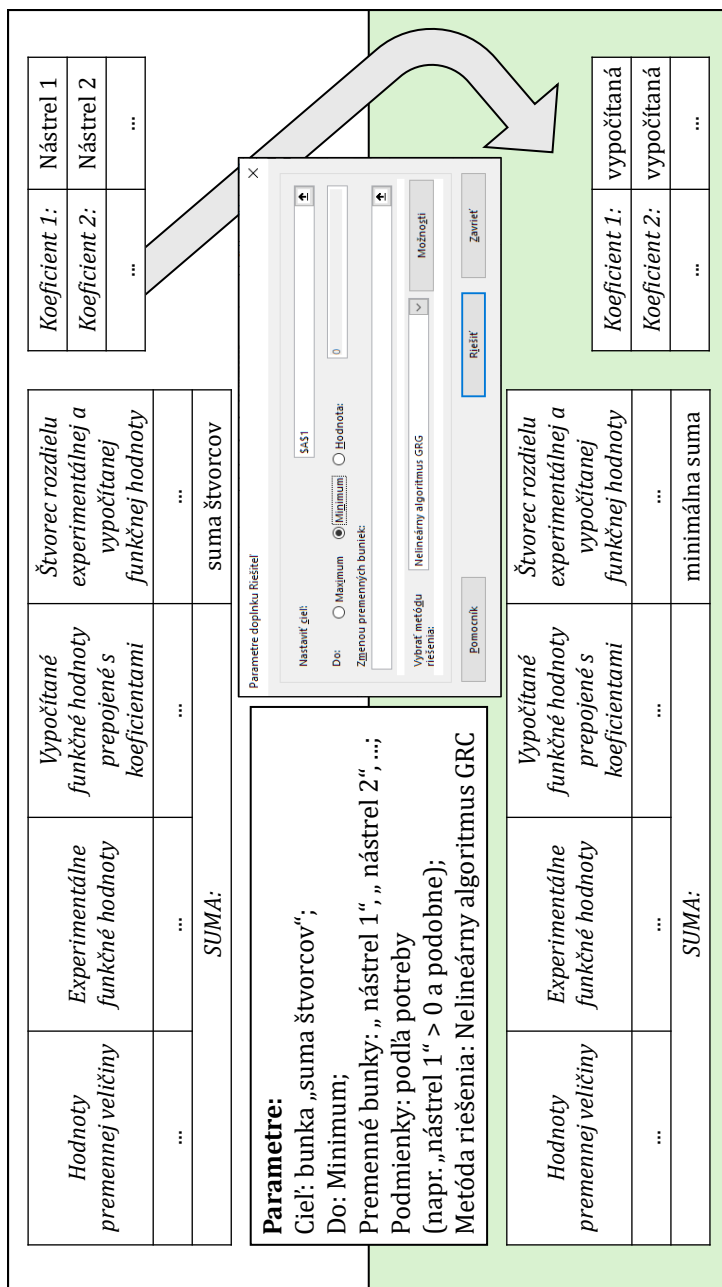
Vďaka tomuto vzťahu môžeme skúmať vplyv otáčok čerpadla alebo transmembránového tlaku na spotrebu prúdu v porovnaní s kvalitou permeátu.

3.2 MATLAB a simulačné prostredie Simulink

MATLAB (<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>) je programovacie prostredie slúžiace na inžinierske výpočty a modelovanie procesov. Simulink je grafická súčasť MATLABU na simuláciu dynamických systémov. V MATLABE si vieme definovať jednotlivé koeficienty a v SIMULINKU vieme vytvárať vzťahy medzi nimi v podobe schém podobným ako na obrázku 2.5. Vďaka tomu, že si takto vieme zadať funkcie prenosové dokážeme vytvárať názorné modely a graficky simulovať prechodové charakteristiky. Tak isto pomocou neho dokážeme zaznamenávať skutočné procesy - takto budeme môcť ukladať jednotlivé informácie, ktoré odosielajú senzory, aj v nasledujúcich experimentoch.

3.3 Nelineárna regresia pomocou Riešiteľa

Získané dáta môžeme ďalej spracovávať pomocou kancelárskeho programu Microsoft Office Excel (<https://www.microsoft.com/sk-sk/microsoft-365/excel>), ktorý obsahuje nielen nástroje na tvorbu a úpravu grafov, ale aj súčasť nazývanú Riešiteľ alebo aj Solver. Tá slúži na nelineárnu regresiu pri hľadaní parametrov. Postup používania Riešiteľa pri hľadaní parametrov neznámej závislosti, pokiaľ máme dostupné experimentálne údaje, je jednoduchý a znázornený na obrázku : ak poznáme všeobecný tvar funkcie, podľa ktorej by sa mali naše hodnoty správať, sprvu pre ňu vymyslíme náhodné koeficienty, tzv. nástrely, a vypočítame funkčné hodnoty. Potom urobíme štvorce pre rozdiel každej vypočítanej a skutočne nameranej hodnoty. Ďalej vypočítame súčet štvorcov. Po spustení potom Riešiteľ pracuje tak, že iteračne skúša meniť hodnoty našich parametrov tak, aby súčet štvorcov vyhovoval zvolenej podmienke, v našom prípade aby bol minimálny a blížil sa k nule. Dostávame teda koeficienty, pri ktorých je rozdiel medzi experimentálnymi údajmi a vypočítanými údajmi minimálny.



Obr. 3.5: Všeobecný schématický postup používania Riešiteľa pre nelineárnu regresiu

4.1 Príprava zariadenia na experimenty

Prvým dôležitým krokom akéhokoľvek skúmania membránových procesov pre dosahovanie čo najpresnejších výsledkov je prečistenie membrán po ich dlhšom nepoužívaní, keďže tie môžu byť zanesené rôznymi minerálnymi látkami, biologickým materiálom a podobne.

4.1.1 Postup čistenia membrány

V skratke vieme postup čistenia membrány zhrnúť v piatich krokoch:

1. Premývanie systému vodou (1h)
2. Premývanie systému roztokom s kyslým pH (1h)
3. Premývanie systému vodou (1h)
4. Premývanie systému roztokom so zásaditým pH (1h)
5. Premývanie systému vodou (1h)

Vhodne kyslé prostredie vieme dosiahnuť 2% roztokom kyseliny citrónovej (pH = 4) a bázičké 0,1% roztokom hydroxidu sodného (pH = 12) [6].

Prípravu roztokov sme zhrnuli v tabuľkách 4.1 a 4.2, pričom pre výpočty sme použili základné chemické vzťahy ako definíciu látkového množstva, molárnej hmotnosti, definíciu hustoty atď. Hmotnostné zlomky používaných roztokov sú nízke. Uvažujme preto, že objem pripraveného roztoku a rozpúšťadla je približne rovnaký. Dôležité je

pH	4
$w_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7}$	2%
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	0,99
$m_{\text{teor.}; \text{roztok}}/\text{g}$	7000
$m_{\text{teor.}; \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7}/\text{g}$	140
$m_{\text{teor.}; \text{H}_2\text{O}}/\text{g}$	6860
$V_{\text{teor.}; \text{H}_2\text{O}}/\text{mL}=V_{\text{teor.}; \text{roztok}}/\text{mL}$	6929
$M_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7}/\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	192,13
$M_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\cdot\text{H}_2\text{O}}/\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	210,14
$m_{\text{teor.}; \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\cdot\text{H}_2\text{O}}/\text{g}$	153,1
$m_{\text{nameraná}; \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\cdot\text{H}_2\text{O}}/\text{g}$	153,0
$V_{\text{prázdna nádrž}}/\text{mL}$	3370
$V_{\text{teor.}; \text{naplnená nádrž}}/\text{mL}$	10299
$V_{\text{nameraný}; \text{naplnená nádrž}}/\text{mL}$	10530
$V_{\text{nameraný}; \text{roztok}}/\text{mL}$	7160

Tabuľka 4.1: Čistenie RO membrány - príprava kyslého roztoku

pH	12
w_{NaOH}	0,1%
$\rho_{\text{H}_2\text{O}}/\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$	0,99
$m_{\text{teor.}; \text{roztok}}/\text{g}$	7000
$m_{\text{teor.}; \text{NaOH}}/\text{g}$	7
$m_{\text{teor.}; \text{H}_2\text{O}}/\text{g}$	6993
$V_{\text{teor.}; \text{H}_2\text{O}}/\text{mL}=V_{\text{teor.}; \text{roztok}}/\text{mL}$	7064
$m_{\text{nameraná}; \text{NaOH}}/\text{g}$	7,0
$V_{\text{prázdna nádrž}}/\text{mL}$	3370
$V_{\text{teor.}; \text{naplnená nádrž}}/\text{mL}$	10434
$V_{\text{nameraný}; \text{naplnená nádrž}}/\text{mL}$	10820
$V_{\text{nameraný}; \text{roztok}}/\text{mL}$	7450

Tabuľka 4.2: Čistenie RO membrány - príprava zásaditého roztoku

taktiež poznamenať, že systém neukazuje objem kvapaliny v prázdnej nádrži zariadenia ako nulový, preto tento fakt nesmieme zabudnúť zahrnúť do výpočtov a tabuliek.

Počas pokusu sme nepoužívali priamo kyselinu citrónovú, ale jej monohydrát. Tento fakt je taktiež zahrnutý v tabuľke 4.1.

4.1.2 Vyhodnotenie účinnosti čistenia

Na zhodnotenie toho, či sa nám čistením podarilo zlepšiť kvalitu procesu, vieme použiť súčiniteľ retencie R ako kvalitatívny parameter membrány. Jeho definičný vzťah je uvedený v rovnici (2.3). Z tohto vzťahu si vieme následne odvodiť vzťah, ktorý bude obsahovať veličiny, ktoré sme vedeli počas procesu sledovať.

Prvým problémom je, že nemeriame priamo koncentrácie, ale konduktivity retentátu a permeátu. Uvažujme preto, že voda z vodovodnej siete, ktorú používame, je počas celého procesu zriedený roztok, teda, že koncentrácia elektrolytov je relatívne nízka. V takom prípade nemusíme uvažovať vzájomné interakcie elektricky nabitých častíc v roztoku a môžeme povedať, že jestvuje priama úmernosť medzi konduktivitou a koncentráciou, čo bolo aj experimentálne dokázané [11]. V takom prípade môžeme koncentrácie vo vzťahu (2.3) nahradiť konduktivitami a pomer ostáva rovnaký:

$$R = \frac{\sigma_f - \sigma_p}{\sigma_f} = 1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_f} \quad (4.1)$$

V našom prípade nemeriame priamo konduktivitu v nádrži, ale konduktivitu retentátu. Tak ako koncentrácia, ani konduktivita nie je aditívna veličina, a preto nedostaneme konduktivitu v nádrži jednoduchým súčtom konduktívít. Vieme však, že pre koncentráciu platí, že je definovaná ako podiel látkového množstva a objemu roztoku, respektíve ich tokov:

$$c = \frac{\dot{n}}{\dot{V}} \quad (4.2)$$

Objemový tok vieme prepočítať pomocou hustoty na hmotnostný tok:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (4.3)$$

Počas experimentu sme sledovali objemové toky permeátu a retentátu. Zo zákona zachovania hmotnosti platí, že hmotnostný tok roztoku vstupujúceho k membráne sa musí rovnať hmotnostnému toku permeátu a hmotnostnému toku retentátu:

$$\dot{m}_f = \dot{m}_p + \dot{m}_r \quad (4.4)$$

Veličina	Priemerná hodnota z prvého premývania vodou	Priemerná hodnota z posledného premývania vodou
$\sigma_p/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-3})$	37,731	17,940
$\sigma_r/(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-3})$	0,462963	1,04167
$T_p/^\circ\text{C}$	28,449	34,254
$T_r/^\circ\text{C}$	28,519	34,103
$\dot{V}_p/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	44,315	82,279
$\dot{V}_r/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	306,859	441,529

Tabuľka 4.3: Výstup z pokusu Čistenie RO membrány

Keďže sme nemerali veličiny v rovnakých časových intervaloch, najpresnejšie pre vyhodnotenie bude použit nie aktuálne veličiny (ako napríklad všetky veličiny pri čase 60 s a pod.), ale smerodajné (priemerné) veličiny pri smerodajných (priemerných) teplotách. Budeme uvažovať všetky namerané hodnoty okrem hodnôt v čase $t = 0$; ktoré sú vo väčšine prípadov mimo trendov zodpovedajúcich ostatným meraniam a ich odchýlky sú voči ostatným meraniam násobne vyššie. Dôvodom môže byť napríklad to, že prístroj odosiela údaje ešte z predchádzajúceho merania, alebo že sa v tomto čase ešte pri detektore nachádzali, respektíve nenachádzali elektrolyty (kyselina, zásada) z predchádzajúceho merania. Preto vždy, keď budeme hovoriť o priemerných hodnotách, nebudeme v týchto uvažovať s meraním v čase $t=0$. Všetky tieto hodnoty budeme uvažovať ako výstup z tohto experimentu a sú zaznamenané v tabuľke 4.3.

Vidíme, že keďže rozdiely teplôt sú minimálne, a zároveň uvažujeme, že oba tieto roztoky sú veľmi zriedené, aj hustoty medzi retentátom a permeátom sú takmer rovnaké, môžeme povedať, že aj hustoty vody v nádrži budú totožné. Z toho vyplýva, že z materiálovej bilancie (4.4) po podelení každého člena hustotou (uvažujme, že hustota vody je v našom teplotnom rozsahu pre permeát, retentát a vodu v nádrži približne rovnaká) dostávame:

$$\dot{V}_f = \dot{V}_p + \dot{V}_r \quad (4.5)$$

$$\frac{\dot{n}_f}{c_f} = \frac{\dot{n}_p}{c_p} + \frac{\dot{n}_r}{c_r} \quad (4.6)$$

Opäť uvažujeme, že koncentrácia je priamo umerná konduktivitě, a upravíme:

$$\frac{\dot{n}_f}{\sigma_f} = \frac{\dot{n}_p}{\sigma_p} + \frac{\dot{n}_r}{\sigma_r} \quad /.M \quad (4.7)$$

$$\frac{\dot{m}_f}{\sigma_f} = \frac{\dot{m}_p}{\sigma_p} + \frac{\dot{m}_r}{\sigma_r} \quad /. \frac{1}{\rho} \quad (4.8)$$

$$\frac{\dot{V}_f}{\sigma_f} = \frac{\dot{V}_p}{\sigma_p} + \frac{\dot{V}_r}{\sigma_r} \quad (4.9)$$

Veličina	Priemerná hodnota z prvého premývania vodou	Priemerná hodnota z posledného premývania vodou
$\sigma_f / (\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-3})$	191,134	104,548
R	80,3%	82,8%

Tabuľka 4.4: Konečné hodnoty pokusu Čistenie RO membrány

$$\frac{\dot{V}_p + \dot{V}_r}{\sigma_f} = \frac{\dot{V}_p \sigma_r + \dot{V}_r \sigma_p}{\sigma_p \sigma_r} \quad (4.10)$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma_p \sigma_r (\dot{V}_p + \dot{V}_r)}{\dot{V}_p \sigma_r + \dot{V}_r \sigma_p} \quad (4.11)$$

Tento vzťah (4.11) už vieme použiť na výpočet σ_f , keďže všetky ostatné veličiny sú nám známe. Potom môžeme určiť R na základe vzťahu (4.1). Tabuľka 4.4 zobrazuje zápis výsledných hodnôt.

Vidíme, že R z prvého premývania vodou je menšie ako R z posledného premývania vodou, a teda čistením membrány sme docielili väčšiu efektivitu procesu. Dobrú kvalitu permeátu - demineralizovanej vody potvrdzuje aj to, že jej priemerná vodivosť v závere experimentu klesla pod $20 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-3}$.

4.2 Skokové zmeny

Keďže cieľom našej práce je navrhnúť regulátory tlaku a teploty, potrebujeme zistiť, ako sa menia z hľadiska zmeny vstupných veličín. V našom prípade vieme meniť otvorenie ventilov V1, V23 a otáčky čerpadla. V nasledujúcich pokusoch sme menili jeden z týchto troch atribútov, pričom ostatné ostali počas doby experimentu nemenné, a pozorovali sme zmeny merateľných veličín.

4.2.1 Pokus V1

Prvým z vykonávaných experimentov je zmena otvorenia ventilu V1 pri zatvorenom ventile V23 a konštantnej frekvencii čerpadla, tak ako je to zapísané v pláne experimentu v tabuľke 4.5.

Časy v tejto tabuľke sú len orientačné, v zázname experimentu, ktorý pozostáva z grafov závislosti meraných veličín od času, je zmena zaznamenaná pri presnom čase.

t_p/min	Otvorenie V1	Otvorenie V23	f_c/Hz
0	20%	0	20
5	5%	0	20
8	10%	0	20
12	8%	0	20
15	13%	0	20
18	4%	0	20
22	STOP TIME		

Tabuľka 4.5: Plán experimentu V1

Tieto výsledky spolu s časovou závislosťou otvorenia ventiliu V1 sa nachádzajú na obrázkoch 4.1 a 4.2.

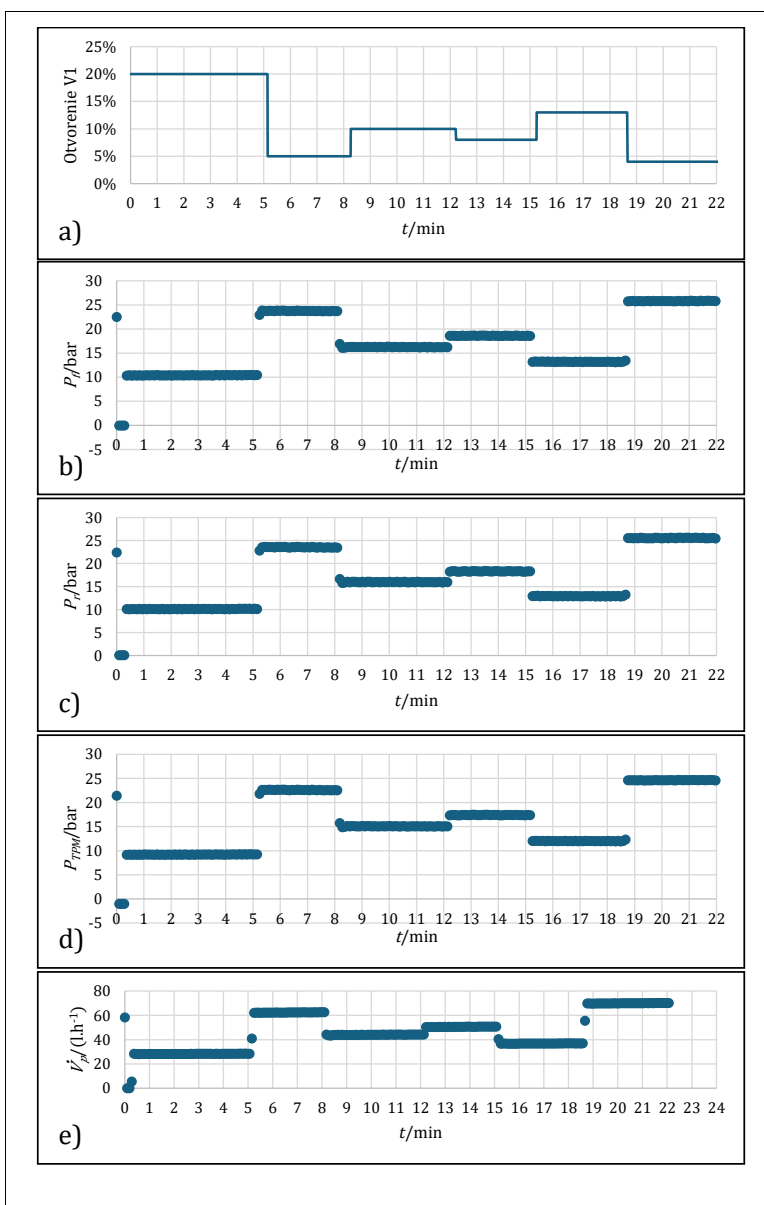
Ná základe týchto údajov môžeme skonštatovať tieto dôležité postrehy, a to, že znížením otvorenia ventiliu V1:

- tlak v nádrži, tlak retentátu a transmembránový tlak sa zvýšia,
- objemový prietok permeátu sa zvýši,
- objemový prietok retentátu sa zníži,
- konduktivita permeátu sa zníži, oproti iným reakciám je však táto zmena minimálna,
- konduktivita retentátu sa zvýši, vzhľadom na kvalitu meracieho prístroja a zhotoveného záznamu však nemožno túto informáciu jednoznačne potvrdiť,
- teplota permeátu a retentátu počas celého experimentu konštantne stúpa a otváranie ventiliu ju výrazne neovplyvňuje, mohli by sme však tvrdiť, že rast je v prípade menšieho otvorenia ventiliu o niečo rýchlejší.

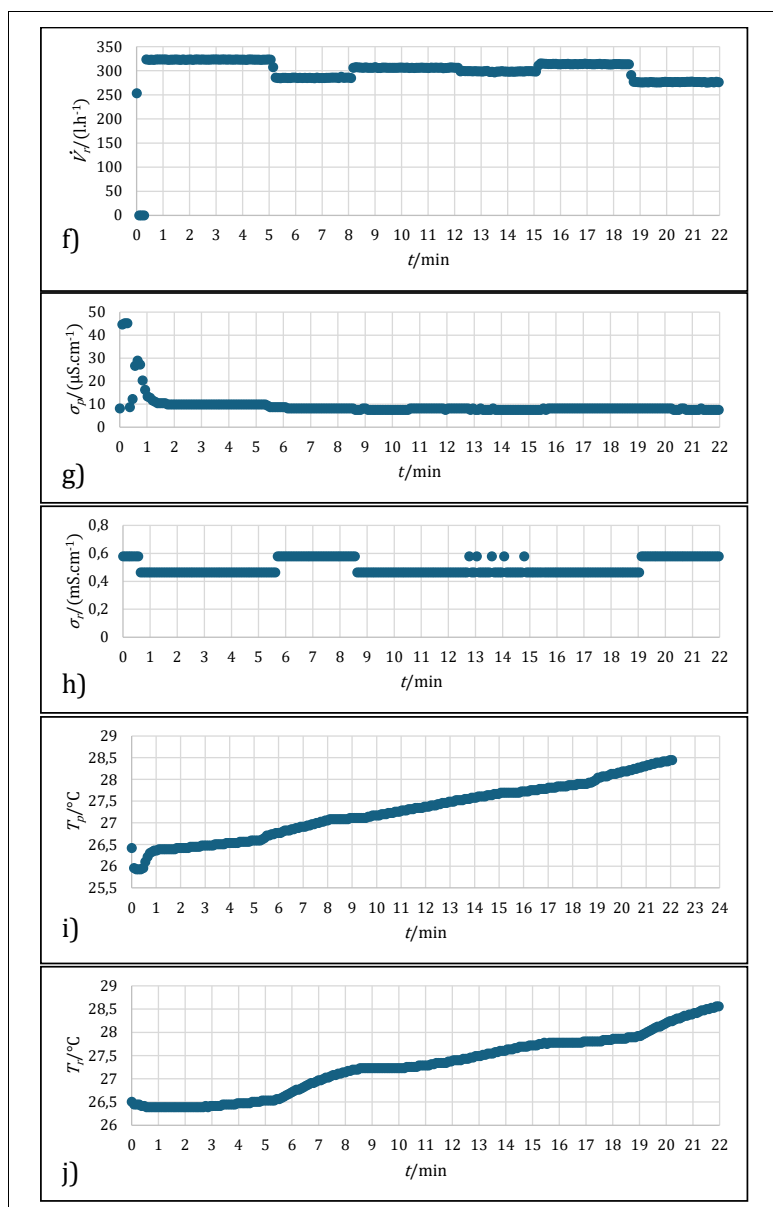
V prípade zvýšenia otvorenia ventiliu V1 dochádza k opačným javom.

4.2.2 Pokus V23

Ďalším pokusom je zmena otvorenia ventiliu V23, keď máme počas celého pokusu rovnako otvorený ventil V1 a pri konštantnej frekvencii čerpadla, tak ako je to zapísané v pláne experimentu v tabuľke (4.6).



Obr. 4.1: Grafy časovej závislosti počas pokusu V1: a) otvorenia ventilu V1, b) tlaku vody v nádrži, c) tlaku renentátu, d) transmembránového tlaku a e) objemového prietoku permeátu



Obr. 4.2: Grafy časovej závislosti počas pokusu V1: f) objemového prietoku retentátu, g) konduktivity permeátu, h) konduktivity retentátu, i) teploty permeátu a j) teploty retentátu

t_p/min	Otvorenie V1	Otvorenie V23	$f_{\dot{c}}/\text{Hz}$
0	5%	5%	20
35	5%	2%	20
95	5%	6%	20
130	5%	5%	20
160	STOP TIME		

Tabuľka 4.6: Plán experimentu V23

Časy v tejto tabuľke sú len orientačné, v zázname experimentu, ktorý pozostáva z grafov závislosti meraných veličín od času, je zmena zaznamenaná pri presnom čase. Tieto výsledky sa nachádzajú na obrázkoch 4.3 a 4.4.

Ná základe týchto údajov môžeme skonštatovať tieto dôležité postrehy, a to, že zvýšením otvorenia ventilu V23:

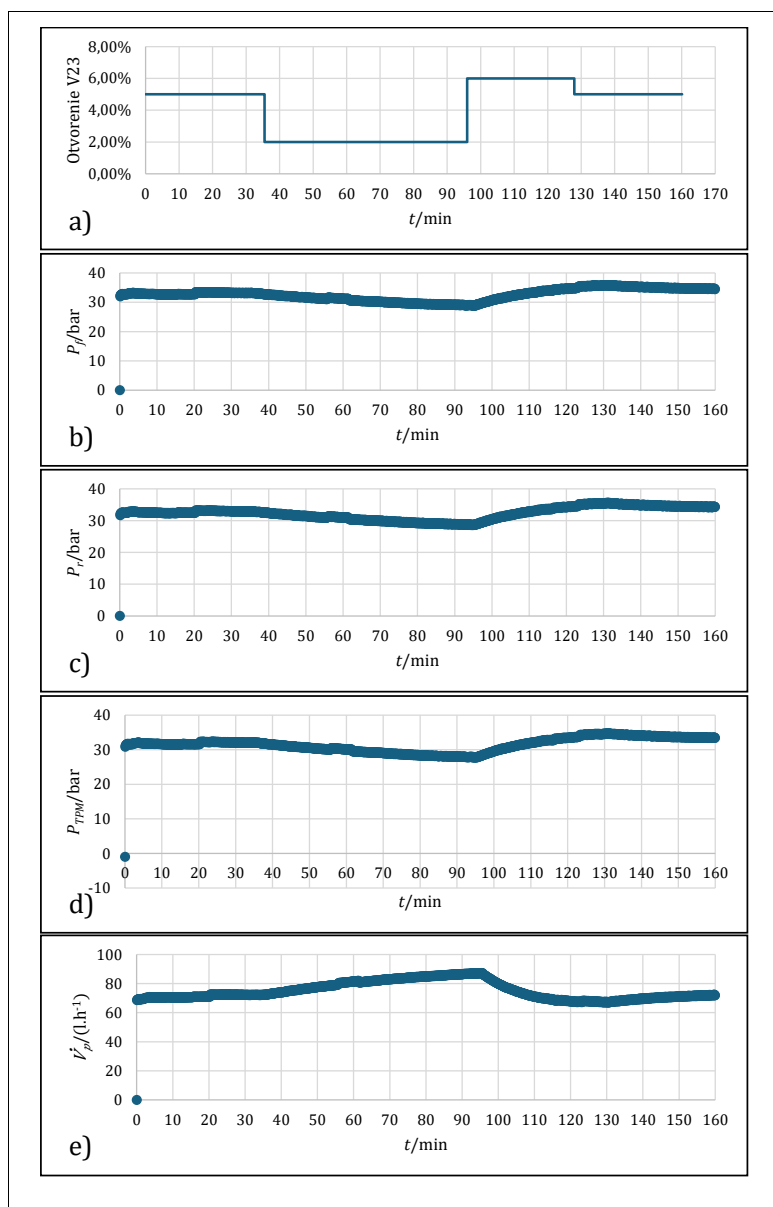
- tlak v nádrži, tlak retentátu a transmembránový tlak sa znížia,
- objemový prietok permeátu sa zvýši,
- objemový prietok retentátu sa zníži,
- konduktivita permeátu sa zníži, oproti iným reakciám je však táto zmena minimálna,
- konduktivitu retentátu nemožno zo zhotoveného záznamu jednoznačne vyhodnotiť vzhľadom na kvalitu meracieho prístroja, tendencia ale vyzerá ako pokles,
- teplota permeátu a teplota retentátu poklesnú.

V prípade zníženia otvorenia ventilu V23 dochádza k opačným javom.

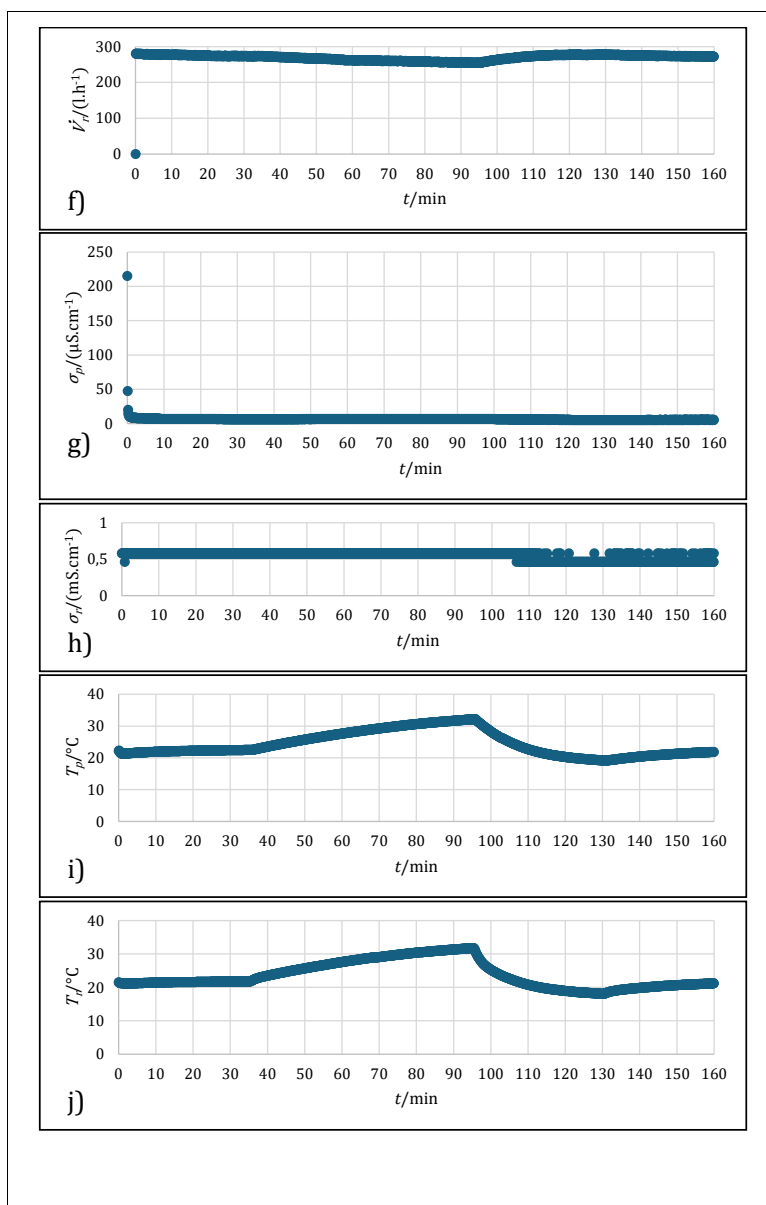
4.2.3 Pokus Čerpadlo

Posledným pokusom z tejto série experimentov je zmena otáčok čerpadla, keď máme počas celého pokusu stále rovnako otvorený ventil V1 a stále rovnako otvorený ventil V23, tak ako je to zapísané v pláne experimentu v tabuľke (4.7).

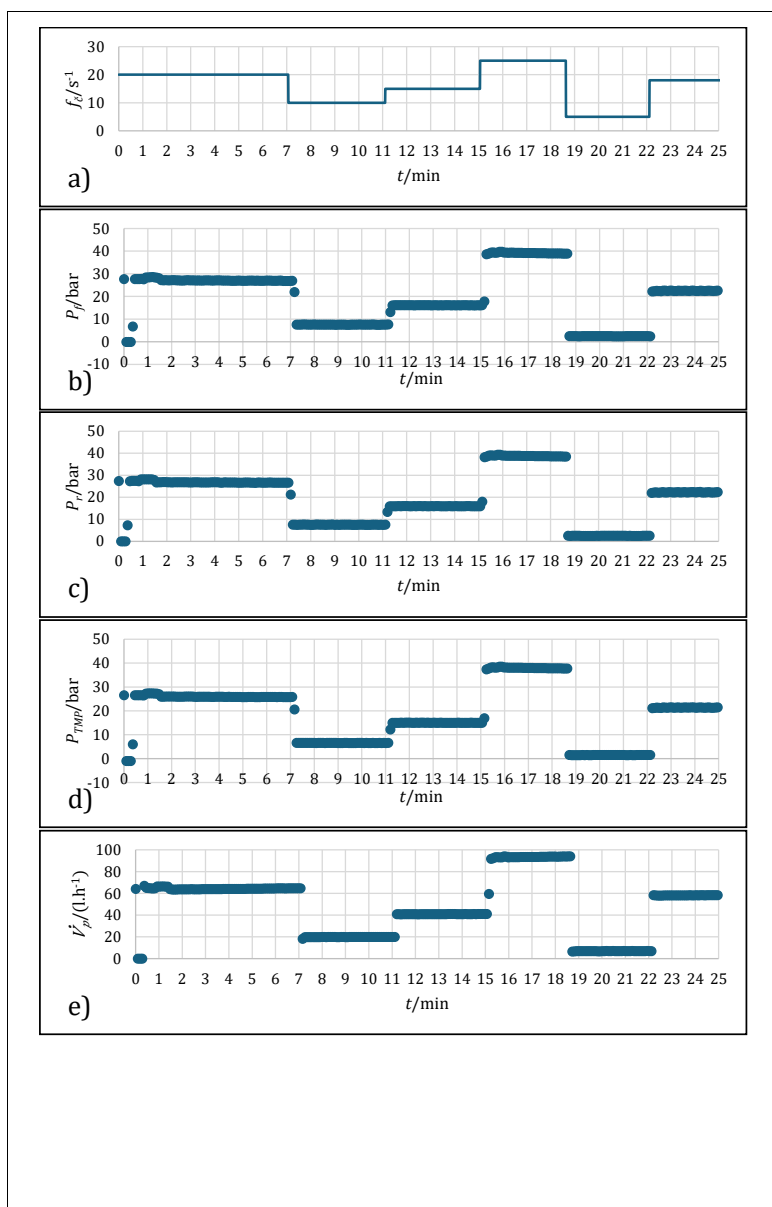
Časy v tejto tabuľke sú len orientačné, v zázname experimentu, ktorý pozostáva z grafov závislosti meraných veličín od času, je zmena zaznamenaná pri presnom čase. Tieto výsledky sa nachádzajú na obrázkoch (4.5) a (4.6).



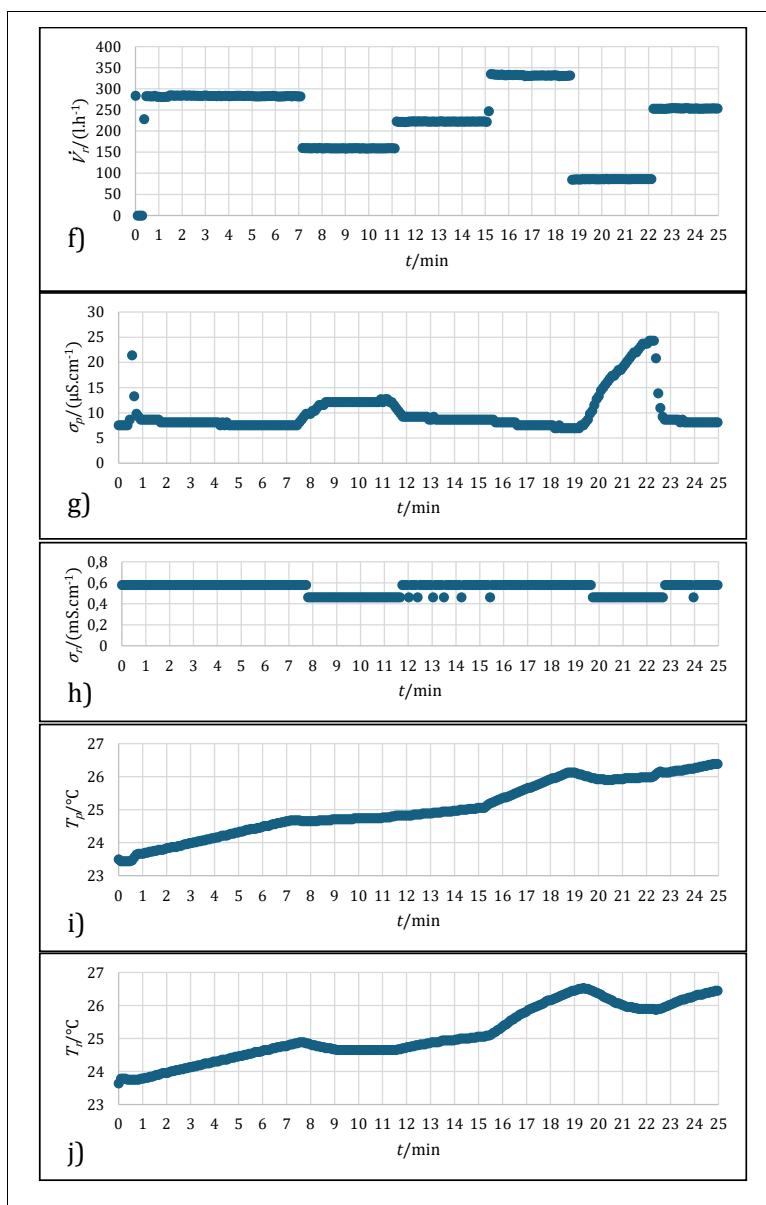
Obr. 4.3: Grafy časovej závislosti počas pokusu V23: a) otvorenia ventilu V23, b) tlaku vody v nádrži, c) tlaku retenantu, d) transmembránového tlaku a e) objemového prietoku permeátu



Obr. 4.4: Grafy časovej závislosti počas pokusu V23: f) objemového prietoku retentátu, g) konduktivity permeátu, h) konduktivity retentátu, i) teploty permeátu a j) teploty retentátu



Obr. 4.5: Grafy časovej závislosti počas pokusu Čerpadlo: a) frekvencie čerpadla, b) tlaku vody v nádrži, c) tlaku retenantu, d) transmembránového tlaku a e) objemového prietoku permeátu



Obr. 4.6: Grafy časovej závislosti počas pokusu Čerpadlo: f) objemového prietoku retentátu, g) konduktivity permeátu, h) konduktivity retentátu, i) teploty permeátu a j) teploty retentátu

t_p/min	Otvorenie V1	Otvorenie V23	f_c/Hz
0	5%	0	20
7	5%	0	10
11	5%	0	15
15	5%	0	25
18,5	5%	0	5
22	5%	0	18
25	STOP TIME		

Tabuľka 4.7: Plán experimentu Čerpadlo

Ná základe týchto údajov môžeme skonštatovať tieto dôležité postrehy, a to, že zvýšením otáčok čerpadla:

- tlak v nádrži, tlak retentátu a transmembránový tlak sa zvýšia,
- objemový prietok permeátu sa zvýši,
- objemový prietok retentátu sa zvýši,
- konduktivita permeátu sa zníži,
- konduktivitu retentátu nemožno zo zhotoveného záznamu jednoznačne vyhodnotiť vzhľadom na kvalitu meracieho prístroja, tendencia ale vyzerá ako pokles,
- teplota permeátu a teplota retentátu sa zvýšia.

V prípade zníženia otáčok čerpadla dochádza k opačným javom.

4.3 Zisťovanie parametrov prenosových funkcií

Našou nasledujúcou úlohou bude nájsť dostačujúci matematický opis závislostí výstupných od vstupných veličín, aby sme mohli pre procesy navrhnúť vhodné regulátory. Pre náš záujem sú dôležité veličiny tlak a teplota – ako vieme a ako sa nám potvrdilo v predchádzajúcich experimentoch, transmembránový tlak dokážeme meniť pomocou otvorenia ventilu V1 a teplotu retentátu (a aj permeátu) dokážeme meniť pomocou ventilu V23. Týmto ventilom (V23) sústavu ochladzujeme, pričom opačne pôsobí čerpadlo (prácou dodáva vode energiu).

Vytvoríme prenosové a prechodové funkcie pre tlak od $V1$ a teplotu od $V23$. Ak budeme uvažovať, že v našej pracovnej oblasti hodnôt tlakov a teplôt sa sústava správa ako kvázi-lineárna, a že výstup závisí len od pôvodného stavu sústavy a zmeny, ktorú vykonáme, môžeme pre opis jednotkového skoku použiť vzťahy pre lineárny systém 1. rádu (2.12) a (2.14). Či sú tieto rovnice dostačujúce aj prakticky nám môže potvrdiť návrh regulátorov a následné spätnoväzbové riadenie.

Ďalším krokom je hľadanie parametrov tejto rovnice: časovej konštanty T a zosilnenia Z . Pre určenie koeficientov exponenciálnej závislosti bude nutné použiť nástroje nelineárnej regresie. Zvoľme si nástroj Riešiteľ v programe Excel, pri ktorom postupujeme podľa obrázka 3.5.

Vezmeme údaje, ktoré potrebujeme pre regresiu - teda údaje z grafu d) na obrázku 4.1 a grafu j) na obrázku 4.4. Prenosová a prechodová charakteristika opisujú jednotkový skok, preto musíme:

1. V Exceli vytvoriť viacero tabuliek a do každej tabuľky rozdeliť údaje o jednotlivých skokoch, ktoré sme v rámci pokusu robili.
2. Upraviť časy tak, že od každého reálneho času odpočítame reálny čas skokovej zmeny, aby čas skokovej zmeny bol práve nulový (tomto čase totiž začína skok pre matematické vyjadrenie (2.14)).
3. Zadefinujeme si čo pre nás vlastne bude jednotková zmena (keďže sme počas pokusu uskutočňovali rôzne veľké zmeny), a podľa toho upravíme experimentálne funkčné hodnoty - ak budeme uvažovať ako jednotkovú skokovú zmenu otvorenie ventilu z 0 na 100%, potom je potrebné všetky experimentálne funkčné hodnoty vydeliť zmenou otvorenia ventilu pri danom skoku.
4. Vykonáme regresiu tak ako je uvedené v metodológii (obrázok 3.5).

Nevyhnutnou podmienkou pre tento postup je počiatočný ustálený stav opisovanej sústavy, aby bola derivácia výstupnej veličiny a tým aj počiatočná podmienka nulové. Ten je v prípade tlakových zmien splnený pre každý skok. Postupujeme podľa vyššie uvedených krokov - v prípade 4. kroku môžeme uskutočniť samotnú regresiu dvoma spôsobmi:

1. Pre každý skok zistíme zvlášť parametre zosilnenia a časovej konštanty, aby sme vedeli jednotlivé výsledky z každého skoku porovnať.

Skok	Z otvorenia ventilu V1	Na otvorenie ventilu V1	Rozdiel otvorení	Z/bar	T/min
1	20%	5%	-0,15	-89,12	0,032
2	5%	10%	0,05	-149,54	0,036
3	10%	8%	-0,02	-118,40	0,024
4	8%	13%	0,04	-107,55	0,005
5	13%	4%	-0,1	-136,93	0,005
Spoločná regresia:				-122,30	0,031

Tabuľka 4.8: Výsledky nelineárnej regresie parametrov prenosovej a prechodovej funkcie lineárneho systému prvého rádu pre tlakové zmeny vyvolané zmenou otvorenia ventilu V1

2. Pre všetky skoky urobíme spoločnú regresiu - zvolíme len jedno spoločné zosilnenie a jednu spoločnú časovú konštantu - takto dostaneme najpresnejšie hodnoty pre všeobecný jednotkový skok.

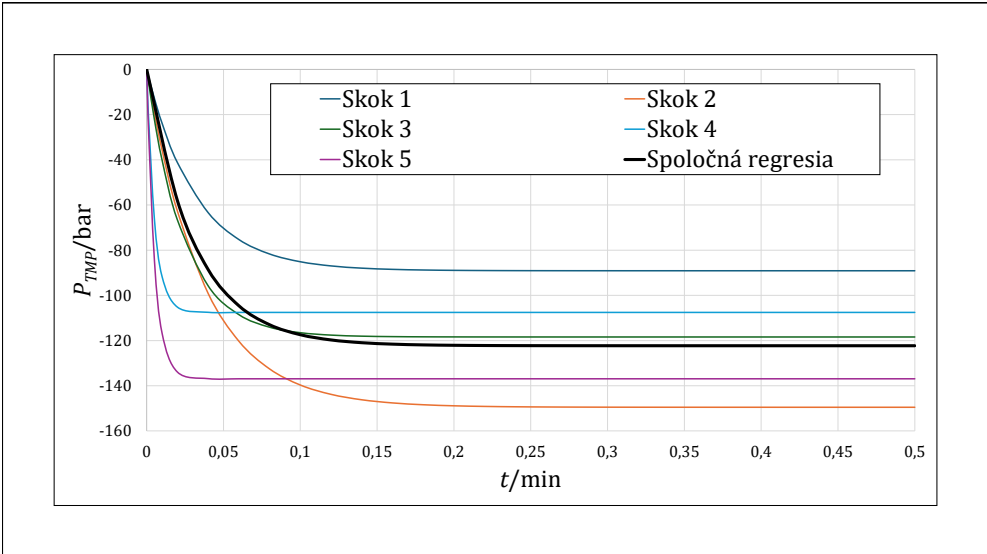
Hodnoty, ktoré sme získali pomocou riešiteľa sú v tabuľke 4.8. Pre všetky závislosti s jednotlivými parametrami urobíme prechodové charakteristiky. Tie sú na obrázku 4.7. Môžeme vidieť, že aj keď sme použili opis lineárneho systému 1. rádu pre kvázi-lineárny systém v danom skúmanom rozsahu, v dôsledku nelinearity existujú medzi jednotlivými skokmi isté rozdiely. To samozrejme môže mať dopad pre zhoršenie kvality riadenia regulátormi navrhnutými pre práve lineárne systémy. Samotný výsledok dokážeme rozpoznať až pri skutočnom testovaní regulátorov.

Regresia pre teplotné zmeny bude trochu komplikovanejšia, keďže tieto experimenty boli časovo náročné a z tohto dôvodu sme nie po každom skoku dosiahli ustálený stav - pri Laplaceovej transformácii pôvodnej diferenciálnej rovnici (2.8) sme totiž uvažovali nulové počiatkové podmienky pre ustálený stav. Preto všetky nasledujúce rovnice musíme upraviť tak, že budeme brať do úvahy aj nenulovú počiatkovú podmienku. Riešme teda pôvodnú diferenciálnu rovnicu s touto úvahou, a to pomocou LT, rozkladu na parciálne zlomky a spätnou Laplaceovou transformáciou LT^{-1} :

$$Ty'(t) + y(t) = Zu(t) \quad /LT \quad (4.12)$$

$$T(sY(s) - y_0) + Y(s) = Z\Delta u \frac{1}{s} \quad (4.13)$$

$$Y(s) = \frac{Z\Delta u}{s(Ts + 1)} + \frac{Ty_0}{Ts + 1} \quad (4.14)$$



Obr. 4.7: Výsledné prechodové charakteristiky funkcií lineárneho systému prvého rádu pre tlakové zmeny ventilom V1

$$Y(s) = \frac{Z\Delta u/T}{s(s+1/T)} + \frac{y_0}{s+1/T} = \frac{K_1}{s} + \frac{K_2}{s+1/T} + \frac{y_0}{s+1/T} \quad (4.15)$$

$$(Z\Delta u/T = K_1(s+1/T) + K_2s) \Rightarrow (K_1 = Z\Delta u \wedge K_2 = -Z\Delta u) \quad (4.16)$$

$$Y(s) = \frac{Z\Delta u}{s} - \frac{Z\Delta u}{s+1/T} + \frac{y_0}{s+1/T} \quad /LT^{-1} \quad (4.17)$$

$$y(t) = Z\Delta u(1 - e^{-t/T}) + y_0e^{-t/T} \quad (4.18)$$

Ďalej môžeme pre teplotné skoky postupovať analogicky ako sme postupovali pre tlakové zmeny, len v prípade skoku z neustáleného stavu používame novoodvodenú rovnicu (4.18). Dôležité je poznamenať to, že kvôli prítomnosti hodnoty y_0 je nutné uvažovať z odchýlkovými veličinami v pôvodnom tvare, a teda Δu ako sa počíta ako rozdiel aktuálneho otvorenia ventilu a pôvodného otvorenia ventilu, nie otvorenia ventilu z predchádzajúceho skoku. Hodnoty, ktoré sme získali pomocou riešiteľa sú v tabuľke 4.9. Pre všetky závislosti s jednotlivými parametrami vypracujeme prechodové charakteristiky. Tie sú na obrázku 4.8. Môžeme vidieť, že aj keď sme použili opis lineárneho systému 1. rádu, existujú medzi jednotlivými skokmi rozdiely, v tomto prípade výraznejšie ako pri tlakových zmenách. Dôvody sú analogické ako pri tlakových zmenách, väčšia výraznosť zmien pri teplotných zmenách nám teda hovorí o väčšej nelinearite a menšej kvázi-linearite systému. Je zaujímavé, že výsledok spoločnej

Skok	Z otvorenia ventilu V23	Na otvorenie ventilu V23	Rozdiel otvorení	Z/°C	T/min
1	5%	2%	-0,03	-425,63	40,23
2	2%	6%	0,04 (oproti pôvodnému 0,01)	-350,97	7,92
3	6%	5%	-0,01 (oproti pôvodnému 0)	-350,97	15,64
Spoločná regresia:				-421,70	39,57

Tabuľka 4.9: Výsledky nelineárnej regresie parametrov prenosovej a prechodovej funkcie lineárneho systému prvého rádu pre teplotné zmeny vyvolané zmenou otvorenia ventilu V23

regresie pripomína výsledok regresie pre prvý skok. Dôvodom tohto fenoménu môže byť okrem toho, že hodnoty tohto skoku lepšie zapadajú do použitej závislosti, aj rôzna časová dĺžka jednotlivých skokov.

4.4 Návrh regulátorov

Máme procesy (V1- P_{TMP}) a (V23- T_r). Zavedme pred ne regulátory.

Pre URO platí rovnica (2.15). Zároveň pre oba procesy platí rovnica (2.12), kde sme konkrétne parametre pre ne získali nelineárnou regresiou. Vzhľadom na jednoduchosť lineárneho modelu 1. rádu navrhujeme regulátor tak, aby aj samotný URO bol takýmto systémom. Potom preňho môžeme taktiež zdefinovať zosilnenie a časovú konštantu:

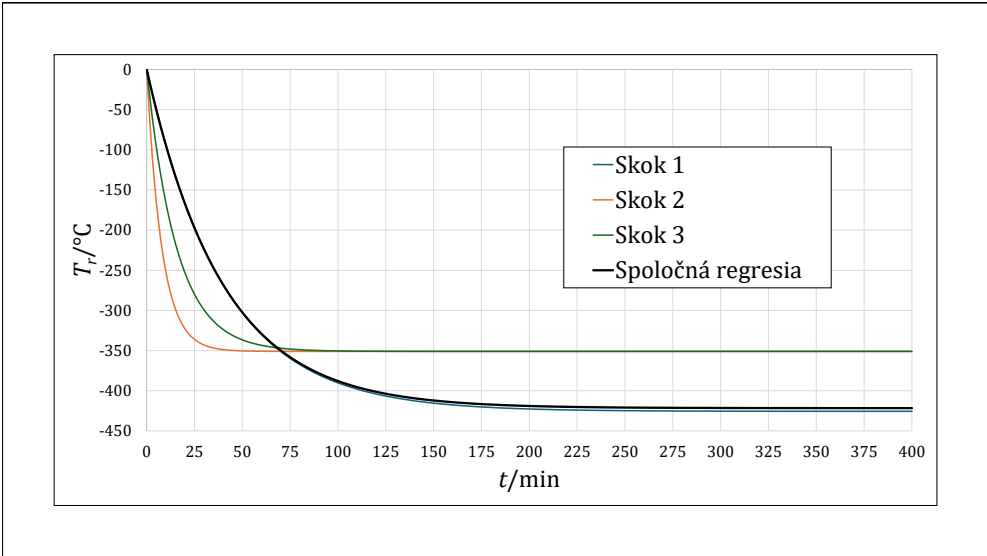
$$G_{URO} = \frac{Z_{URO}}{T_{URO}s + 1} = \frac{1}{T_{URO}s + 1} \quad (4.19)$$

Keďže v konečnom dôsledku potrebujeme, aby sa výstupná veličina URO rovnala požadovanej veličine, ktorá je vstupnou veličinou do URO, zosilnenie URO musí byť rovné jednej. Spojením vzťahov (2.15), (2.12) a (4.19) dostaneme:

$$\frac{G_{\text{regulátor}} \frac{Z}{T_{s+1}}}{1 + G_{\text{regulátor}} \frac{Z}{T_{s+1}}} = \frac{1}{T_{URO}s + 1} \quad (4.20)$$

Otočením rovnice a úpravou zlomku dostávame v rovnici iba jedno $G((\text{regulátor}))$, ktoré si vyjadríme:

$$\frac{1 + G_{\text{regulátor}} \frac{Z}{T_{s+1}}}{G_{\text{regulátor}} \frac{Z}{T_{s+1}}} = T_{URO}s + 1 \quad (4.21)$$



Obr. 4.8: Výsledné prechodové charakteristiky funkcií lineárneho systému prvého rádu pre teplotné zmeny ventilom V23

$$\frac{1}{G_{\text{regulátor}} \frac{z}{T_s+1}} + 1 = T_{\text{URO}} s + 1 \quad (4.22)$$

$$\frac{1}{G_{\text{regulátor}} \frac{z}{T_s+1}} = T_{\text{URO}} s \quad (4.23)$$

$$G_{\text{regulátor}} = \frac{T_s + 1}{z T_{\text{URO}} s} = \frac{T}{z T_{\text{URO}}} + \frac{1}{z T_{\text{URO}} s} \quad (4.24)$$

Za prenos regulátora dosadíme jeho definičný vzťah a vyjadríme si výstupnú veličinu v časovej oblasti:

$$\frac{U(s)}{O(s)} = \frac{T}{z T_{\text{URO}}} + \frac{1}{z T_{\text{URO}} s} \Rightarrow U(s) = \frac{O(s)T}{z T_{\text{URO}}} + \frac{O(s)}{z T_{\text{URO}} s} \quad / \text{LT}^{-1} \quad (4.25)$$

Vo výsledku dostávame vzťah, ktorý hovorí o tom, že sme dostali PI regulátor, pretože ako definícia hovorí, prvý člen predstavuje proporcionálnu zložku a druhý integračnú:

$$u(t) = \frac{T}{z T_{\text{URO}}} o(t) + \frac{1}{z T_{\text{URO}}} \int_0^t e^{t} dt = P o(t) + I \int_0^t e^{t} dt \quad (4.26)$$

Jedinou premennou v tomto vzťahu je T_{URO} . V tejto práci vyskúšajme taký regulátor, v ktorom sa rovná T_{URO} práve časovej konštante procesu T , v tabulke 4.10 sú následne dopočítané jednotlivé zložky regulátora:

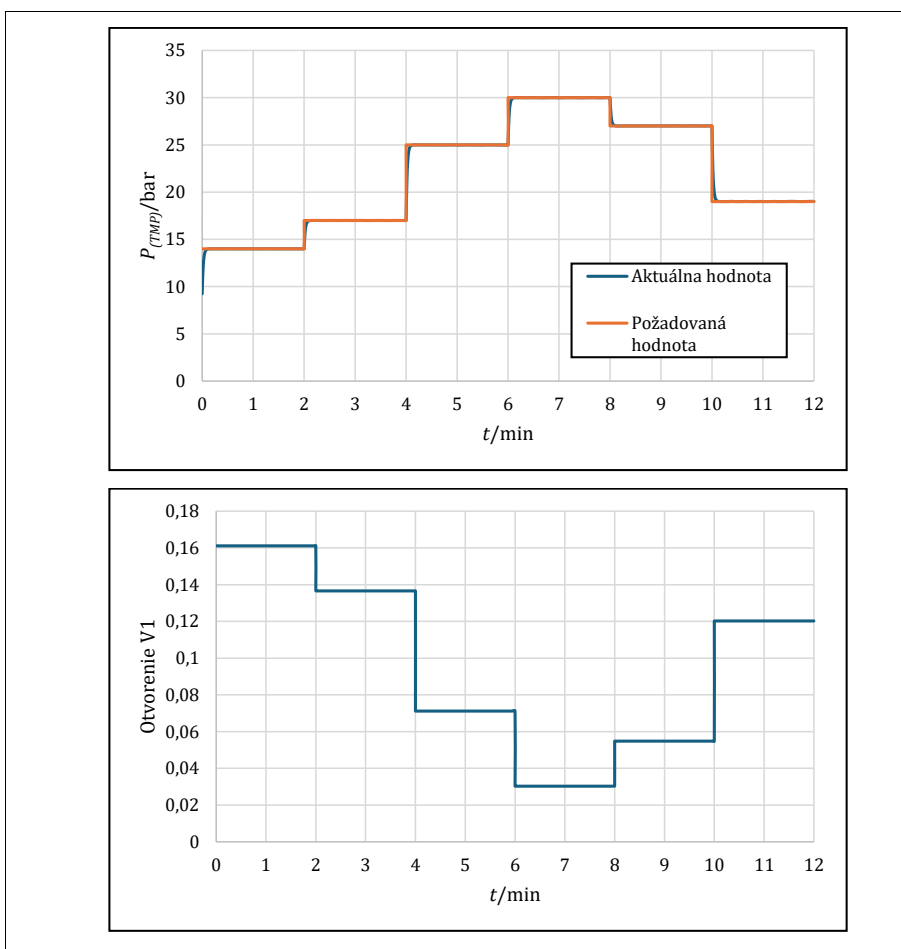
V prostredí Simulink vieme aj za relatívne krátky čas simulovať veľmi dlhé procesy, preto, najmä pri regulácii teploty, môžeme zadávať medzi jednotlivými skokmi dlhé časové medzery. Nie však prídlhé, aby sme nezaznamenávali zbytočné dáta, keď už bude riadená veličina dávno ustálená. V prípade potreby vieme zmeniť tieto nastavenia a simuláciu spustiť znovu s novými časmi. Takto vieme predpovedať, čo môžeme očakávať od skutočného procesu.

Pre regulátor tlaku použijeme ustálené hodnoty $P_{TMP}^* = 9,24435$ bar pri otvorení $V1 = 0,2$, ktoré poznáme z predchádzajúcich experimentov. Na obrázku 4.10 sú zaznamenané grafy závislostí troch vyššie spomenutých výstupov od času pre jednotlivé regulátory tlaku. Pre regulátor teploty použijeme ustálené hodnoty $T_r^* = 21,7593$ °C pri otvorení $V23 = 0,05$. Na obrázku 4.11 sú zaznamenané grafy závislostí troch vyššie spomenutých výstupov od času pre jednotlivé regulátory teploty. Môžeme zhodnotiť, že v simulácii regulátory fungujú správne a efektívne. Voľba $T_{URO} = T$ teda predstavuje pri regulácii dobrý balans.

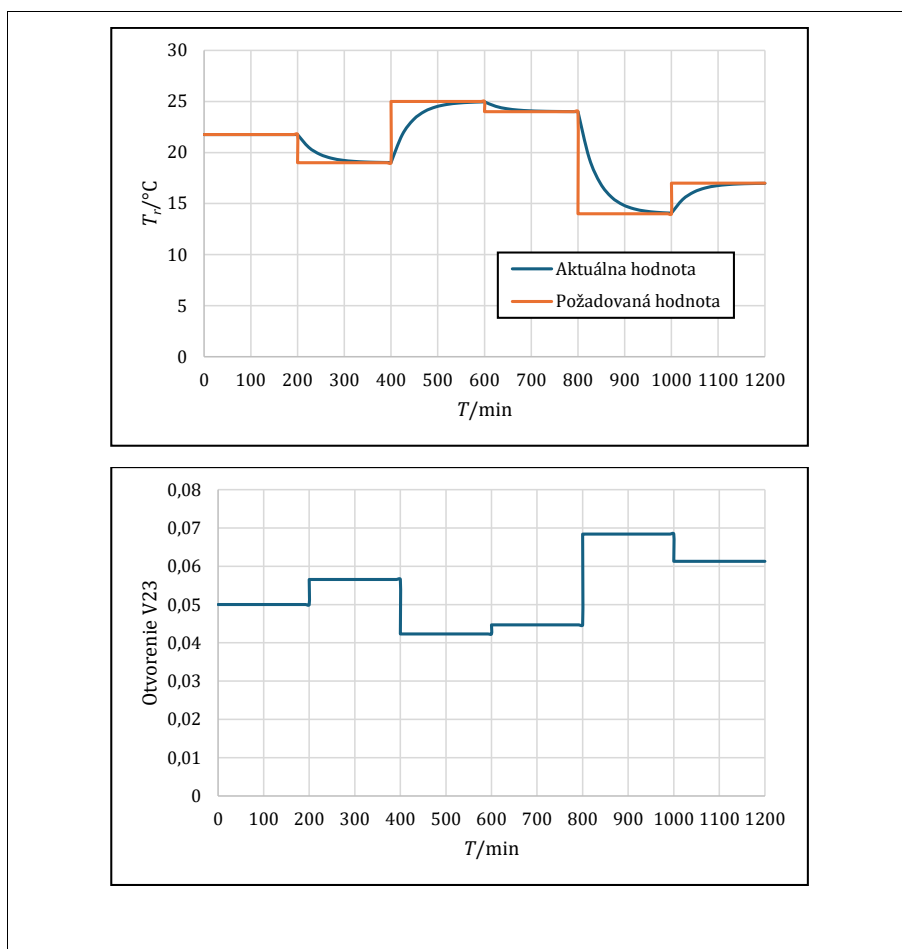
4.4.2 Testovanie na skutočnom zariadení

Po simulačnom vyskúšaní regulátorov môžeme prejsť na skutočné zariadenie. Existujú rozdiely medzi schémou pre simuláciu na obrázku 4.9 a schémou pre reálny proces – do bloku vytvárajúceho regulačnú odchýlku nám vstupuje skutočná hodnota nameraná snímačom vo vsádzkovej stanici, a z regulátora máme jeden výstup, ktorým sa riadi otvorenie ventilu. Tak isto je dôležité upriamiť pozornosť na tieto dve skutočnosti, a to že v skutočnosti potrebujeme premeniť jednotky času na sekundy, pretože v týchto jednotkách pracuje samotná stanica, a že snímače neudávajú otvorenie ventilu v intervale od 0 po 1 (100%), ale od 0 po 100, preto je potrebné vynásobiť hodnoty otvorenia v schéme koeficientom 100. Zaznamenávame žiadanú veličinu a skutočnú hodnotu veličiny. Nevieme zaznamenávať otvorenie ventilu. Prepojenie so zariadením prebieha cez špeciálne prepojenie počítača a stanice.

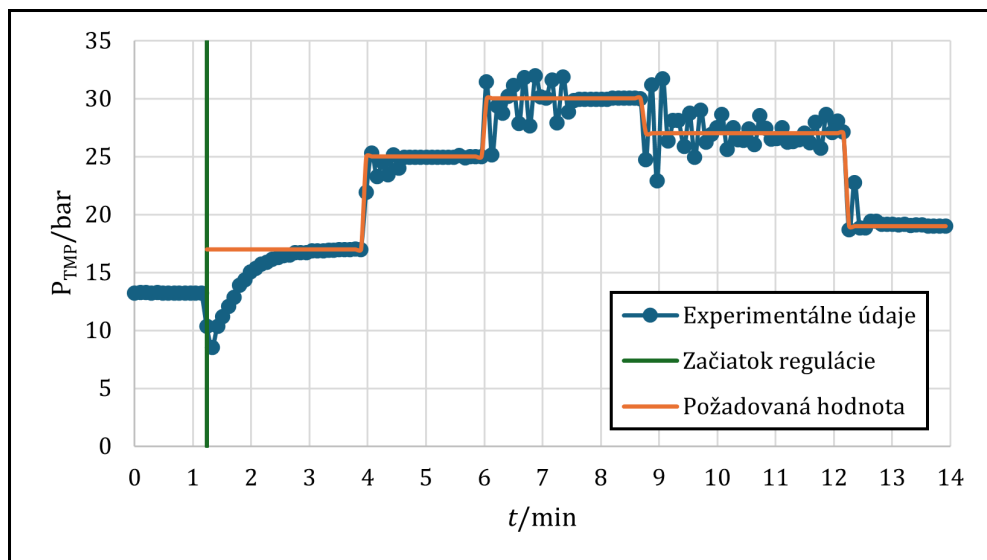
Na obrázku 4.12 sú zaznamenané grafy závislostí vyššie spomenutých výstupov od času pre regulátory tlaku, tentokrát pre skutočný proces. Analogicky na obrázku 4.13 sú zaznamenané grafy závislostí pre jednotlivé regulátory teploty. Vidíme, že aj keď sme spomínali, že v procesoch sa objavuje určitá nelinearita, a aj keď skutočné regulácie presne neopisujú tie sumulačné, regulátory fungujú a dokážu ustáliť výstupné veličiny na alebo v zanedbateľnej blízkosti požadovanej hodnoty. Tento experiment nám opäť potvrdzuje, že pre proces ($V1-P_{TMP}$) nám lineárne opisy vyhovujú viac ako pre proces ($V23-T_r$), keďže v porovnaní s časovou konštantou procesu sa nám hodnoty výstupnej veličiny na žiadanej hodnote ustálili skôr.



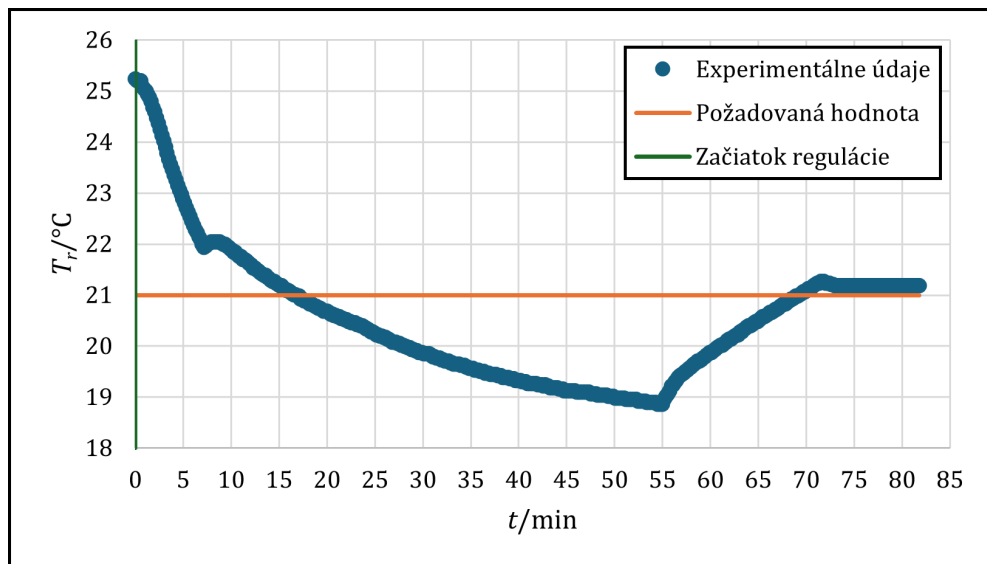
Obr. 4.10: Grafické závislosti transmembránového tlaku a otvorenia V1 od času s použitím regulátora v simulácii



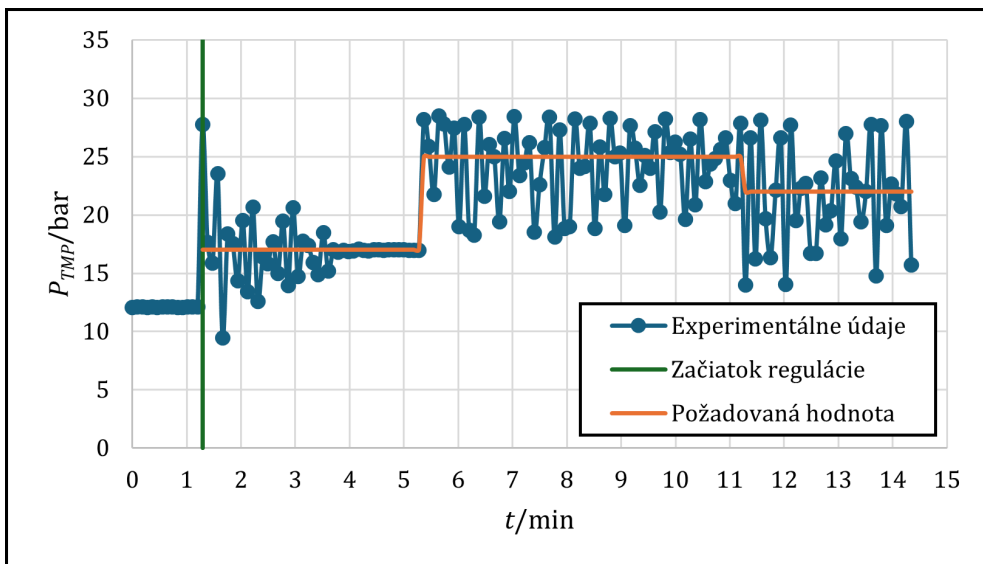
Obr. 4.11: Grafické závislosti teploty retentátu a otvorenia V23 od času s použitím regulátora v simulácii



Obr. 4.12: Graf závislosti transmembránového tlaku od času pri riadení regulátorom otvorenia ventilu V1



Obr. 4.13: Graf závislosti teploty retentátu od času pri riadení regulátorom otvorenia ventilu V23

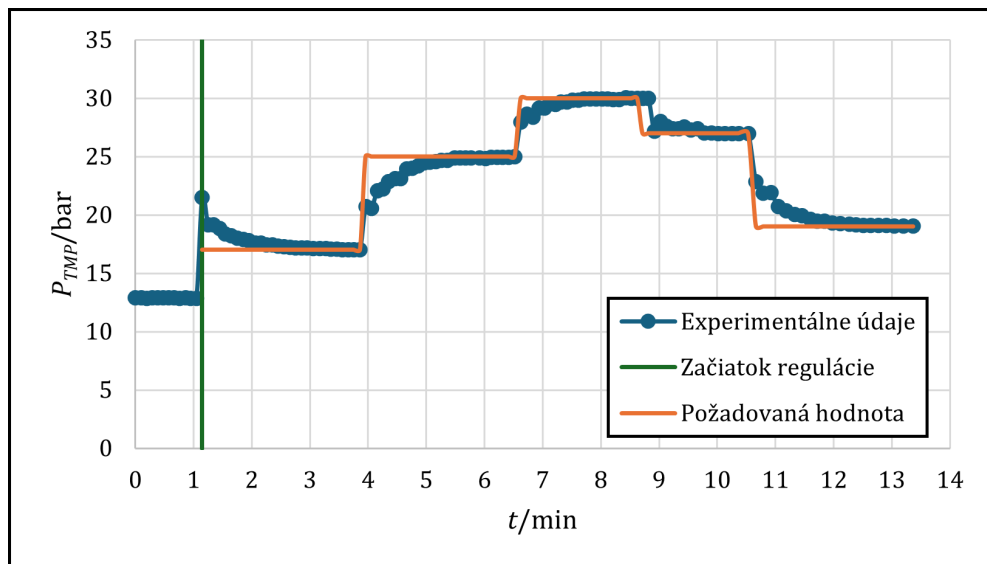


Obr. 4.14: Graf závislosti transmembránového tlaku od času pri riadení regulátorom otvorenia ventilu V1 s násobkom proporcionálnej zložky 2

4.4.3 Experimentovanie s proporcionálnou zložkou regulátorov

V záverečnom pokuse praktickej časti sa pozrieme na to, ako vplýva proporcionálna zložka PI regulátora na riadenie procesu. Vynásobíme propočné zložky regulátorov P koeficientom alebo 0,5 a pozrieme sa na zmenu regulácie oproti pôvodným regulátorom. Pracujme na skutočnom zariadení a zachovajme nezmenený postup reálneho riadenia - pozri kapitolu 4.4.2.

Na obrázku 4.14 máme graf popisujúci riadenie transmembránového tlaku regulátorom s proporcionálnou zložkou vynásobenou koeficientom 2 a na obrázku 4.15 graf popisujúci riadenie transmembránového tlaku regulátorom s proporcionálnou zložkou vynásobenou koeficientom 0,5. Vidíme, že zväčšením propočnej zložky stráca systém stabilitu a nedokáže sa ustáliť na požadovanej hodnote výstupnej veličiny, ale v jej okolí výrazne osciluje. Naopak, v prípade vynásobenia P zložky číslom 0,5 dostávame veľmi presný regulátor, pri ktorom dokonca okrem prvého skoku nedochádza ani k preregulovaniu, na druhej strane je ale regulácia pri nižších požadovaných hodnotách o niečo pomalšia oproti pôvodnému regulátoru s $1 \cdot P$. Z toho by sme mohli vyviesť záver, že by bolo pre proces použiť kombináciu práve týchto dvoch regulátorov, pričom pôvodný by sa použil pri nižších tlakoch, a nový, s polovičnou proporcionálnou zložkou, zas pri tých vyšších.

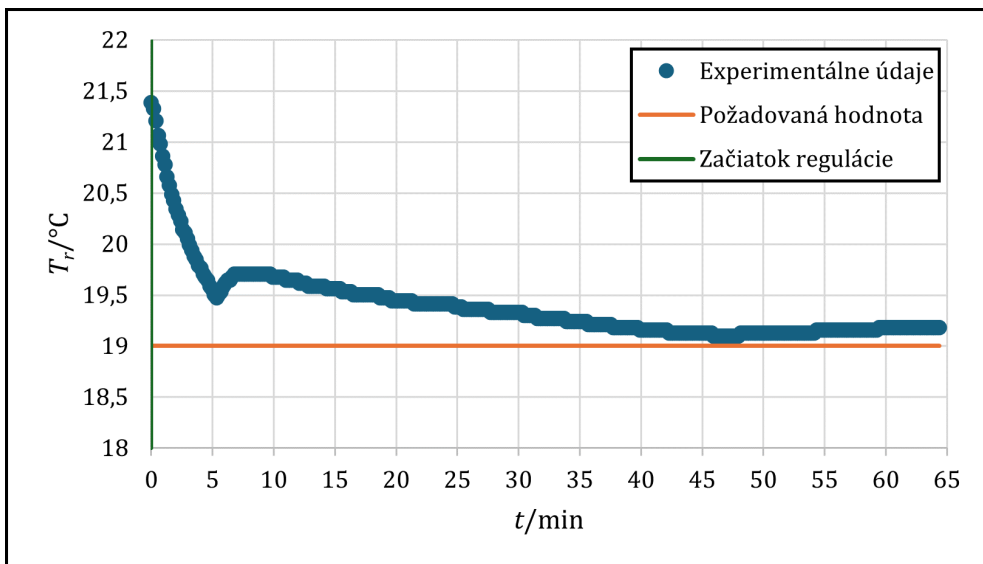


Obr. 4.15: Graf závislosti transmembránového tlaku od času pri riadení regulátorom otvorenia ventilu V1 s násobkom proporčionálnej zložky 0,5

Výrazne lepšie sa vzhľadom k pôvodnému regulátoru teploty, ktorý sme navrhli, správa nový regulátor teploty, ktorého proporčionálnu zložku sme vynásobili koeficientom 2 - viď obrázok 4.16. Všimnime si, že nedochádza k prerégulovaniu a zároveň sme aj znížili dĺžku regulácie. Síce jeho presnosť nie je 100%, odchýlka od požadovanej veličiny je minimálna (pod $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) a riadenie môžeme považovať za dostačujúce. Dôvodom mierne vyššej výstupnej hodnoty ako je požadovaná môže byť práve zvýšenie proporčnej zložky regulátora. Vzhľadom na to, že dĺžka regulácie pôvodného regulátora už aj tak presahovala čas 60 min by nemalo zmysel skúšať regulátor s $0,5.P$.

4.5 Vplyv otvorenia V1 a otáčok čerpadla na spotrebu elektrickej energie

Vo vzťahu (3.1), ktorý hovorí o spotrebe elektrickej energie čerpadla, nám ako premenné vystupujú celkový prietok ($\dot{V}_p + \dot{V}_r$) a p_{TMP} . Preto má zmysel uvažovať do vyhodnocovania elektrickej spotreby čerpadla dáta z pokusov, pri ktorých sme merali skokové zmeny zmenou otvorenia ventilu V1 (kapitola 4.2.1) a zmenou otáčok čerpadla (kapitola 4.2.3). Počas pokusu V23 sme mali otáčky čerpadla konštantné a z experimentu vyplýva, že aj keď sa jednotlivé členy \dot{V}_p a \dot{V}_r počas zmien otvorenia ventilu

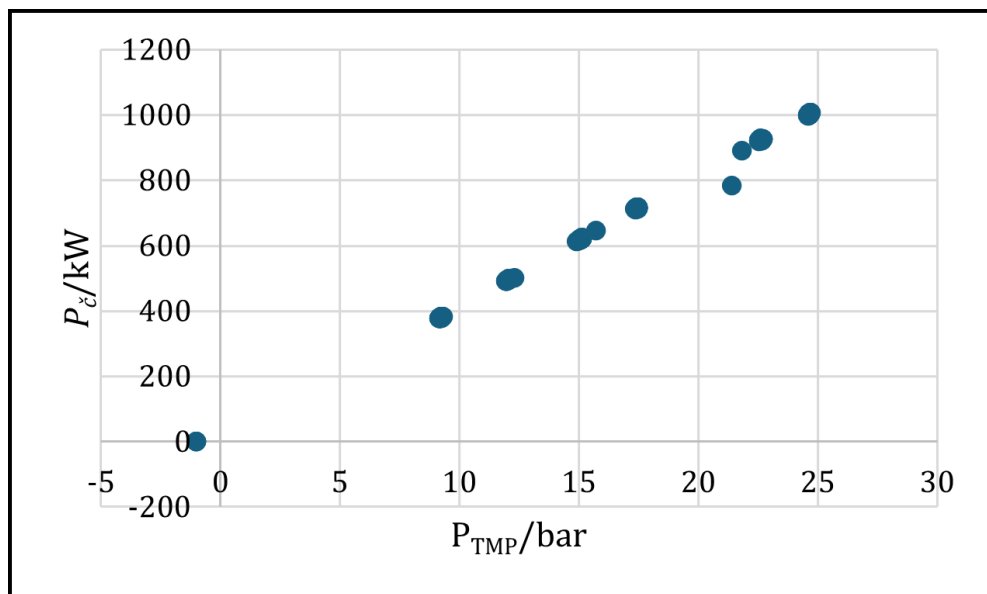


Obr. 4.16: Graf závislosti teploty retentátu od času pri riadení regulátorom otvorenia ventilu V23 s násobkom proporcionálnej zložky 2

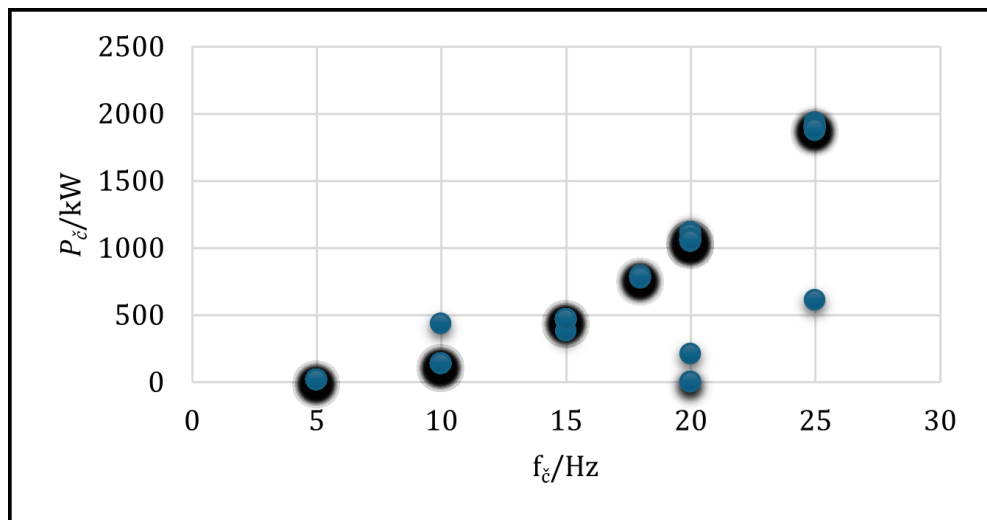
V23 menia, ich súčet počas celého pokusu ostáva takmer konštantný. To v podstate potvrdzuje aj zákon zachovania hmotnosti – pri malom tepelnom rozsahu sa hustota mení minimálne, a zároveň retentát a permeát majú takmer rovnakú hustotu. Jedinou premennou vo vzťahu (3.1) ostal P_{TMP} a závislosť by mala byť lineárna.

V prípade experimentu Čerpadlo sa počas experimentu menia všetky 3 premenné. Ak však uvažujeme, že objemový tok a aj transmembránový tlak sú funkciami otáčok čerpadla, keďže ventil V23, ktorým ich vieme taktiež ovládať, ostáva konštantný, a zároveň tepelný rozsah je minimálny, potom musí byť v konečnom dôsledku spotreba závislá len od otáčok čerpadla. Táto závislosť už však samozrejme nemusí byť lineárna.

Tieto závislosti sme vyznačili na obrázkoch 4.17 a 4.18. V prípade závislosti spotreby od transmembránového tlaku sa nám potvrdila linearita. Závislosť spotreby od frekvencie čerpadla je ťažšie čitateľná. Tento problém spôsobujú výpočty čerpadla na začiatku merania, keď sa čerpadlo zapínalo, a v momentoch zmien otáčok čerpadla, keď už zaznamenávame nastavenú hodnotu otáčok, ale sústava ešte nezareagovala. Pre zlepšenie čitateľnosti tohto grafu sme teda použili v Exceli špeciálne formátovanie grafu, ktorým špeciálnym spôsobom zvýrazníme tie miesta, na ktorých je väčšia koncentrácia funkčných hodnôt. Tak môžeme lepšie vidieť ako sa závislosť správa. Vidíme, že je nelineárna a konkrétne nepoznáme jej predpis. Pohľadom by sa mohlo jednať o poly-



Obr. 4.17: Graf závislosti spotřeby čerpadla od transmembránového tlaku



Obr. 4.18: Graf závislosti spotřeby čerpadla od frekvence čerpadla

nomickú funkciu 2. rádu, pre potvrdenie by sme však potrebovali ďalšie matematické modelovanie.

Záver

V tejto práci sme sa venovali meraniam na vsádzkovej membránovej stanici, hľadaniu matematického modelu pre správanie sa dôležitých veličín v tomto systéme, ako sú tlak a teplota, návrhu regulátorov a vyhodnoteniu z ekonomického pohľadu. Môžeme skonštatovať, že sme boli úspešní, pretože sme dokázali merať a zhodnotiť jednotlivé závislosti, a pretože našim výstupom sú regulátory, ktoré dokážu spätnoväzbovo udržiavať riadené veličiny pri žiadaných hodnotách - aj simulačne, aj reálne. Tieto poznatky sa dajú využiť pre budúce skúmanie a aj pre riadenie reverznej osmózy v priemyselných prevádzkach.

Literatúra

- [1] AC ROSA: *AC ROSA: Vsádzková a membránová procesná stanica – návod na použitie*. 2012.
- [2] Bakošová, M.; Fikar, M.: *Riadenie procesov*. Bratislava, Slovenská republika: STU, 2008, ISBN 978-80-227-2841-6.
- [3] Cabrera, E.; Estrela, T.; Lora, J.: Desalination in Spain. Past, present and future. *La Houille Blanche*, , č. 1, 2019: s. 85–92, doi:10.1051/lhb/2019011, <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/abs/2019/01/lhb2019011/lhb2019011.html>.
- [4] Dojčanský, J.; Longauer, J.: *Chemické inžinierstvo 2*. Bratislava, Slovenská republika: Malé centrum, 2000, ISBN 80-967064-8-9.6.
- [5] Doleček, P.; Jiráňková, H.; Kinčl, J.; a kol.: *Tlakové membránové procesy*. Praha, Česká republika: Vysoká škola chemicko-technologická, 2013, ISBN 978-80-7080-862-7.
- [6] DOW FILMTEC: *DOW FILMTEC™ Membranes: Cleaning Procedures for DOW FILMTEC FT30 Elements*. 2011, <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Cleaning-Procedures-DOW-Filmtec-membranes-L.pdf>.
- [7] Hydra-Cell: *Hydra-Cell Seal-less Pumps: D10 Datasheet*. 2014, <https://www.ewprocess.com/wp-content/uploads/D10-Data-Sheet.pdf>.
- [8] Khairil, D.; Insani, M.; Setiawan, A.; a kol.: Reverse Osmosis (RO) Drinking Water Management as the Best Solution to Overcome the Clean Water Crisis in Pinang Island. *Science and Environmental Journal for Postgraduate*, ročník 6, č. 1, Dec. 2023: s. 254–258, doi:10.24036/senjop.v6i1.212, <http://senjop.ppj.unp.ac.id/index.php/senjop/article/view/212>.
- [9] Kumar, P.; Sharma, N.; Ranjan, R.; a kol.: Perspective of membrane technology in dairy industry: a review. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, ročník 26,

- č. 9, 2013: str. 1347–1358, doi:10.5713/ajas.2013.13082, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4093403/>.
- [10] Liu, H. B.; Li, B.; Guo, L. W.; a kol.: Current and Future Use of Membrane Technology in the Traditional Chinese Medicine Industry. *Separation & Purification Reviews*, ročník 51, č. 4, 2022: s. 484–502, doi:10.1080/15422119.2021.1995875, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15422119.2021.1995875>.
- [11] Martínez, L.: Measuring the conductivity of very dilute electrolyte solutions, drop by drop. *Química Nova*, ročník 41, 07 2018, doi:10.21577/0100-4042.20170216, <https://www.scielo.br/j/qn/a/3hCRZZx6fGQbgc4wvWdHdpGL/?lang=en>.
- [12] Ramkiran, B.: Solar powered Reverse Osmosis - A solution for Energy and Water Crisis. In *2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, 2015, s. 1–6, doi:10.1109/ICIIECS.2015.7193218, <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/conhome/7174422/proceeding>.
- [13] Sanz, M. A.; Miguel, C.: The role of SWRO Barcelona-Llobregat Plant in the water supply system of Barcelona Area. *Desalination and Water Treatment*, ročník 51, č. 1-3, 2013: s. 111–123, doi:10.1080/19443994.2012.699250, https://www.researchgate.net/publication/254226227_The_role_of_SWRO_Barcelona-Llobregat_Plant_in_the_water_supply_system_of_Barcelona_Area.
- [14] Shamsuzzoha, M.; Rasheduzzaman, M.; Ghosh, R. C.: Building Resilience for Drinking Water Shortages through Reverse Osmosis Technology in Coastal Areas of Bangladesh. *Procedia Engineering*, ročník 212, 2018: s. 559–566, ISSN 1877-7058, doi:10.1016/j.proeng.2018.01.072, 7th International Conference on Building Resilience: Using scientific knowledge to inform policy and practice in disaster risk reduction, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705818300900>.
- [15] Šatura, L.: *Modelling and Optimisation of Membrane Process Operation*. Bakalárska práca, Fakulta chemickej a potravinárskej technológie STU v Bratislave, 2018, https://www.uiam.sk/assets/publication_info.php?id_pub=1918.