



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo
in kemijsko tehnologijo

Nežka Brunec

Modeliranje in dinamična simulacija toplotnega prenosnika

Diplomsko delo

Maribor, 2017



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo
in kemijsko tehnologijo

Modeliranje in dinamična simulacija toplotnega prenosnika

Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študijskega programa I. stopnje

Študent: Nežka Brunec

Študijski program: visokošolski strokovni študijski program I. stopnje
Kemijska tehnologija

Predvideni strokovni naslov: diplomirana inženirka kemijske tehnologije (VS)

Mentor: doc. dr. Miloš Bogataj

Komentor: red. prof. dr. Zorka Novak Pintarič

Maribor, 2017



Univerza v Mariboru

Fakulteta za kemijo
in kemijsko tehnologijo

Številka: K1012253

Datum: 30.03.2017

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Statut UM–UPB 11, Uradni list RS, št. 44/2015) izdajam:

SKLEP O ZAKLJUČNEM DELU

Nežka Brunec, študent-u/-ki visokošolskega strokovnega študijskega programa 1. stopnje KEMIJSKA TEHNOLOGIJA, se dovoljuje izdelati zaključno delo.

Mentor/-ica: doc. dr. Miloš Bogataj

Somentor/-ica: red. prof. dr. Zorka Novak Pintarič

Naslov zaključnega dela:

MODELIRANJE IN DINAMIČNA SIMULACIJA TOPLOTNEGA PRENOSNIKA

Naslov zaključnega dela v angleškem jeziku:

MODELING AND DYNAMIC SIMULATION OF HEAT EXCHANGER

Rok za izdelavo in oddajo zaključnega dela je 30.09.2017. Zaključno delo je potrebno izdelati skladno z »Navodili za izdelavo zaključnega dela« in ga v treh izvodih oddati v pristojnem referatu članice. Hkrati se odda tudi izjava mentor-ja/-ice in morebitne/-ga somentor-ja/-ice o ustreznosti zaključnega dela.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na Senat članice v roku 10 delovnih dni od dneva prejema sklepa.

DEKAN

red. prof. dr. Zdravko Kravanja

Obvestiti:

- kandidat-a/-ko,
- mentor-ja/-ico,
- somentor-ja/-ico,
- odložiti v arhiv



FAKULTETA ZA KEMIJO IN
KEMIJSKO TEHNOLOGIJO

Kazalo

Kazalo	I
Izjava.....	II
Zahvala	III
Povzetek.....	IV
Abstract.....	V
Seznam tabel.....	VI
Seznam slik.....	VII
Uporabljeni simboli	VIII
1 Uvod in opredelitev problema.....	1
2 Metode dela	3
2.1 Program MATLAB/Simulink	3
2.1.1 Bloki in dodajanje blokov v model.....	4
2.1.2 Povezovanje blokov	4
2.1.3 Definiranje parametrov v blokih.....	5
2.1.4 Zagon simulacije in prikaz rezultatov.....	6
2.1.5 Implementacija matematičnega modela v Simulinku.....	6
3 Eksperimentalni del.....	9
3.1 Model poenostavljenega dvojno-cevnega prenosnika toplote	9
3.1.1 Simulacija poenostavljenega dvojno-cevnega prenosnika toplote	10
3.1.2 Rezultati simulacije – konstantni vhodni signali	12
3.1.3 Rezultati simulacije – enotska stopničasta sprememba vhodnih signalov	14
3.1.3.1 Enotska sprememba temperature pare.....	14
3.1.3.2 Enotska sprememba vtočne temperature hladnega fluida	15
3.1.3.3 Enotska sprememba pretoka hladnega fluida.....	17
3.1.4 Diskusija rezultatov simulacij s poenostavljenim modelom	18
3.2 Kaskadni model poenostavljenega prenosnika toplote	18
3.2.1 Rezultati simulacije – konstantni vhodni signali	19
3.2.2 Rezultati simulacije – stopničasta sprememba vhodnih signalov	21
3.2.2.1 Stopničasta sprememba temperature pare in stopničasta sprememba pretoka hladnega fluida.....	21
3.2.2.2 Stopničasta sprememba vtočne temperature hladnega fluida.....	24
3.2.3 Diskusija rezultatov simulacij s kaskadnim modelom.....	26
4 Zaključek	27
5 Literatura	29

Izjava

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelala sama, prispevki drugih so posebej označeni. Pregledala sem literaturo s področja diplomskega dela po naslednjih geslih:

Vir: Science Direct (<http://www.sciencedirect.com/>)

Gesla:	Število referenc
simulink IN modeling IN dynamic simulation IN heat exchanger	366
double-pipe heat exchanger IN dynamic simulation	54
modeling IN first order system IN heat exchanger	386

Vir: COBISS (<http://www.cobiss.si/>)

Gesla:	Število referenc
simulink IN modeliranje IN dinamična simulacija IN prenosnik toplote	14
dvojno-cevni prenosnik toplote IN dinamična simulacija	0

Vir: Digitalna knjižnica Univerze v Mariboru (<http://dkum.uni-mb.si/Iskanje.php>)

Gesla:	Število referenc
modeliranje IN dinamična simulacija	2
prenosnik toplote	14

Skupno število pregledanih člankov: 19

Skupno število pregledanih knjig: 2

Maribor, september 2017

Nežka Brunec

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju, doc. dr. Milošu Bogataju za pomoč in vodenje pri opravljanju diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi red. prof. dr. Zorki Novak Pintarič za somentorstvo.

Posebna zahvala gre staršem, ki so mi omogočili študij in mi obenem izkazali veliko vzpodbude in potrpežljivosti.

Modeliranje in dinamična simulacija toplotnega prenosnika

Povzetek

V diplomskem delu predstavljamo modeliranje dvojno-cevne prenosnika toplote s sotočnim režimom. Razvili smo enostaven model prenosnika toplote in kaskadni model prenosnika toplote ter analizirali njuno dinamično obnašanje. Matematična modela smo implementirali v programu MATLAB/Simulink. Za primerjavo obeh modelov smo izvedli niz numeričnih simulacij, s katerimi smo ugotavljali, kako se merjeni parametri (iztočne temperature hladnega toka) odzovejo na stopničaste spremembe vhodnih parametrov (vtočna temperatura in pretok hladnega toka ter temperatura pare). Rezultati kažejo, da kaskadni model toplotnega prenosnika realneje opiše odzive merjenih parametrov glede na uvedbo motenj v sistem. Ugotavljamo, da bi z uporabo enostavnih modelov toplotnih prenosnikov lahko obogatili eksperimentalno delo med študijem kemijske tehnike.

Ključne besede: dvojno-cevni prenosnik toplote, modeliranje, dinamična simulacija, Simulink, dinamika procesov

UDK: 544.3(043.2)

Modeling and dynamic simulation of heat exchanger

Abstract

The thesis deals with the modeling of double-pipe heat exchanger, in parallel flow arrangement, using programme MATLAB/Simulink. We developed an ideal model of a heat exchanger as well as a more realistic cascade model and observed their dynamic behaviour. Several numerical simulations were done to compare how observed parameters (outlet temperatures of cold fluid) are responding to step changes of inlet conditions (inlet temperature and flow rate of cold stream, and the temperature of the steam). The results indicate that cascade model of heat exchanger provides a generalized realistic response to given step changes. We conclude that the usage of general models can greatly enhance experimental work during Chemical Engineering courses.

Key words: double-pipe heat exchanger, modeling, dynamic simulation, Simulink, process dynamics

UDK: 544.3(043.2)

Seznam tabel

Tabela 3-1: Rezultati simulacij poenostavljenega modela prenosnika toplote.	18
Tabela 3-2: Rezultati simulacij kaskadnega modela prenosnika toplote.	26

Seznam slik

Slika 2-1: Delovno okno Simulinka.	3
Slika 2-2: Knjižnica blokov »Simulink Library Browser«.....	3
Slika 3-1: Shema dvojno-cevnega prenosnika toplote s sotočnim režimom [9].	9
Slika 3-2: Modeliranje poenostavljenega prenosnika toplote.....	11
Slika 3-3: Podsystem Heat Transfer Rate.....	11
Slika 3-4: Podsystem Energy Balance.....	12
Slika 3-5: Časovno spreminjanje iztočne temperature hladnega fluida.....	13
Slika 3-6: Časovno spreminjanje toplotnega toka.	13
Slika 3-7: Nastavitev enotske stopničaste spremembe temperature pare.	14
Slika 3-8: Odziv iztočne temperature hladnega fluida na enotno stopničasto spremembo temperature pare.	15
Slika 3-9: Odziv toplotnega toka na enotno stopničasto spremembo temperature pare.....	15
Slika 3-10: Odziv iztočne temperature hladnega fluida na enotno stopničasto spremembo vtočne temperature hladnega fluida.....	16
Slika 3-11: Odziv toplotnega toka na enotno stopničasto spremembo vtočne temperature hladnega fluida.....	16
Slika 3-12: Odziv iztočne temperature hladnega fluida na enotno stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.....	17
Slika 3-13: Odziv toplotnega toka na enotno stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.	17
Slika 3-14: Kaskadni model toplotnega prenosnika.	19
Slika 3-15: Odziv iztočne temperature hladnega fluida iz posameznih sekcij prenosnika toplote na konstantne vhodne signale.	20
Slika 3-16: Toplotni tok kaskadnega modela pri konstantnih vrednostih vhodnih signalov..	20
Slika 3-17: Približek temperaturnega profila hladnega fluida vzdolž toplotnega prenosnika.	21
Slika 3-18: Odziv iztočne temperature hladnega fluida iz posameznih sekcij prenosnika toplote na stopničasto spremembo temperature pare.....	22
Slika 3-19: Odziv iztočne temperature hladnega fluida iz posameznih sekcij prenosnika toplote na stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.	22
Slika 3-20: Odziv toplotnega toka na stopničasto spremembo temperature pare.....	23
Slika 3-21: Odziv toplotnega toka na stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.	23
Slika 3-22: Odziv iztočne temperature hladnega fluida iz posameznih sekcij na stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.	24
Slika 3-23: Temperaturna profila hladnega fluida vzdolž toplotnega prenosnika (pred uvedbo stopničaste spremembe – rdeča barva; po uvedbi stopničaste spremembe – oranžna barva).	25
Slika 3-24: Odziv toplotnega toka na stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.	25

Uporabljeni simboli

Simboli

A	površina za prenos toplote (m^2)
c_p	specifična toplotna kapaciteta hladnega fluida ($J/(kg \cdot K)$)
k	koeficient toplotne prehodnosti ($W/(m^2 \cdot K)$)
q_m	masni pretok hladnega fluida (kg/s)
T_i	vtočna temperatura hladnega fluida (angl. inlet) ($^{\circ}C$)
T_o	iztočna temperatura hladnega fluida (angl. outlet) ($^{\circ}C$)
T_s	temperatura vročega fluida – pare (angl. steam) ($^{\circ}C$)
V	volumen hladnega fluida (m^3)

Grški simboli

ρ	gostota hladnega fluida (kg/m^3)
ϕ	toplotni tok (W)

1 Uvod in opredelitev problema

Kemijski inženirji načrtujejo in razvijajo procese, v katerih se surovine in energija pretvorijo v zelene kemijske produkte in višje energetske oblike. Učinkovito načrtovanje, konstruiranje in delovanje kemijskih procesov je pogojeno z znanjem in upoštevanjem osnovnih fizikalnih in kemijskih zakonov, s katerimi lahko opišemo osnovne pojave, kot sta na primer pretok fluidov in prenos toplote [1].

Osrednjo vlogo v kemijskem procesu igrajo procesne enote, v katerih se vstopajoča snov kemijsko in/ali fizikalno pretvori. Ena izmed osnovnih procesnih enot je prenosnik toplote. Prenosniki toplote so naprave, ki jih uporabljamo za prenos toplotne energije z ene snovi na drugo snov. V večini procesov uporabljamo prenosnike toplote, skozi katere se pretakata dva fluida [2]. Prenos toplote vedno poteka s toplega toka fluida na hladen tok fluida. Največji učinek prenosa toplote dosežemo ob neposrednem kontaktu fluidov, vendar to zaradi morebitne medsebojne mešljivosti in reaktivnosti fluidov v večini primerov ni izvedljivo. Zaradi tega prenos toplote v prenosnikih toplote poteka skozi pregrado ali posredno sredstvo, ki je locirano med fluidoma. Glede na vrsto kontakta fluidov poznamo tri tipe toplotnih prenosnikov: rekuperatorje, kontaktne prenosnike in regeneratore. Rekuperatorji so najpogostejši tip prenosnikov toplote, kjer sta topel in hladen fluid ločena s steno. Med rekuperatorje spadajo cevni prenosniki, dvojno-cevni prenosniki, ploščni prenosniki, spiralni prenosniki, kompaktni prenosniki, radiatorji, cevni snopi in orebreni cevni snopi [3]. Uporaba prenosnikov toplote pripomore k zniževanju porabe energentov in posledično zagotavlja višjo okoljsko in ekonomsko učinkovitost kemijskih in procesnih obratov [4]. Prav zaradi tega je modeliranje in simuliranje toplotnega prenosnika osrednja tema mnogih znanstvenih raziskav.

Bracco idr. [5] so preučevali stacionarno in dinamično simulacijo dvojno-cevnega toplotnega prenosnika s sotočnim in protitočnim režimom. Metodologija temelji na diskretizaciji toplotnega prenosnika na več enakih delov, ki so jih opisali z masnimi in toplotnimi bilancami. Razvita metodologija je dala sprejemljive numerične rešitve, ki so bile primerljive z eksperimentalnimi meritvami. Mazumder in Mandal [6] sta razvila »Black box« model dvojno-cevnega toplotnega prenosnika, ki temelji na linearizacijah nelinearnih modelnih enačb. Preučevala sta odziv sistema na stopničasto spremembo veličin, ki v enačbah toplotne bilance nastopajo kot vhodne spremenljivke. Z analizo odziva sistema sta razvila splošen model za analiziranje dvojno-cevnega prenosnika toplote. Costiuc in Popa [7] obravnavata uporabnost modeliranja in dinamične simulacije toplotnega prenosnika za namene industrijskega oblikovanja, analize še ne obstoječih termalnih sistemov in funkcionalne optimizacije. Ugotavljata, da predlagan pristop pripomore k doseganju zastavljenih ciljev in izboljšav z bistveno manj stroški kot v primeru uporabe fizičnega modela toplotnega prenosnika.

Dobro poznavanje in razumevanje dinamičnega obnašanja toplotnega prenosnika je bistvenega pomena za njegovo učinkovito dimenzioniranje in zanesljivo obratovanje. Vpogled v dinamično obnašanje lahko dobimo z eksperimentiranjem na fizičnih enotah, vendar je tak proces pogosto zamuden in drag. Alternativno lahko načrtovanje in dimenzioniranje procesnih enot izvajamo z uporabo računalniško podprtih pristopov, ki omogočajo virtualno (teoretično) eksperimentiranje.

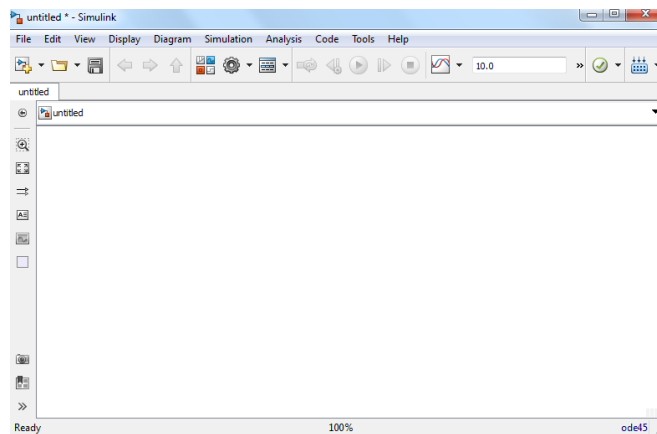
Modeliranje in simuliranje toplotnega prenosnika je osrednja tema diplomskega dela. Delo obravnava dinamično simulacijo dvojno-cevnega prenosnika. Omejili smo se na modeliranje in dinamično simulacijo poenostavljenega toplotnega prenosnika v programskem okolju MATLAB/Simulink. Hipoteza diplomskega dela je, da bi lahko študenti kemijske tehnike pri predmetih, povezanih s pojavom prenosa toplote, kot sta na primer Prenos toplote in Dinamika procesov, z uporabo enostavnih modelov toplotnih prenosnikov in ustreznih programskih orodij dopolnjevali eksperimentalno delo in tako učinkoviteje poglobili razumevanje ter utrdili znanje.

2 Metode dela

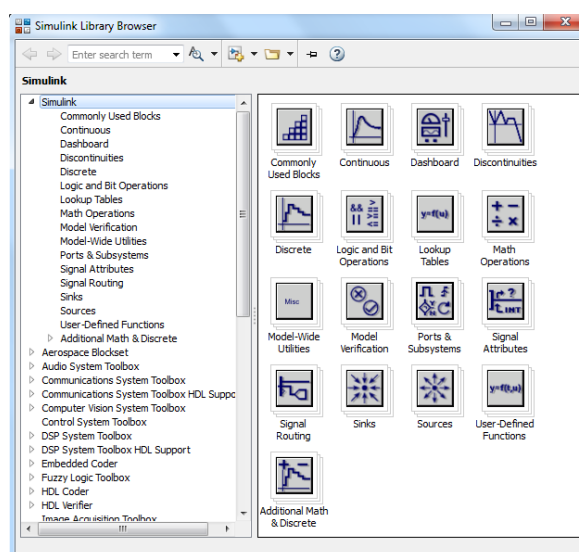
V poglavju opisujemo osnovne funkcionalnosti programa MATLAB/Simulink. Prikazujemo in podrobneje opisujemo študijski primer modeliranja, s čimer prikažemo osnove implementacije matematičnega modela v okolju Simulink.

2.1 Program MATLAB/Simulink

Simulink je grafično, interaktivno, blokovno-shematsko programsko orodje za modeliranje, simuliranje in analiziranje dinamičnih sistemov (slika 2-1). Omogoča hitro in enostavno konstrukcijo virtualnih prototipov za raziskovanje modeliranih konceptov na različnih stopnjah podrobnosti. Primeren je za linearne, nelinearne, časovno odvisne in časovno neodvisne sisteme. Je vmesnik programa MATLAB in ponuja izdatne možnosti grafičnih analiz in oblikovalnih orodij. Vključuje obširno knjižnico vnaprej definiranih blokov (slika 2-2), ki jih lahko uporabimo za konstruiranje grafičnega modela našega sistema. Omogoča grafični prikaz najpomembnejših sklopov modela, medtem ko lahko podrobnosti modela skrijemo v podsistemih [8].



Slika 2-1: Delovno okno Simulinka.



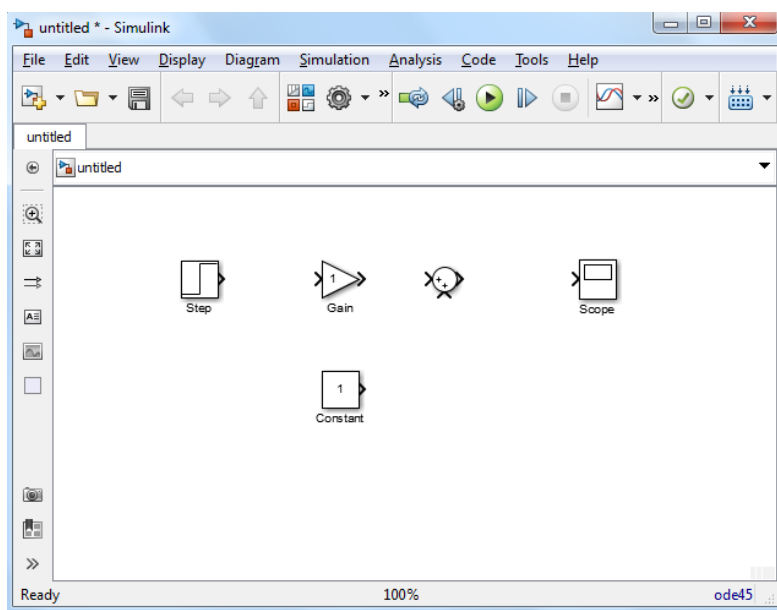
Slika 2-2: Knjižnica blokov »Simulink Library Browser«.

2.1.1 Bloki in dodajanje blokov v model

Bloki so osnovni gradniki modela v Simulinku (slika 2-3). Do blokov, ki predstavljajo matematične operacije, konstante, grafične vmesnike itn., dostopamo v Simulinkovi knjižnici »Simulink Library Browser«. Bloki so razvrščeni v kategorije, kjer si sledijo po abecednem redu. Kategorije, ki vsebujejo temeljne in najpogosteje uporabljene bloke za izvedbo dinamičnih simulacij, so naslednje:

- Sources, kjer so zbrani bloki za generiranje različnih tipov vhodnih signalov, kot so: konstanta, stopničast signal, naključno število (Constant, Step, Random Number)
- Sinks, kjer so zbrani bloki za grafični ali numerični prikaz vrednosti signalov (Scope, Display)
- Continuous, kjer so zbrani bloki za numerično integriranje ter odvajanje zveznih signalov itd. (Integrator, Derivative).
- Math operations, kjer so zbrani bloki, ki predstavljajo osnovne matematične operacije, kot so: seštevanje/odštevanje, množenje/deljenje in ojačanje signalov, osnovne matematične funkcije (logaritmiranje, potenciranje) itd. (Sum, Product, Gain, Function).

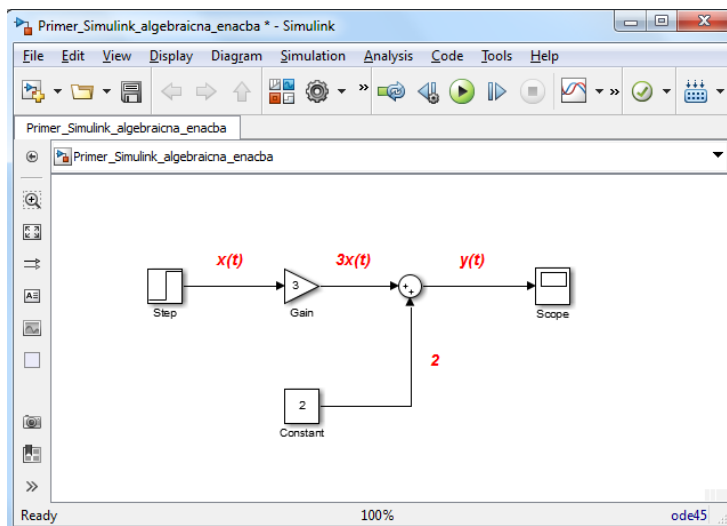
Najenostavnejši način, da blok dodamo v delovno okno, je, da v knjižnici izberemo želen blok in ga povlečemo v delovno okno. Blok lahko dodamo tudi tako, da ob desnem kliku na želeni blok izberemo možnost »Add block to model ...«.



Slika 2-3: Bloki – gradniki modela.

2.1.2 Povezovanje blokov

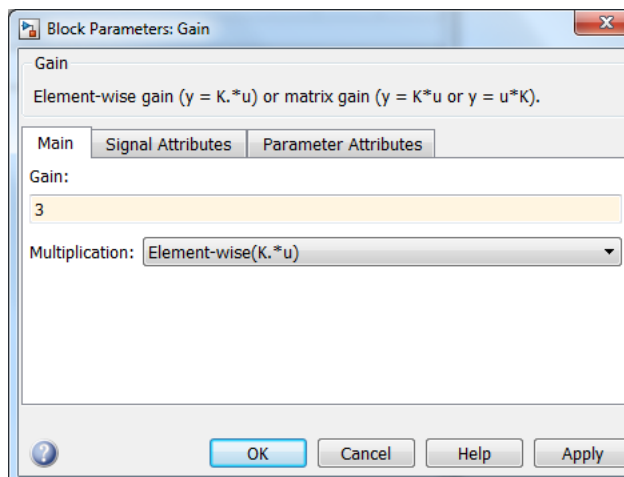
Puščica na desni strani bloka (glej blok Step na sliki 2-3) predstavlja izhodni signal, medtem ko puščica na levi strani bloka (glej blok Gain na sliki 2-3) predstavlja vhodni signal. Bloka povežemo na ta način, da kliknemo na izhodni signal (puščico) izbranega bloka in ga povlečemo do vhodnega signala sosednjega bloka. Bloka sta povezana, kadar je povezava med njima prikazana kot odebeljena črna puščica, kot prikazujemo na sliki 2-4. Povezave med bloki lahko vejamo, s čimer lahko dani signal hkrati povežemo z dvema ali več bloki.



Slika 2-4: Povezovanje blokov v blokovno-shematski model.

2.1.3 Definiranje parametrov v blokih

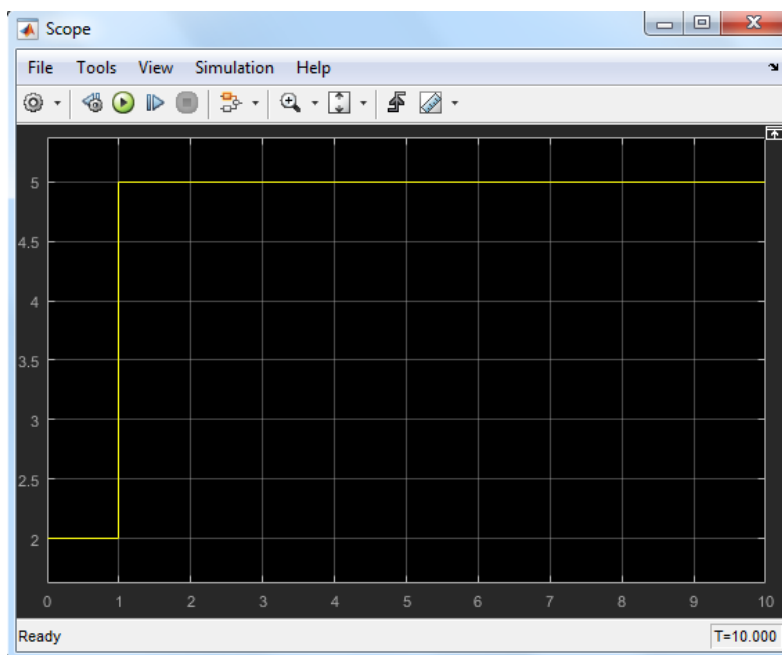
Bloki, ki jih v delovno okno uvozimo iz knjižnice, imajo privzete vrednosti parametrov, ki definirajo delovanje bloka. Večini blokov lahko vrednosti teh parametrov ponastavimo, s čimer zagotovimo, da blok zadosti potrebam modela, ki ga obravnavamo. Število parametrov, ki jih lahko ponastavimo, se razlikuje od bloka do bloka. Ponastavimo jih tako, da kliknemo na izbrani blok (npr. blok Gain na sliki 2-4) in v vmesniku spremenimo vrednosti parametrov bloka. Na sliki 2-5 prikazujemo spremembo privzete vrednosti bloka Gain, tj. 1, na vrednost 3.



Slika 2-5: Definiranje parametra ojačanja v bloku Gain.

2.1.4 Zagon simulacije in prikaz rezultatov

Simulacijo zaženemo s klikom na gumb Run ali z ukazom Ctrl+T. Rezultate preverimo z dvojnimi klikom na blok Scope, ki omogoča grafični prikaz rezultatov (slika 2-6).



Slika 2-6: Grafični prikaz signala.

2.1.5 Implementacija matematičnega modela v Simulinku

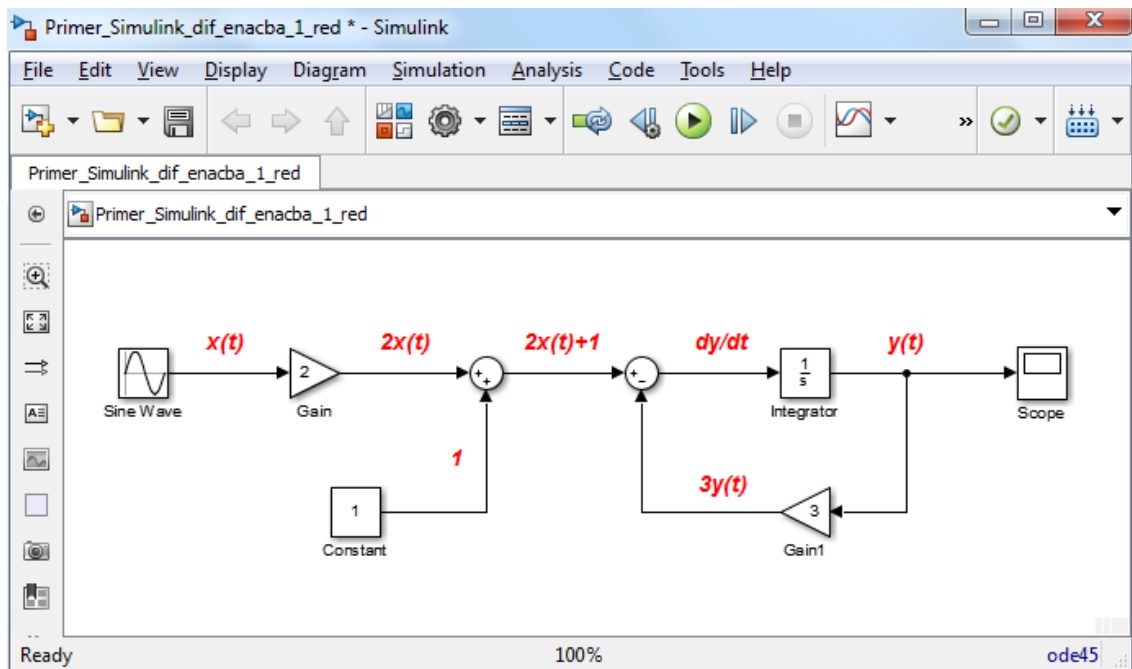
Temeljni koncept modeliranja v okolju Simulink je prevod modelnih enačb v blokovno shemo. Za zgled prikazujemo primerjavo med matematičnim zapisom linearne diferencialne enačbe prvega reda s konstantnimi koeficienti (enačba 2.1) in implementacijo v Simulinku.

$$\frac{dy}{dt} = 2x + 1 - 3y \quad (2.1)$$

V enačbi (2.1) je y odvisna spremenljivka, katere vrednost želimo določiti v odvisnosti od časa, x pa je neodvisna spremenljivka. Enega izmed možnih načinov implementacije diferencialne enačbe (2.1) prikazuje slika 2-7. Vrednosti spremenljivk in konstant (signalov), ki nastopajo v enačbi (2.1), prikazujemo z rdečo barvo.

Predpostavimo, da je vhodni signal $x(t)$ sinusoida. Blok Sine Wave najdemo v knjižnici modelov pod kategorijo Sources. Uporabimo privzete nastavitve, kar pomeni, da bo krivulja imela enotno amplitudo in frekvenco 1 radian na časovno enoto. V enačbi (2.1) je vrednost spremenljivke x pomnožena s konstanto 2. V ta namen uporabimo blok Gain in mu dodelimo vrednost 2. Bloka povežemo med seboj. Izhod iz bloka Gain sedaj predstavlja $2x(t)$. Iz enačbe (2.1) je razvidno, da slednjemu prištejemo 1. Uvedemo blok Constant, ki mu dodelimo vrednost 1. Bloka Gain in Constant povežemo z operatorjem za seštevanje/odštevanje vrednosti signalov Sum. Izhod iz bloka predstavlja $2x(t) + 1$. Od vrednosti slednjega moramo odšteti $3y(t)$. Signal $y(t)$ dobimo tako, da integriramo signal dy/dt in ga pomnožimo s konstanto 3. Za integracijo uporabimo blok Integrator, ki ga najdemo v knjižnici modelov pod kategorijo Continuous. Njegov ključni parameter je Initial condition in predstavlja začetni pogoj, ki nastavi vrednost izhodnega signala ob zagonu

simulacije. Uporabimo privzete nastavitve, torej vrednost 0, kar pomeni $y(t = 0) = 0$. Rezultat simulacije, tj. vrednost signala $y(t)$, prikažemo v bloku Scope.



Slika 2-7: Diferencialna enačba – blokovna shema.

Kot je razvidno iz prikazanega, implementacija diferencialne enačbe prvega reda ni zahtevna naloga. Podobno velja za sisteme diferencialnih enačb ter za sisteme algebrskih in diferencialnih enačb. Na enak način kot v prikazanem primeru lahko predstavimo vsako enačbo sistema in jo pretvorimo v blokovno shemo, pri čemer ima vsaka izmed diferencialnih enačb, ki nastopa v sistemu, svoj integrator.

3 Eksperimentalni del

Eksperimentalno delo je potekalo v programskem okolju MATLAB/Simulink. Zajema razvoj poenostavljenega in realnejšega modela dvojno-cevnega prenosnika toplote, izvedbo simulacij za spremljanje odzivov ter analizo vplivov uvedenih stopničastih sprememb vplivnih parametrov.

3.1 Model poenostavljenega dvojno-cevnega prenosnika toplote

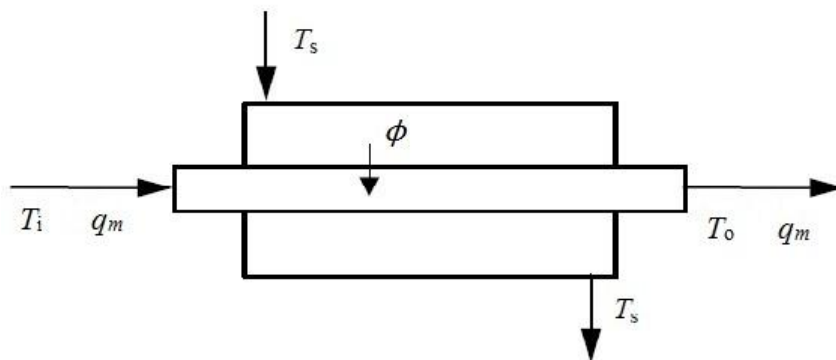
Dvojno-cevni prenosnik toplote je sestavljen iz dveh koncentričnih cevi, kot prikazuje slika 3-1. Predpostavimo, da hladen fluid teče skozi notranjo cev, vroč (para) pa skozi prostor med notranjo cevjo in plaščem. Dinamični model poenostavljenega sotočnega dvojno-cevnega toplotnega prenosnika, ki opisuje časovno spreminjanje iztočne temperature hladnega fluida, predstavljata enačbi (3.1) in (3.2):

$$\phi = kA(T_s - T_o) \quad (3.1)$$

$$\rho V c_p \frac{dT_o}{dt} = q_m c_p (T_i - T_o) + \phi = q_m c_p (T_i - T_o) + kA(T_s - T_o) \quad (3.2)$$

kjer je:

- ϕ toplotni tok (W)
- k koeficient toplotne prehodnosti (W/(m²·K))
- A površina za prenos toplote (m²)
- T_s temperatura vročega fluida – pare (angl. steam) (°C)
- T_o iztočna temperatura hladnega fluida (angl. outlet) (°C)
- ρ gostota hladnega fluida (kg/m³)
- V volumen hladnega fluida (m³)
- c_p specifična toplotna kapaciteta hladnega fluida (J/(kg·K))
- q_m masni pretok hladnega fluida (kg/s)
- T_i vtočna temperatura hladnega fluida (angl. inlet) (°C).



Slika 3-1: Shema dvojno-cevnega prenosnika toplote s sotočnim režimom [9].

Enačbi zadostno opišeta model ob upoštevanju naslednjih predpostavk:

- Fizikalne lastnosti (gostota, toplotna kapaciteta, viskoznost) obeh fluidov so konstantne.
- Koeficient toplotne prehodnosti je konstanten in neodvisen od obratovalnih parametrov toplotnega prenosnika (temperaturnih razlik, hitrosti pretokov fluidov).
- Temperatura vročega fluida na vtoku in iztoku (T_s) je konstantna (temperatura vhodne pare in izhodnega kondenzata je enaka).
- Vpliv akumulacije toplotnega toka v materialu toplotnega prenosnika in toplotne izgube z okolico zanemarimo.
- Temperatura vzdolž cevi je konstantna.
- Pretok hladnega fluida je konstanten vzdolž notranje cevi.
- Padec tlaka je zanemarljiv.

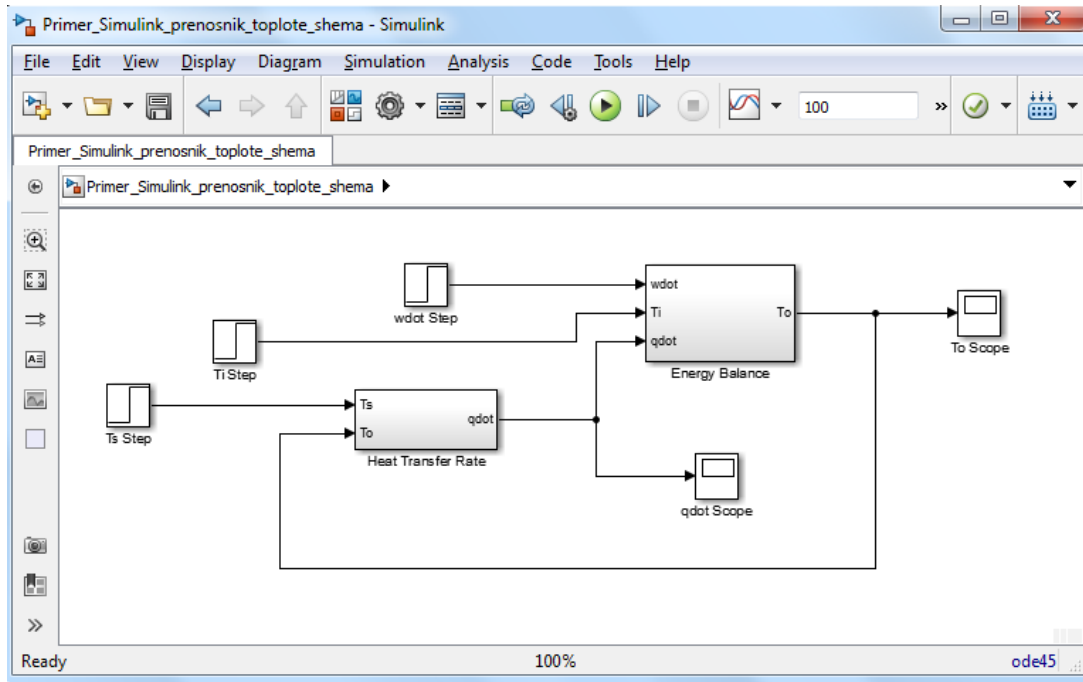
3.1.1 Simulacija poenostavljenega dvojno-cevnega prenosnika toplote

Enačbi, ki opisujeta dinamični model poenostavljenega toplotnega prenosnika, smo prevedli v blokovno shemo v programu Simulink (slika 3-2). Zaradi boljšega pregleda in lažje manipulacije parametrov modela smo vsako izmed enačb implementirali v obliki podsistema. Podsystem Heat Transfer Rate vsebuje blokovno shemo, ki ustreza enačbi (3.1), podsystem Energy Balance pa vsebuje blokovno shemo, ki ustreza enačbi (3.2).

V Simulinku smo signale, ki ustrezajo konstantam in spremenljivkam v enačbah (3.1) in (3.2), označili z naslednjimi imeni:

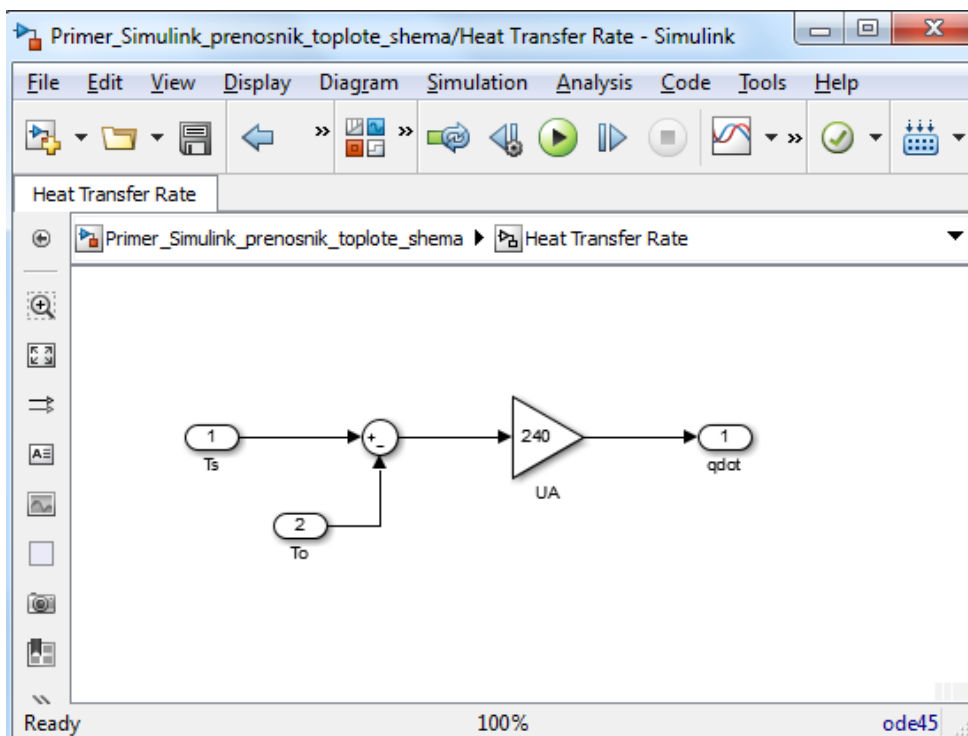
- toplotni tok – \dot{q}
- masni pretok – \dot{w}
- masa hladnega fluida v cevi – w
- temperatura hladnega fluida na vstopu v prenosnik – T_i
- temperatura hladnega fluida na izstopu iz prenosnika – T_o
- temperatura pare/kondenzata – T_s
- koeficient toplotne prehodnosti – U
- površina za prenos toplote – A
- specifična toplotna kapaciteta – C_p .

Vhodne signale (T_i , T_s , \dot{w}) smo definirali kot bloke Step, ki omogočajo uvedbo stopničastih sprememb. Rezultate simulacije, to sta časovno spreminjanje temperature iztoka hladnega fluida in toplotnega toka, prikazujemo v blokih Scope.

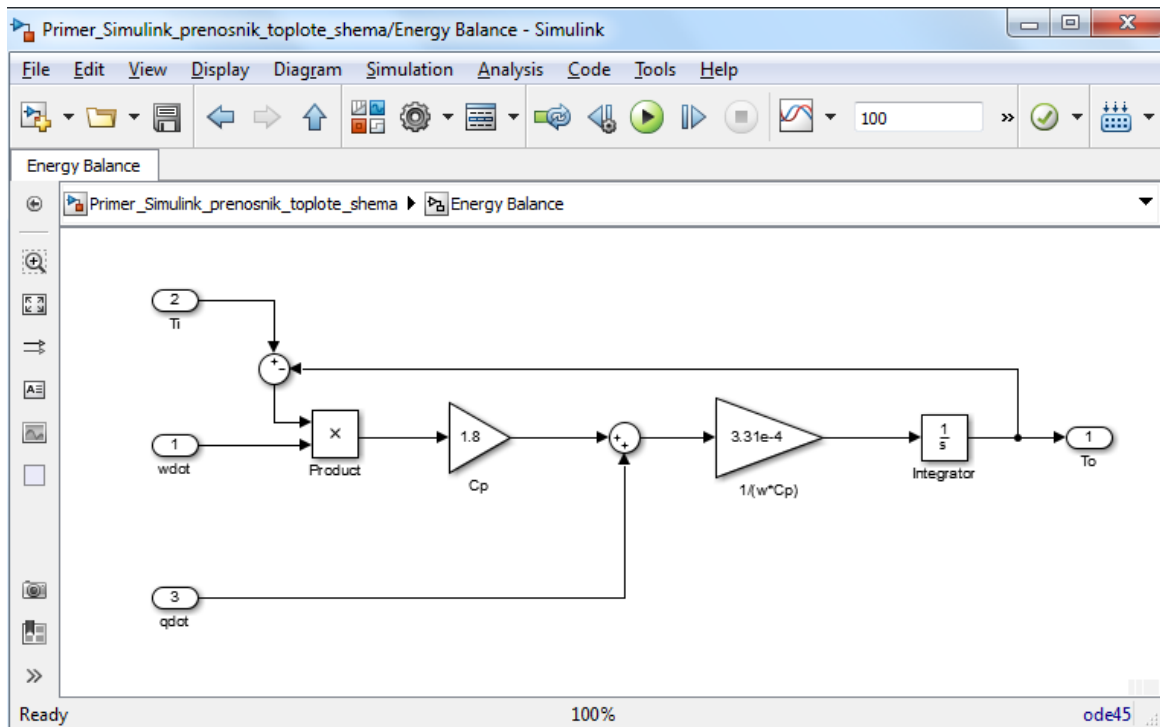


Slika 3-2: Modeliranje poenostavljenega prenosnika toplote.

Podsistema prikazujemo na slikah 3-3 in 3-4. Podsystem Heat Transfer Rate (slika 3-3) predstavlja produkt temperaturne razlike, koeficienta toplotnega prenosa in površine toplotnega prenosnika. Opozorimo naj, da smo blok Gain preimenovali v UA, saj predstavlja zmnožek toplotne prehodnosti (k) in površine za prenos toplote (A). Podsystem Energy Balance predstavlja blokovno shemo, ki ustreza enačbi (3.2).



Slika 3-3: Podsystem Heat Transfer Rate.



Slika 3-4: Podsystem Energy Balance.

Za izvedbo simulacije moramo poznati obratovalne parametre (vrednosti vhodnih signalov), dimenzijske parametre toplotnega prenosnika ter osnovne fizikalne lastnosti hladnega fluida. Za namen simulacije smo jih določili kot:

$$k = 800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$A = 300 \text{ m}^2$$

$$T_s = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_i = 100 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$q_m = 33,33 \text{ kg/s}$$

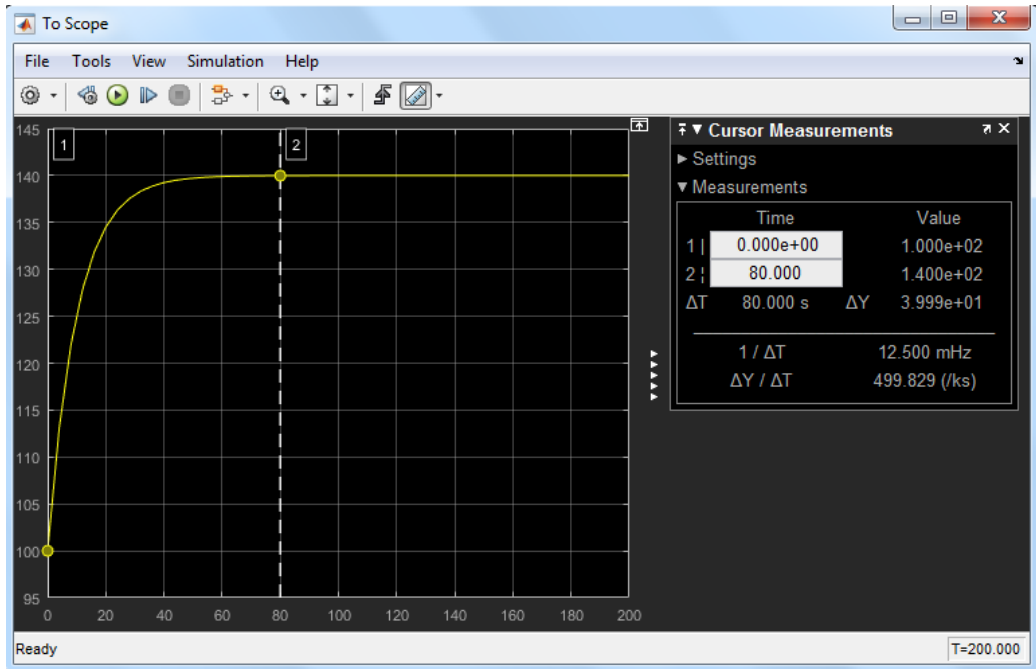
$$\rho = 800 \text{ kg/m}^3$$

$$V = 2,1 \text{ m}^3$$

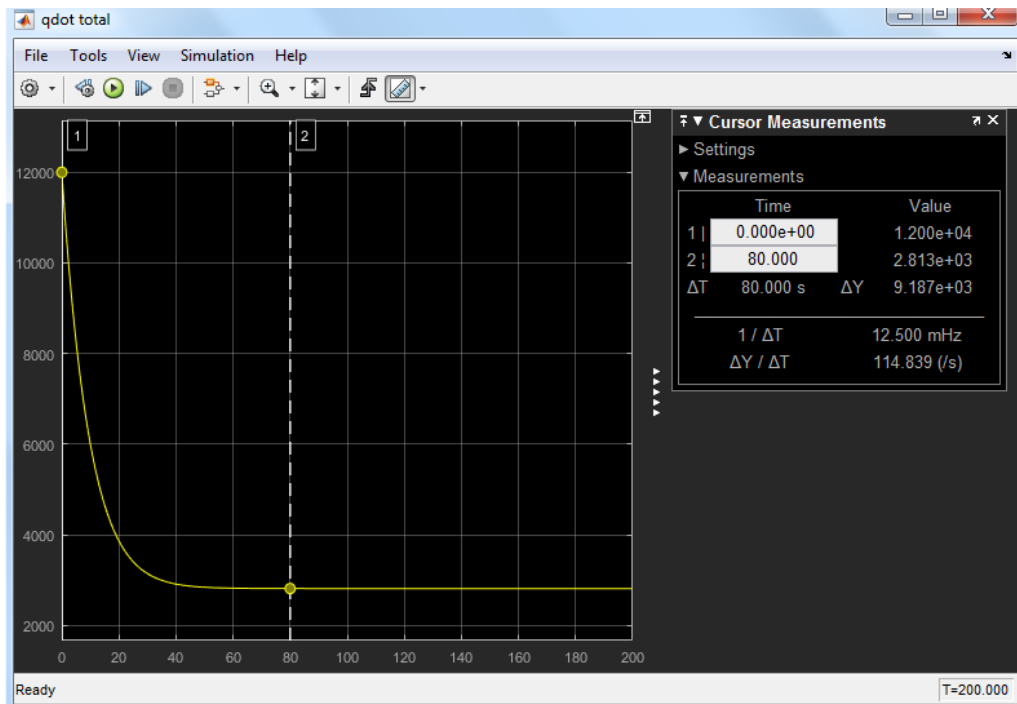
$$c_p = 1,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

3.1.2 Rezultati simulacije – konstantni vhodni signali

Vrednosti vhodnih signalov smo obravnavali kot konstante. Čas simulacije smo nastavili na 200 sekund. Začetno vrednost v integratorju smo nastavili na 100, kar ustreza vtočni temperaturi hladnega fluida. Rezultati nakazujejo, da se je po 80 sekundah vzpostavilo stacionarno stanje, saj se temperatura izhodnega fluida ne spreminja več in se ustali pri 140 °C (slika 3-5). Temperaturna razlika med temperaturo hladnega fluida na iztoku iz toplotnega prenosnika in temperaturo kondenzata znaša 10 °C. Toplotni tok ob vzpostavitvi stacionarnega stanja znaša 2 813 kW (slika 3-6).



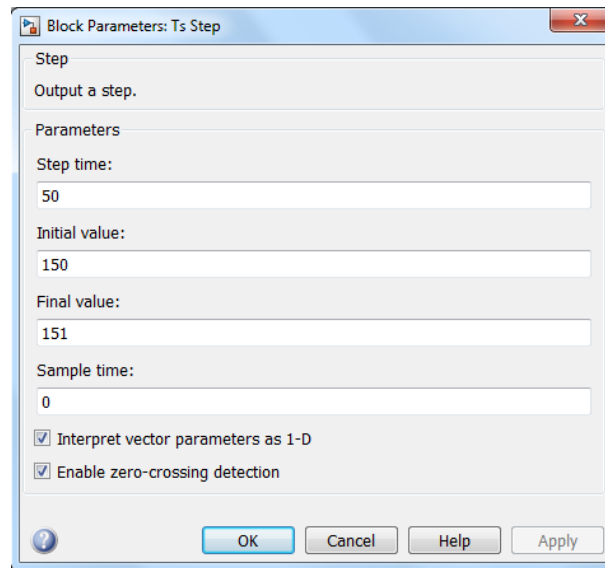
Slika 3-5: Časovno spreminjanje iztočne temperature hladnega fluida.



Slika 3-6: Časovno spreminjanje toplotnega toka.

3.1.3 Rezultati simulacije – enotska stopničasta sprememba vhodnih signalov

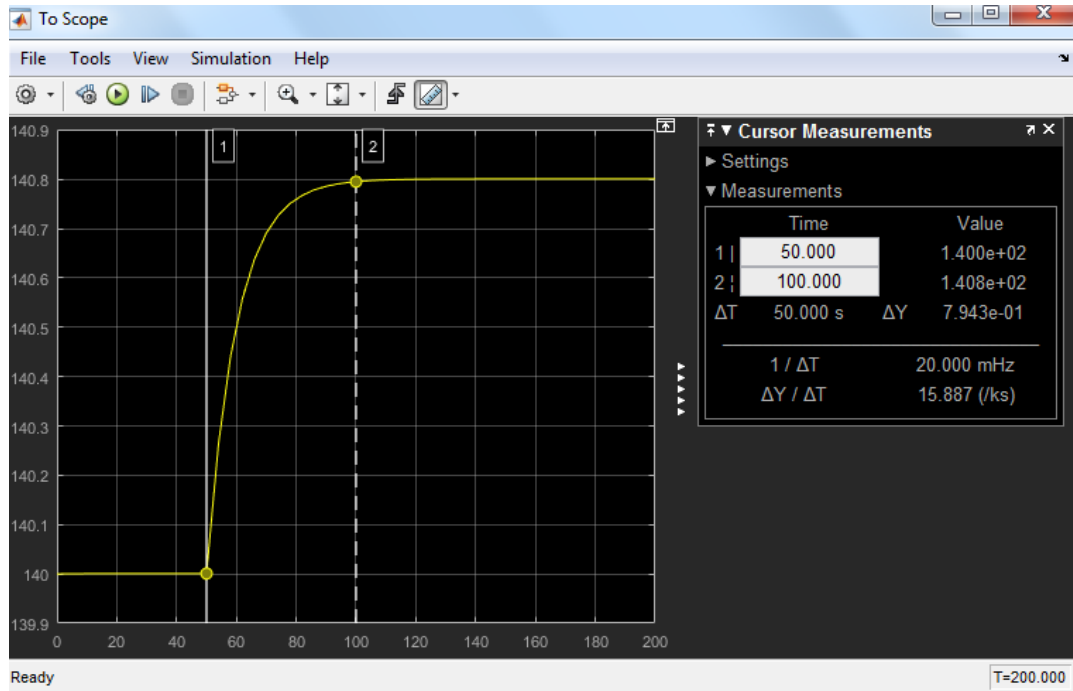
Temeljna prednost izvajanja računalniških simulacije je možnost hitre analize odziva sistema na uvedene spremembe parametrov, kot je npr. spreminjanje vrednosti vhodnih signalov. V ta namen smo izvedli tri simulacije tako, da smo uvedli stopničasto spremembo enega izmed vhodnih signalov, medtem ko sta bila ostala konstantna. Stopničasto spremembo uvedemo po vzpostavljenem stacionarnem stanju, zato nastavimo začetni pogoj v integratorju na 140; 140 °C je iztočna temperatura hladnega fluida v stacionarnem stanju. Stopničaste spremembe smo uvedli po 50 sekundah simulacije. Primer uvedbe enotske stopničaste spremembe z uporabo bloka Step prikazujemo na sliki 3-7.



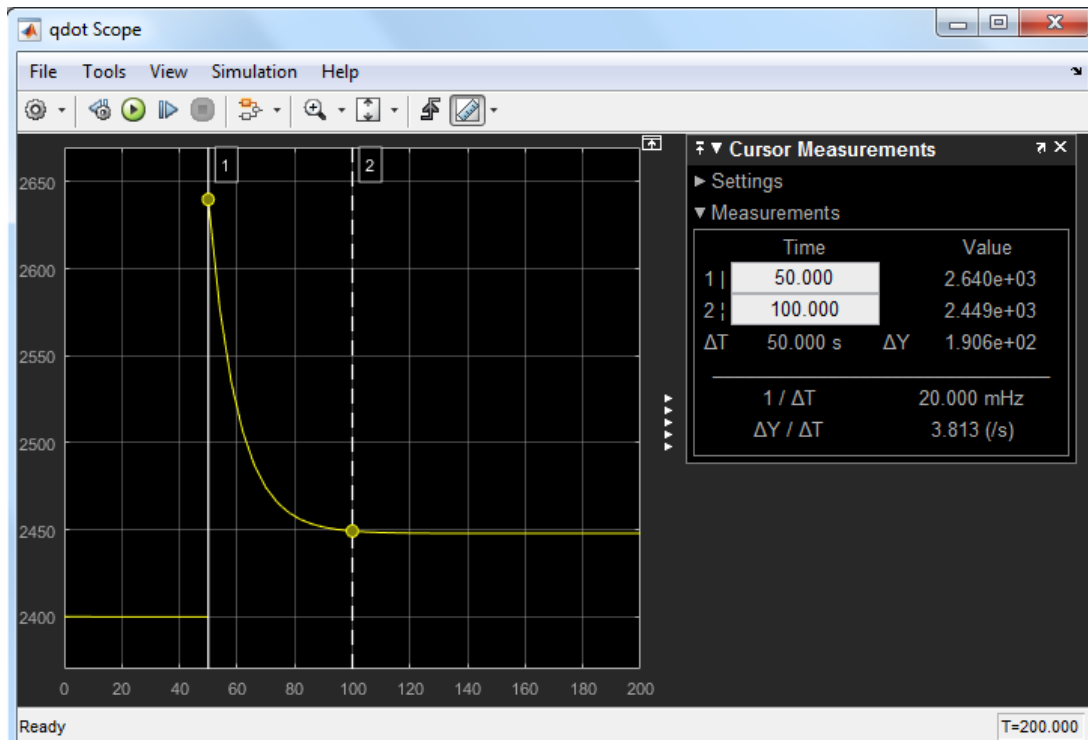
Slika 3-7: Nastavitve enotske stopničaste spremembe temperature pare.

3.1.3.1 Enotska sprememba temperature pare

Odziv vrednosti iztočne temperature hladnega fluida in toplotnega toka na enotsko spremembo temperature pare (s 150 °C na 151 °C) prikazujemo na slikah 3-8 in 3-9. Razvidno je, da pride do spremembe vrednosti iztočne temperature hladnega fluida po 50 sekundah, saj smo za ta čas definirali nastop stopničaste spremembe temperature pare. Novo stacionarno stanje se vzpostavi po 50 sekundah od nastopa stopničaste spremembe. Izhodna temperatura hladnega fluida po vzpostavitvi stacionarnega stanja znaša 140,8 °C. Toplotni tok v vzpostavljenem stacionarnem stanju znaša 2 448 kW.



Slika 3-8: Odziv iztočne temperature hladnega fluida na enotno stopničasto spremembo temperature pare.

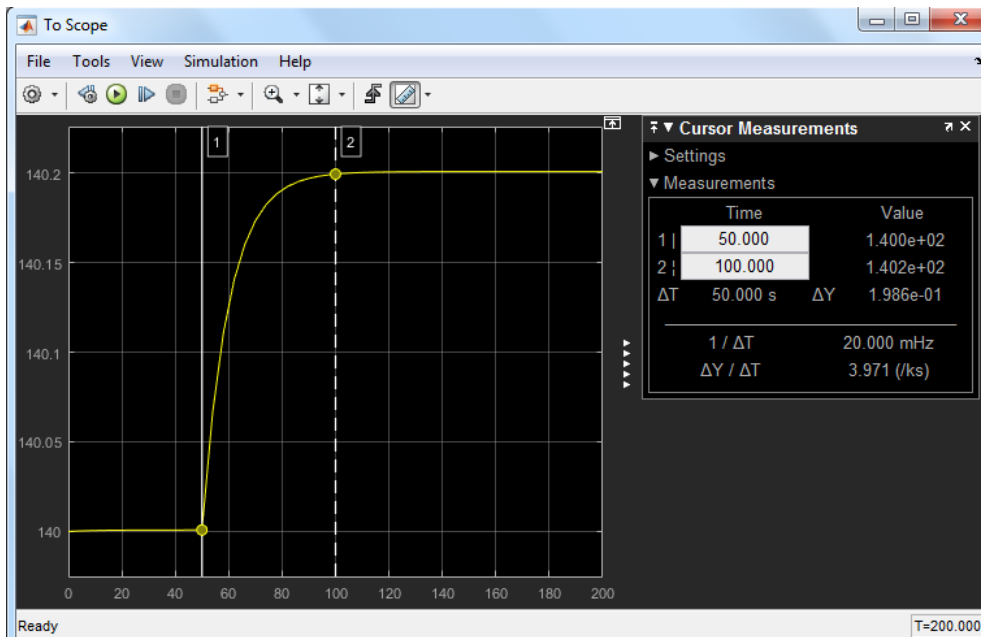


Slika 3-9: Odziv toplotnega toka na enotno stopničasto spremembo temperature pare.

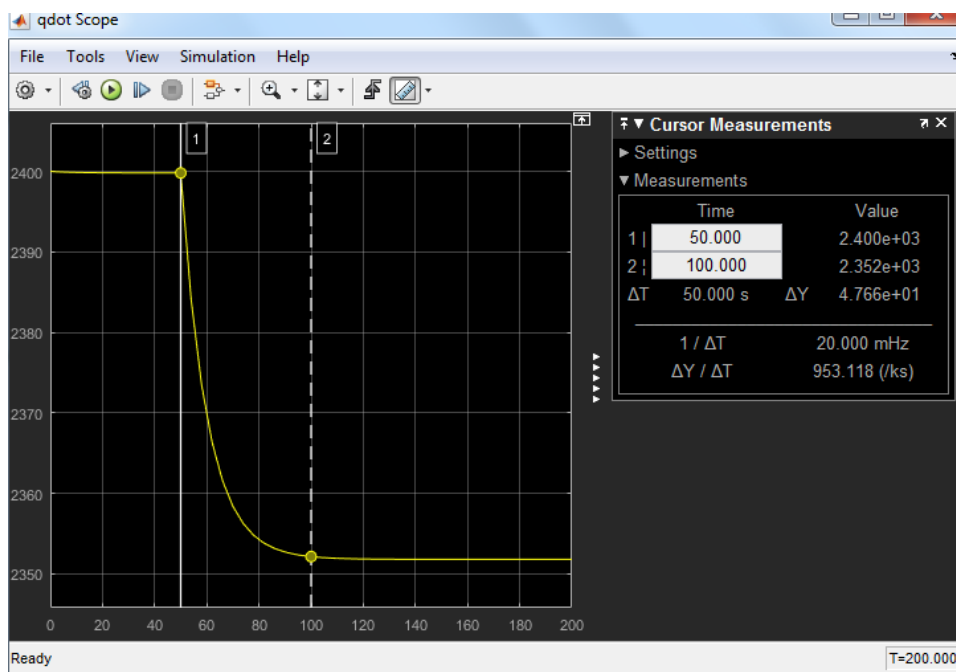
3.1.3.2 Enotska sprememba vtočne temperature hladnega fluida

Odziv vrednosti iztočne temperature hladnega fluida in toplotnega toka na enotsko spremembo vtočne temperature hladnega fluida (s 100 °C na 101 °C) prikazujemo na slikah

3-10 in 3-11. Rezultati kažejo, da se novo stacionarno stanje iztočne temperature hladnega fluida in toplotnega toka vzpostavi po 50 sekundah od nastopa spremembe. Iztočna temperatura hladnega fluida je 140,2 °C in toplotni tok 2 352 kW.



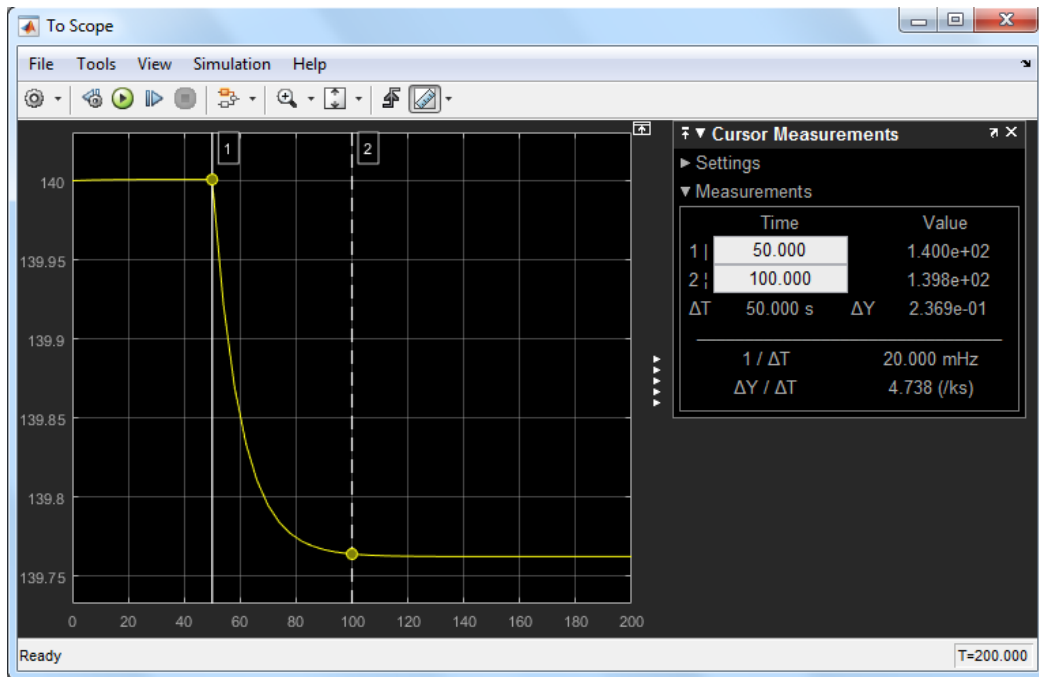
Slika 3-10: Odziv iztočne temperature hladnega fluida na enotno stopničasto spremembo vtočne temperature hladnega fluida.



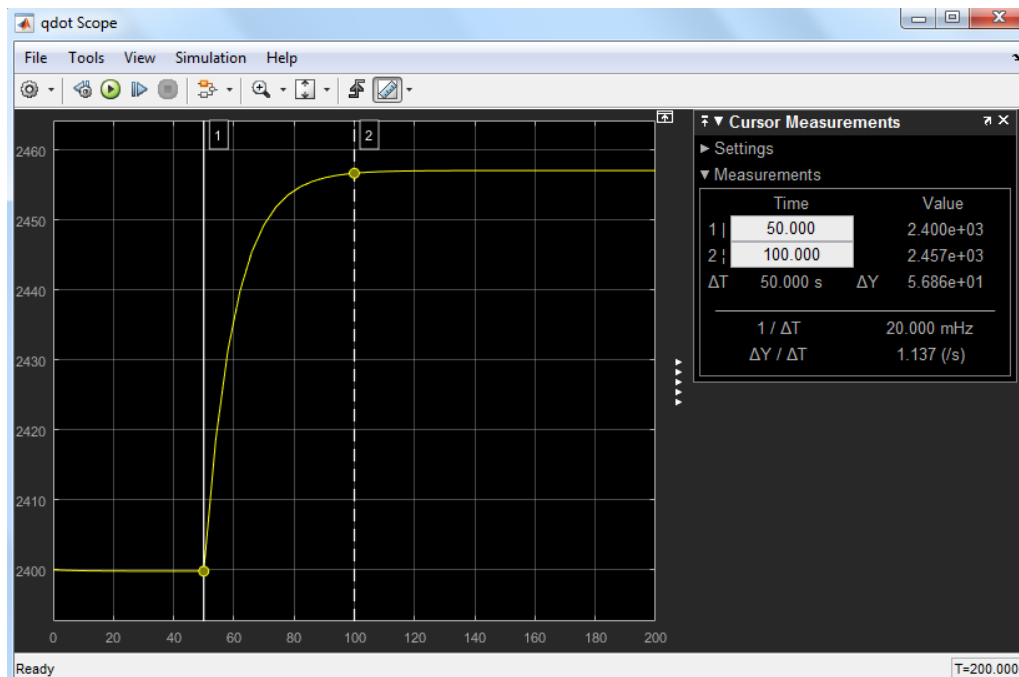
Slika 3-11: Odziv toplotnega toka na enotno stopničasto spremembo vtočne temperature hladnega fluida.

3.1.3.3 Enotska sprememba pretoka hladnega fluida

Odziv vrednosti iztočne temperature hladnega fluida in toplotnega toka na enotsko spremembo pretoka hladnega fluida (s 33,33 kg/s na 34,33 kg/s) prikazujemo na slikah 3-12 in 3-13. Razvidno je, da se novo stacionarno stanje vzpostavi po 50 sekundah. Temperatura hladnega fluida na izstopu iz prenosnika znaša 139,8 °C. Toplotni tok znaša 2 457 kW.



Slika 3-12: Odziv iztočne temperature hladnega fluida na enotsko stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.



Slika 3-13: Odziv toplotnega toka na enotsko stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.

3.1.4 Diskusija rezultatov simulacij s poenostavljenim modelom

Rezultati simulacije poenostavljenega modela toplotnega prenosnika, ki jih povzemamo v tabeli 3-1, nakazujejo, da uvedbe enotskih stopničastih sprememb vhodnih signalov ne povzročijo izrazitih sprememb merjenih izhodnih signalov, kar je v skladu s pričakovanji. Po uvedbah stopničastih sprememb se samodejno vzpostavi novo stacionarno stanje, kar je značilno za samoreglativne procese. Iz rezultatov je prav tako razvidno, da se toplotni tok po uvedbi stopničaste spremembe vtočne temperature hladnega fluida zmanjša glede na prvotno stacionarno stanje. V nasprotju se toplotni tok pri uvedbi stopničaste spremembe vtočne temperature pare in pretoka hladnega fluida poveča glede na prvotno stacionarno stanje. Iztočna temperatura hladnega fluida je po vzpostavitvi novega stacionarnega stanja nižja od prvotne le v primeru uvedbe stopničaste spremembe pretoka hladnega fluida.

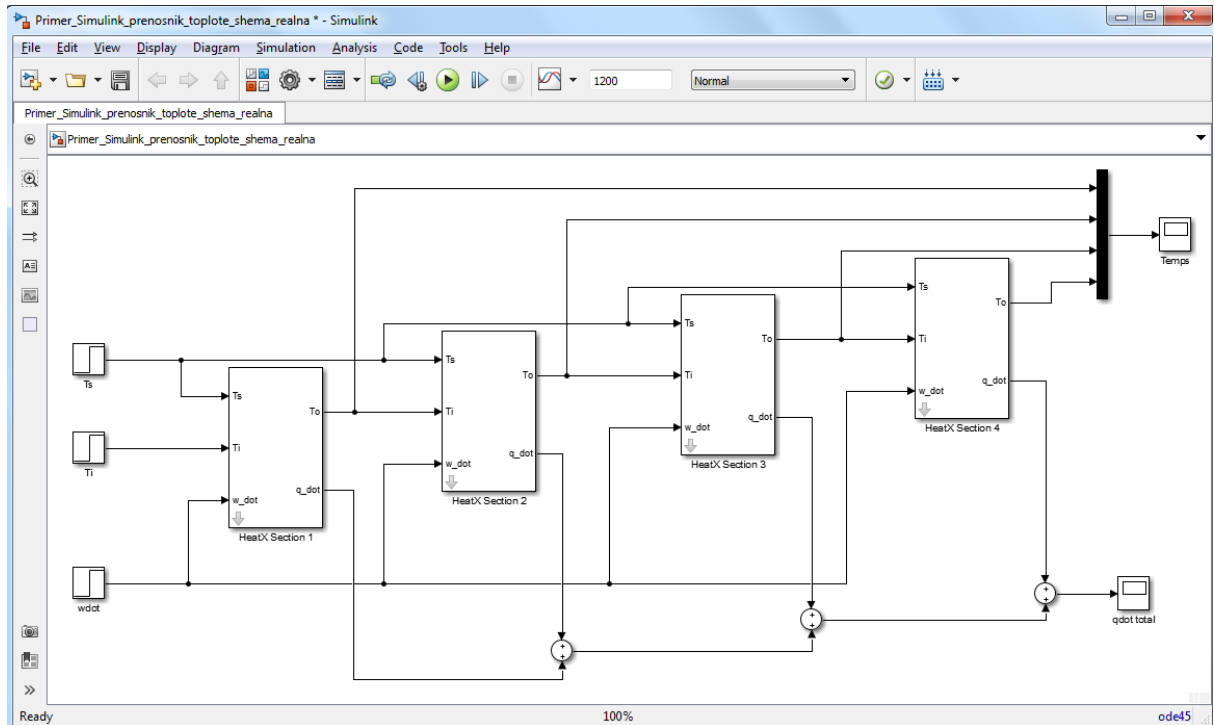
Tabela 3-1: Rezultati simulacij poenostavljenega modela prenosnika toplote.

Konstantni signali	T_o (°C)	ϕ (kW)
T_s, T_i in q_m	140,0	2 400
Enotska stopničasta sprememba signala	T_o (°C)	ϕ (kW)
T_s	140,8	2 448
T_i	140,2	2 352
q_m	139,8	2 457

Omenimo naj, da je profil odziva iztočne temperature hladnega fluida na stopničasto spremembo vtočne temperature hladnega fluida še najmanj realen, saj se sistem hipno odzove na uvedeno spremembo. V realnem prenosniku toplote bi ob predpostavki, da je cev dolga in tok v cevi čepast, zaznali spremembo iztočne temperature hladnega fluida s časovnim zamikom glede na nastop stopničaste spremembe. Razlog za to je, da bi morala temperaturna sprememba potovati vzdolž cevi s tokom fluida. Realnejši dinamični model dvojno-cevne toplotnega prenosnika bi torej moral upoštevati ta fenomen.

3.2 Kaskadni model poenostavljenega prenosnika toplote

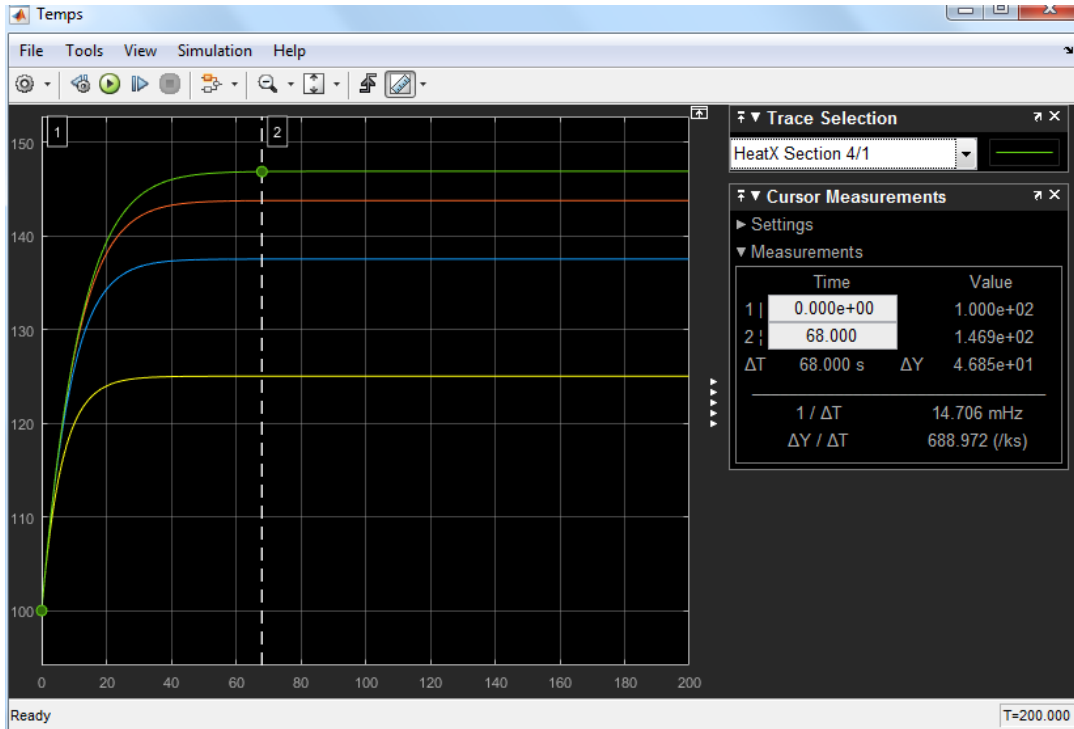
Na dinamični model toplotnega prenosnika, ki smo ga predstavili v razdelku 3.1, lahko gledamo kot na kontinuirni mešalni reaktor, v katerem ne poteka reakcija. Hladni fluid vteka s pretokom q_m v reaktor volumna V . V reaktorju se fluid segreje na temperaturo T_o in zapusti reaktor. Za prikaz realnejšega modela pretoka hladnega fluida skozi cev lahko uporabimo koncept kaskade kontinuirnih mešalnih reaktorjev, s čimer se približamo profilu čepastega toka [10]. Ob tej predpostavki dvojno-cevni toplotni prenosnik konceptualno razdelimo na več enakih sekcij. Vsaka izmed njih je opisana z istimi enačbami in blokovno shematskim modelom, kot jih prikazujemo v predhodnem poglavju. Kaskadni model toplotnega prenosnika prikazujemo na sliki 3-14. Omenimo naj, da je volumen, ki ga zavzema hladen fluid v vsaki izmed štirih sekcij, enak $0,525 \text{ m}^3$, kar predstavlja $\frac{1}{4}$ volumna, ki smo ga podali v razdelku 3.1.1.



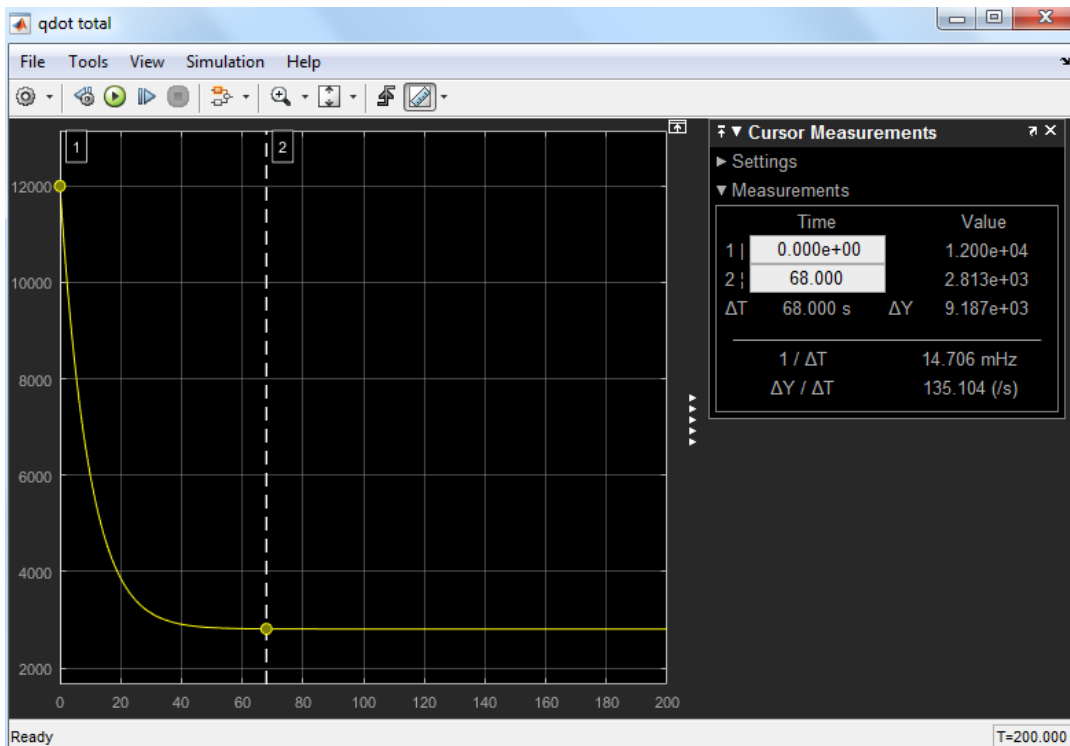
Slika 3-14: Kaskadni model toplotnega prenosnika.

3.2.1 Rezultati simulacije – konstantni vhodni signali

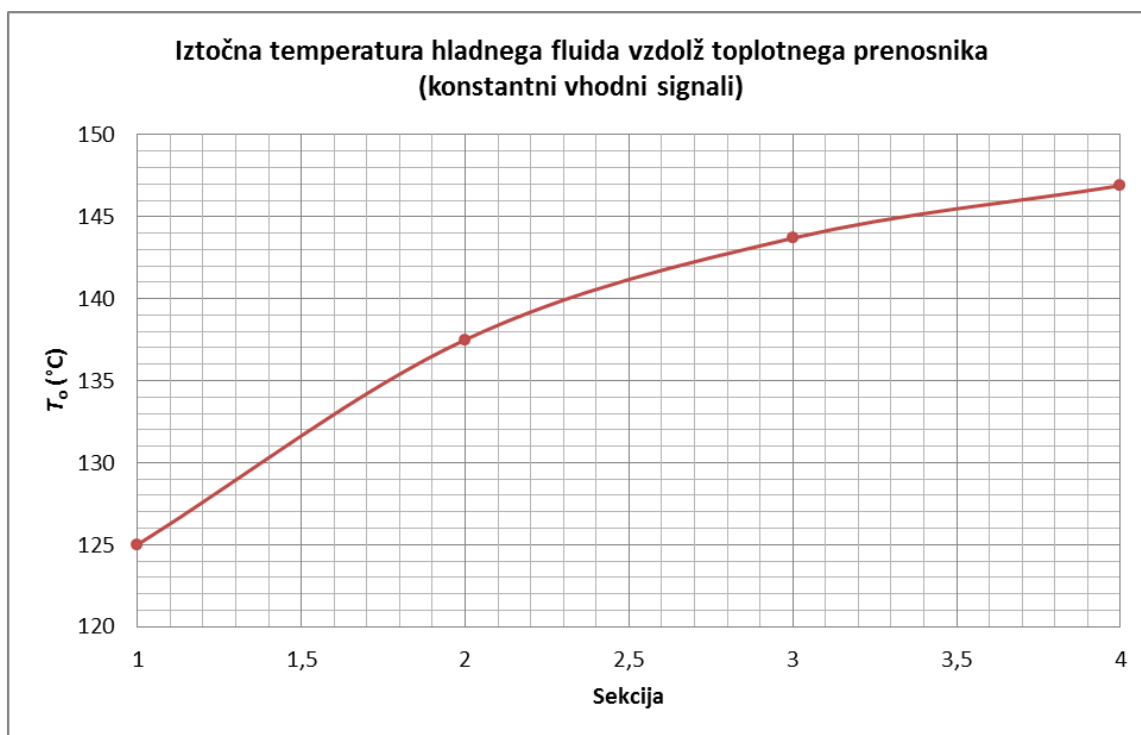
Simulacijo kaskadnega modela toplotnega prenosnika smo izvedli pri enakih pogojih kot v razdelku 3.1.2. Čas simulacije smo nastavili na 200 sekund. Rezultate simulacije prikazujemo na slikah 3-15 in 3-16. Na sliki 3-15 z rumeno barvo prikazujemo časovno spreminjanje temperature hladnega fluida na izstopu iz prve sekcije, z modro barvo iz druge sekcije, z rdečo barvo iz tretje in z zeleno barvo iz četrte sekcije prenosnika toplote. Temperatura hladnega fluida na iztoku iz prve sekcije se ustali pri 125 °C. V drugi sekciji se temperatura ustali pri 137,5 °C, v tretji pri 143,7 °C in v četrti pri 146,9 °C. Stacionarno stanje dosežemo po približno 70 sekundah. S slike 3-16 je razvidno, da toplotni tok v stacionarnem stanju znaša 2 813 kW. Vrednosti iztočnih temperatur hladnega fluida iz posameznih sekcij predstavljajo približek temperaturnega profila vzdolž toplotnega prenosnika (slika 3-17).



Slika 3-15: Odziv iztočne temperature hladnega fluida iz posameznih sekcij prenosnika toplote na konstantne vhodne signale.



Slika 3-16: Toplotni tok kaskadnega modela pri konstantnih vrednostih vhodnih signalov.



Slika 3-17: Približek temperaturnega profila hladnega fluida vzdolž toplotnega prenosnika.

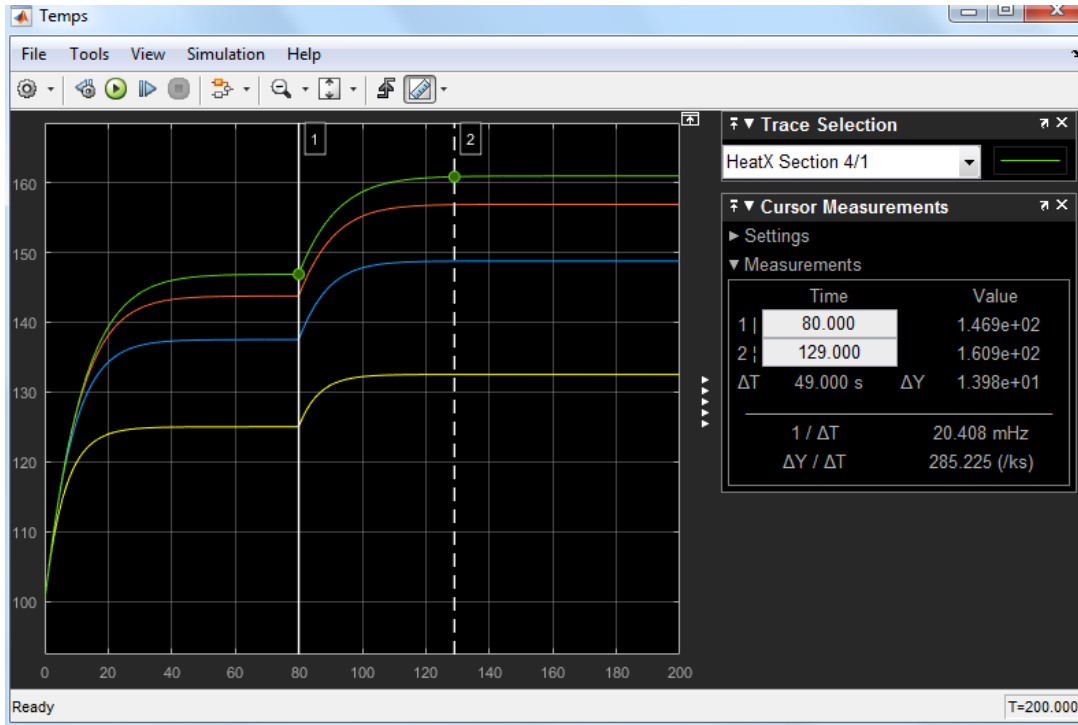
3.2.2 Rezultati simulacije – stopničasta sprememba vhodnih signalov

Rezultati simulacije kaskadnega modela ob konstantnih vrednostih vhodnih signalov ne ponudijo odgovora na vprašanje, kako se sistem odzove na stopničaste spremembe vhodnih signalov. V ta namen smo, kot v razdelku 3.1.3, izvedli tri simulacije. Stopničaste spremembe smo uvedli po vzpostavljenem stacionarnem stanju – za razvidnejšo predstavitev rezultatov simulacije v 80. sekundi.

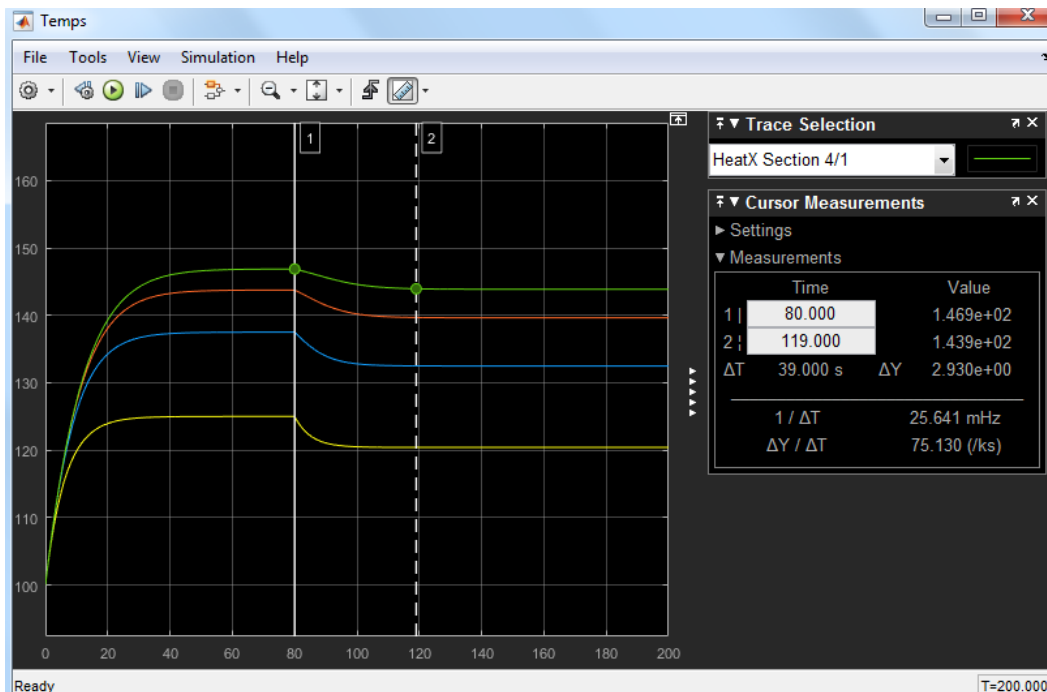
3.2.2.1 Stopničasta sprememba temperature pare in stopničasta sprememba pretoka hladnega fluida

S simulacijama smo spremljali odziv vrednosti iztočne temperature hladnega fluida in toplotnega toka na stopničasto spremembo temperature pare (s 150 °C na 165 °C) in na stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida (s 33,33 kg/s na 48,33 kg/s). Časovne profile spreminjanja iztočnih temperatur za oba primera prikazujemo na slikah 3-18 in 3-19. Rezultati kažejo, da sistem v prvem primeru doseže novo stacionarno stanje po 49 sekundah (160,9 °C) in v drugem po 39 sekundah (143,9 °C). V obeh primerih sprememba temperature hladnega fluida na iztoku iz posameznih sekcij kaskadnega modela toplotnega prenosnika nastopi hkratno z uvedbo stopničaste spremembe.

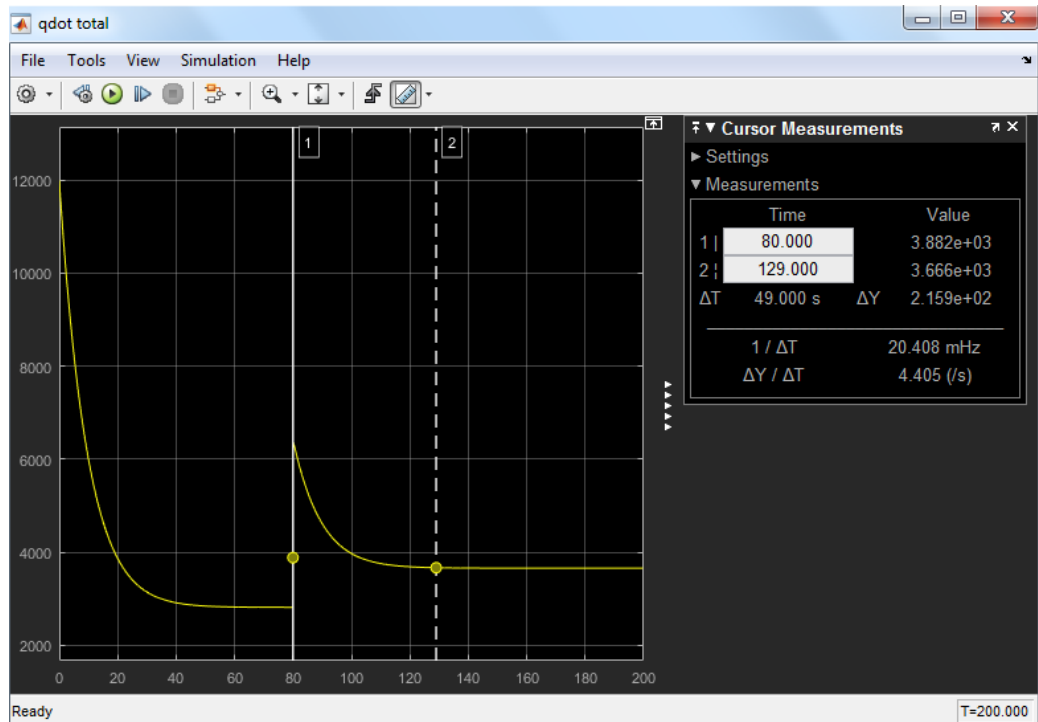
Toplotni tok se v prvem primeru ustali na 3 666 kW (slika 3-20) in v drugem na 3 809 kW (slika 3-21).



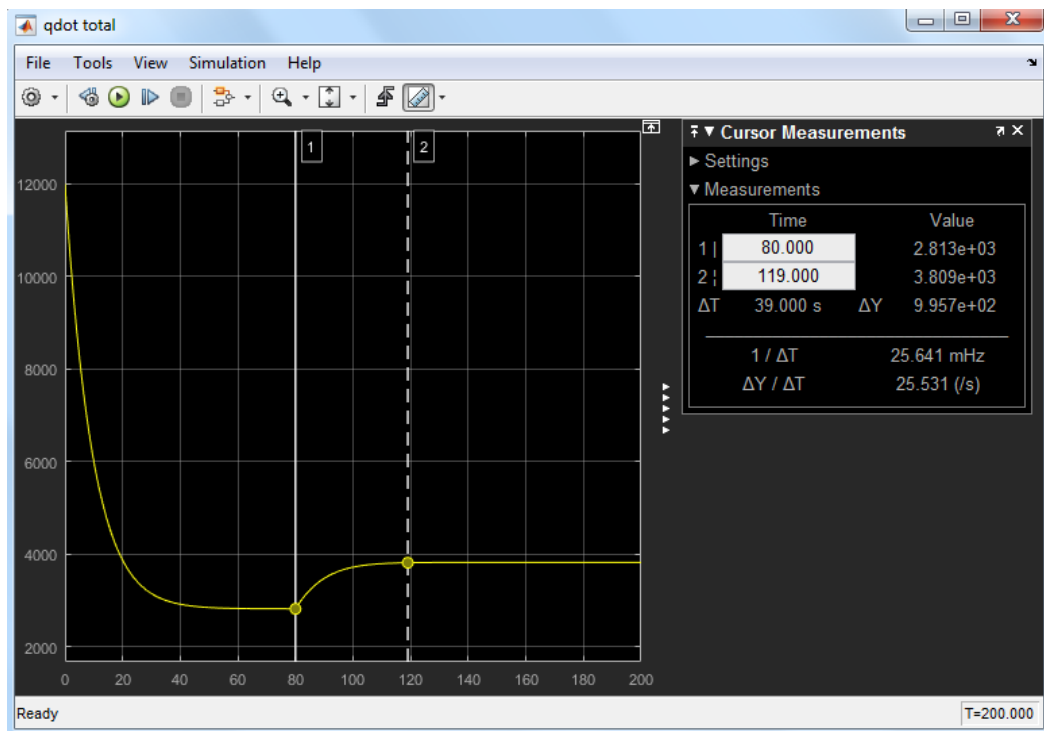
Slika 3-18: Odziv iztočne temperature hladnega fluida iz posameznih sekcij prenosnika toplote na stopničasto spremembo temperature pare.



Slika 3-19: Odziv iztočne temperature hladnega fluida iz posameznih sekcij prenosnika toplote na stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.



Slika 3-20: Odziv toplotnega toka na stopničasto spremembo temperature pare.



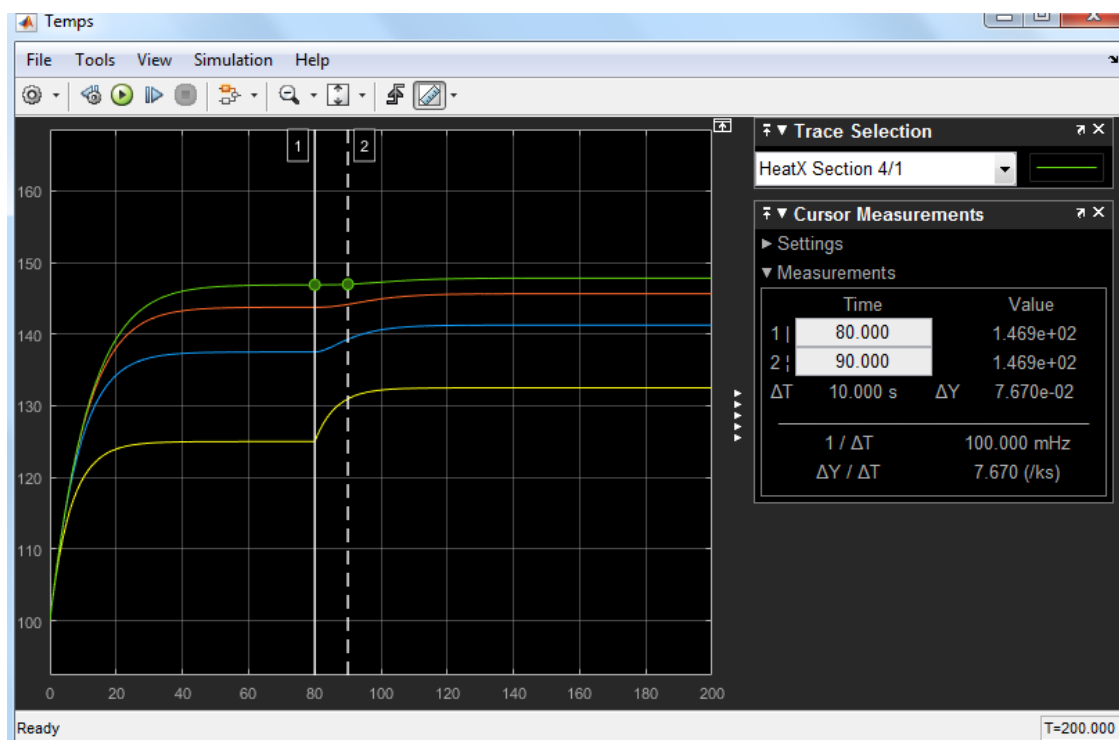
Slika 3-21: Odziv toplotnega toka na stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.

3.2.2.2 Stopničasta sprememba vtočne temperature hladnega fluida

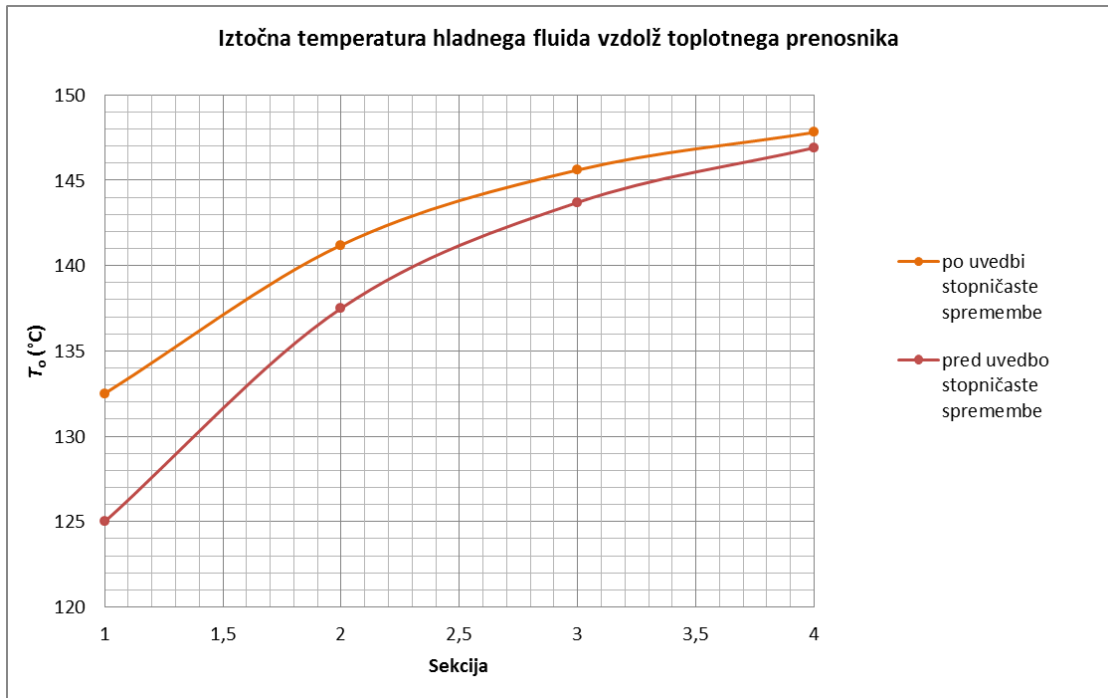
Odziv vrednosti iztočne temperature hladnega fluida in toplotnega toka na stopničasto spremembo vtočne temperature hladnega fluida (s 100 °C na 115 °C) prikazujemo na slikah 3-22 do 3-24.

Rezultati kažejo, da se novo stacionarno stanje iztočne temperature hladnega fluida in toplotnega toka vzpostavi po 46 sekundah od nastopa spremembe vtočne temperature hladnega fluida. Iztočna temperatura hladnega fluida naraste s 146,9 °C na 147,8 °C.

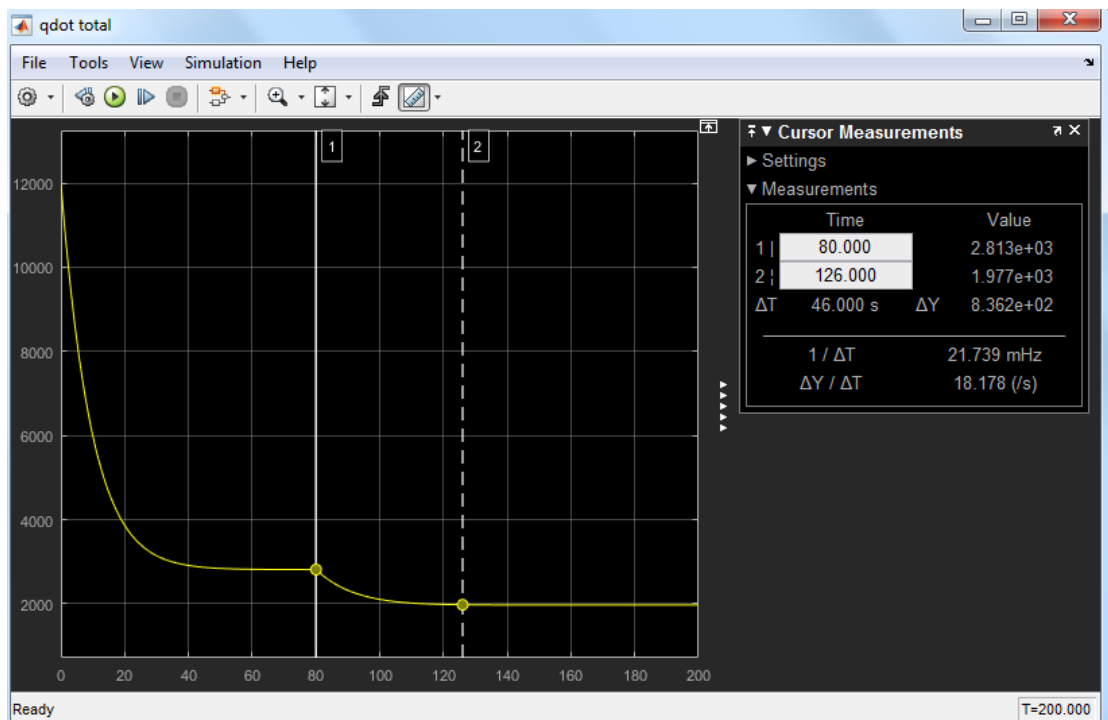
V nasprotju s časovnim profilom iztočne temperature hladnega fluida poenostavljenega toplotnega prenosnika (slika 3-10, razdelek 3.1.3.2), kjer je sprememba temperature sovpadala z nastopom stopničaste spremembe, časovni profil na sliki 3-22 nakazuje, da sprememba temperature na izstopu iz četrte sekcije toplotnega prenosnika nastopi z zamikom okrog 10 sekund. Uvedba stopničaste spremembe spremeni tudi vzdolžni temperaturni profil, predvsem v začetnih sekcijah, kar prikazujemo na sliki 3-23. Toplotni tok se ustali pri 1 977 kW in v nasprotju s temperaturnim profilom ne kaže časovnega zamika glede na nastop stopničaste spremembe (slika 3-24).



Slika 3-22: Odziv iztočne temperature hladnega fluida iz posameznih sekcij na stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.



Slika 3-23: Temperaturna profila hladnega fluida vzdolž toplotnega prenosnika (pred uvedbo stopničaste spremembe – rdeča barva; po uvedbi stopničaste spremembe – oranžna barva).



Slika 3-24: Odziv toplotnega toka na stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida.

3.2.3 Diskusija rezultatov simulacij s kaskadnim modelom

Rezultati temperaturnih profilov, ki jih povzemamo v preglednici 3-2, nakazujejo, da je v primeru kaskadnega modela toplotnega prenosnika toplotni tok največji v prvi sekciji. To je razvidno iz primerjav razlike med izstopno in vstopno temperaturo hladnega fluida v posamezni kaskadi. Največjo razliko dosežemo v prvi in najmanjšo v zadnji. Sklepamo, da je razlog za zmanjševanje toplotnega toka zmanjševanje temperaturnih razlik med vstopno temperaturo hladnega fluida in temperaturo pare vzdolž kaskade. Temperaturna razlika namreč predstavlja gonilno silo za prenos toplote.

Tabela 3-2: Rezultati simulacij kaskadnega modela prenosnika toplote.

Konstatni signali	T_o po sekcijah (°C)	ϕ (kW)
T_i, T_s in q_m	125,0 137,5 143,7 146,9	2 813
Stopničasta sprememba T_i	T_o po sekcijah (°C)	ϕ (kW)
s 100 °C na 115 °C	132,5 141,2 145,6 147,8	1 977
Stopničasta sprememba T_s	T_o po sekcijah (°C)	ϕ (kW)
s 150 °C na 165 °C	132,5 148,8 156,9 160,9	3 666
Stopničasta sprememba q_m	T_o po sekcijah (°C)	ϕ (kW)
s 33,33 kg/s na 48,33 kg/s	120,4 132,5 139,6 143,9	3 809

Na podlagi grafične predstavitve rezultatov smo opazili tudi, da je odziv izhodnih signalov na stopničasto spremembo pretoka in temperature pare tudi v primeru kaskadnega modela toplotnega prenosnika takojšen. Izjemo predstavlja vpliv stopničaste spremembe vtočne temperature hladnega fluida na iztočno temperaturo.

4 Zaključek

Modeliranje in simuliranje prenosnika toplote je bila osrednja tematika diplomskega dela. Jedro diplomskega dela predstavljajo metode dela in eksperimentalni del. V sklopu prvih smo predstavili programsko okolje MATLAB/Simulink, ki je napredni grafični vmesnik MATLABA, in omogoča simulacijo dinamičnih sistemov. Osnovne funkcionalnosti Simulinka (razvoj blokovno-shematskega modela) smo predstavili na primeru implementacije linearne diferencialne enačbe prvega reda.

V eksperimentalnem delu smo razvili dinamični model poenostavljenega dvojno-cevnega toplotnega prenosnika, ki temelji na masni in energijski bilanci toplotnega prenosnika. Model zaradi večjega števila predpostavk zajema le eno algebrsko in eno diferencialno enačbo prvega reda. Model smo implementirali v Simulinku in izvedli niz simulacij, na osnovi katerih smo spremljali časovno spreminjanje toplotnega toka in iztočne temperature hladnega fluida (izhodni parametri) v odvisnosti od vtočne temperature in pretoka hladnega fluida ter temperature grelnega sredstva - pare (vhodni parametri). Simulacije smo izvedli za primer konstantnih vrednosti vhodnih parametrov in za primere, ko smo za posamezen vhodni parameter uvedli stopničasto spremembo. Najpomembnejša ugotovitev na osnovi rezultatov, dobljenih v sklopu tega niza simulacij, je, da se sistem hipno odzove na uvedene motnje. To je problematično predvsem v primeru uvedbe stopničaste spremembe vtočne temperature hladnega fluida, saj v realnem primeru motnja potuje vzdolž cevi in je posledično ne moremo zaznati v trenutku nastopa motnje.

Za realnejši model toplotnega prenosnika, ki bi posredno zajemal tudi dolžinsko komponento, smo uporabili analogijo kaskade kontinuirnih mešalnih reaktorjev. Ob tej predpostavki dvojno-cevni toplotni prenosnik konceptualno razdelimo na več enakih sekcij. Vsaka izmed njih je opisana z istimi enačbami in blokovno-shematskim modelom. Za analizo modela smo izvedli enak niz simulacij kot v primeru poenostavljenega modela. Ugotovili smo, da je odziv izhodnih signalov na stopničasto spremembo pretoka hladnega fluida in temperature grelnega sredstva tudi v primeru kaskadnega modela toplotnega prenosnika takojšen. Izjemo predstavlja vpliv stopničaste spremembe vtočne temperature hladnega fluida na iztočno temperaturo, kjer smo opazili znaten časovni zamik med nastopom stopničaste spremembe in njenim vplivom na spremembo vrednosti iztočne temperature hladnega fluida. Nenazadnje smo lahko na osnovi rezultatov, ki jih omogoča kaskadni model, izdelali približek temperaturnega profila hladnega fluida vzdolž cevi.

Na osnovi rezultatov in pridobljenih izkušenj lahko predpostavimo, da sta modela, ki smo ju obravnavali v diplomskem delu, primerna za osnovno spoznavanje in analizo dinamičnega obnašanja toplotnih prenosnikov. Predpostavljamo, da bi študenti kemijske tehnike z njuno uporabo lahko dopolnjevali eksperimentalno delo in še dodatno poglobili razumevanje ter utrdili znanje. Zavedati pa se moramo, da smo pri razvoju in implementaciji modela sprejeli različne kompromise in poenostavitve, zaradi katerih težko sodimo, kako realni so rezultati. Domnevamo lahko, da bi s postopnim grajenjem kompleksnosti modela in odpravljanjem poenostavitev, dobili model, ki bi dajal dokaj realne rezultate.

5 Literatura

- [1] Krajnc M., Oreški S., Purkeljc F. Procesne bilance, skripta, 3. popravljena in dopolnjena izdaja. Univerza v Mariboru: Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo. Maribor. 2012.
- [2] Williams J. B. Double-Pipe Heat Exchanger, Project No. 1H, Laboratory Manual. The University of Utah: Department of Chemical Engineering. Salt Lake City. September 2002.
- [3] Goričanec D., Črepinšek – Lipuš L. Prenos toplote, skripta. Univerza v Mariboru: Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo. Maribor. December 2008.
- [4] Hawn D. P. Development of a Dynamic Model of a Counterflow Compact Heat Exchanger for Simulation of the GT-MHR Recuperator using Matlab and Simulink. The Ohio State University. Ohio. 2009.
- [5] Bracco S., Faccioli I., Troilo D. M. Dynamic Simulation Model of a Two-Fluids Heat Exchanger Based on a Numerical Discretization Method. University of Genoa. Engineering Faculty: Department of Machinery, Energy Systems and Transportation. Genoa. 2007.
- [6] Mazumder A., Mandal B. K. Numerical Modeling and Simulation of a Double Tube Heat Exchanger Adopting a Black Box Approach. Indian Institute of Engineering Science and Technology: Department of Mechanical Engineering. Shibpur. 2016.
- [7] Costiuc L., Popa V. Simulink Model for a Heat-Exchanger. Transilvania University. Brasov. 2009.
- [8] Buckner G. D. Simulink: a Graphical Tool for Dynamic System Simulation, NCSU ASME Technical Sessions. North Carolina State University: Department of Mechanical and Aerospace Engineering. North Carolina. 2002.
- [9] Ricker N. L. A Simulink Tutorial. Double-Pipe Heat Exchanger. University of Washington: Department of Chemical Engineering. Washington. 2001.
- [10] Levenspiel O. Chemical Reaction Engineering, Third Edition. Oregon State University: Department of Chemical Engineering. Corvallis. 1999. ISBN 0-471-25424-X