

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD

**POSREDNA DETEKCIJA OTVORENOSTI
PROZORA PROSTORIJE NA TEMELJU
LAKO MJERLJIVIH VELIČINA**

Marijan Jukić
Mentor: Mario Vašak

Zagreb, lipanj 2013.

Zahvala

Zahvaljujem svom mentoru, prof. dr. sc. Mariu Vašku na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći tijekom izrade diplomskog rada.

Zahvaljujem mag. ing. el. Vinku Lešiću na pruženoj pomoći, vremenu i savjetima.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji na pruženoj potpori tijekom studiranja.

Sadržaj

1	Uvod	4
2	Matematički model sustava	5
2.1	Opis prostorije	5
2.2	Matematički model otvora prozora	6
2.3	Matematički model prostorije	9
3	Estimacija otvorenosti prozora	12
3.1	UKF	12
3.1.1	UT	13
3.1.2	Algoritam za UKF	15
3.2	Realizacija Kalmanovog filtra za estimaciju otvorenosti prozora	17
4	Simulacija i rezultati	19
4.1	Blok shema toplinskog modela sustava	19
4.2	Simulacije i odzivi	21
4.2.1	Simulacija modela	21
4.2.2	Odziv Runge-Kutta funkcije	23
4.2.3	Odzivi estimiranih veličina	24
4.2.4	Simulacije s uključenim otvaranjem i zatvaranjem vrata sobe	37
5	Zaključak	44
6	Sažetak	46
7	Summary	47
8	Dodatak - Matlab kodovi	48
8.1	UKF	48
8.2	Funkcija modela	55
8.3	Ode4	58

Poglavlje 1

Uvod

Energetska učinkovitost jedna je od najvažnijih tema posljednjih nekoliko desetljeća. Povećanjem broja stanovnika porasla je i potreba za većim i bržim iskorištavanjem prirodnih resursa u svrhu proizvodnje energije. Međutim, prirodni resursi (nafta, drvo, ugljen ...) nisu jedini izvori energije pa je sve veća potreba za proizvodnjom energije iz obnovljivih izvora energije i učinkovitim trošenjem iste. To se ne odnosi samo na velike potrošače (industrija), već i na svako kućanstvo i svaku zgradu. Na primjeru jedne prostorije na FER-u pokazat ćemo kako se optimalno upravlja toplinskim procesima. Jedan od važnih čimbenika pri upravljanju toplinom je neprestano otvaranje i zatvaranje prozora i vrata. Cilj ovog seminara je dobiti profil otvorenosti prozora i vrata u određenom vremenskom intervalu. Otvorenost se može mjeriti potencijometrijski što je vrlo skupo pa samim tim i neefikasno. Umjesto direktnog mjerenja, otvorenost će se estimirati kao poremećajna veličina toplinskog sustava. Estimacija se provodi na temelju lako mjerljivih veličina (vanjske i unutarnjih temperatura i tlakova). Algoritam za estimaciju treba biti neosjetljiv na otvaranje vrata. Rad estimatora se prvo provjerava u Matlab/Simulink simulacijskom okruženju.

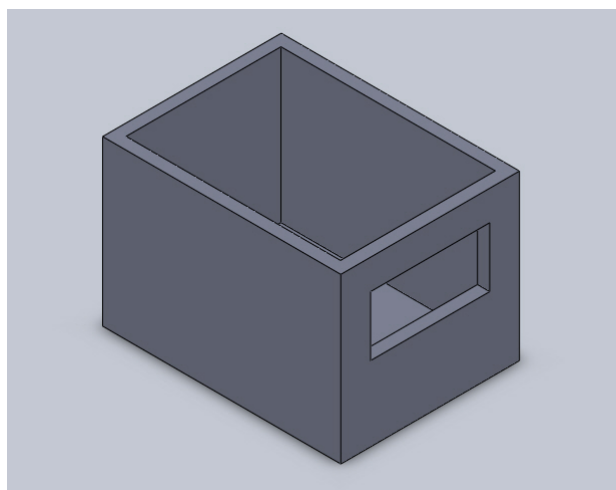
Poglavlje 2

Matematički model sustava

Matematički model prostorije se radi za prostoriju (sobu) na 9. katu neboderske zgrade Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu.

2.1 Opis prostorije

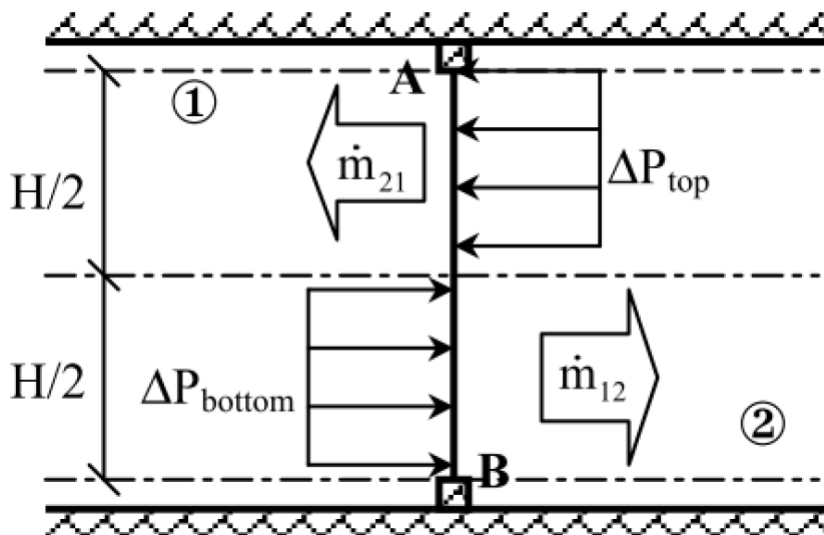
Prostorija (soba) koju koristimo je aproksimirana kvadrom. Visoka je 3, široka 4, a dugačka 2.5 metra. Volumen joj je $30 m^3$. Ima jedan prozor dimenzija $2 \times 1 m$. Prostorija je, dakle, okružena sa 5 strana susjednim sobama i hodnikom te je s jedne strane izložena vanjskom utjecaju. Na sljedećoj slici je prikazan 3D model prostorije.



Slika 2.1. 3D Model kuće (jedne prostorije)

2.2 Matematički model otvora prozora

Pri modeliranju ventilacije cilj je odrediti maseni protok zraka kroz otvor za što postoji više načina, složenijih i jednostavnijih. Da bi se odabrao prikladan način treba uzeti u obzir namjenu modela. Ovaj model koristit će se u simulaciji te u samom upravljanju temperaturom prostora. Dakle, poželjna karakteristika modela je jednostavnost proračuna toka, pošto to utječe na brzinu samog modela. Model služi za proračun tokova kroz velike otvore koji spajaju dvije zone.



Slika 2.2. Modeliranje otvora prozora

Razlike tlakova u donjem, odnosno gornjem dijelu računaju se pomoću sljedećih relacija (Woloszyn, M. 1999)

$$\Delta P_{bot} = (P_{2b} - 0.25\rho_2gH) - (P_{1b} - 0.25\rho_1gH) \quad (2.1)$$

$$\Delta P_{top} = (P_{1b} - 0.75\rho_1gH) - (P_{2b} - 0.75\rho_2gH) \quad (2.2)$$

Gdje su:

$\Delta P_{bot}, \Delta P_{top}$ - referentni tlakovi u zonama 1 i 2 [Pa]

ρ_1, ρ_2 - gustoća zraka u zonama 1 i 2 [$\frac{kg}{m^3}$]

g - gravitacijska konstanta, 9.81 [$\frac{m}{s^2}$]

H - visina otvora [m]

P_{1b}, P_{2b} - tlak na dnu otvora u zonama 1 i 2 [Pa]

$$\dot{m}_{12} = 0.5C_d L H \sqrt{2\rho_2 \Delta P_{top}} \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_{21} = 0.5C_d L H \sqrt{2\rho_1 \Delta P_{bot}} \quad (2.4)$$

Gdje su:

$\dot{m}_{12}, \dot{m}_{21}$ - tok zraka iz prve u drugu zonu, i obrnuto [$\frac{kg}{s}$]

L - širina otvora [m]

C_d - koeficijent pražnjenja

Tlak u pojedinoj prostoriji se računa prema sljedećem izrazu (Woloszyn, M. 1999):

$$P = \frac{mRT}{V} \quad (2.5)$$

Gdje su:

m - masa zraka u zoni [kg]

R - plinska konstanta za zrak, 287.055 [$\frac{J}{kgK}$]

T - temperatura zone [K]

V - volumen zone [m^3]

Masa zraka u sobi mijenja se ovisno o ulaznim, odnosno izlaznim tokovima. Formula za proračun mase u sobi je:

$$m = \int_0^t (\dot{m}_{12} - \dot{m}_{21}) dt \quad (2.6)$$

Gdje su:

q_u, q_i - ukupni ulazni, odnosno izlazni maseni tok iz sobe [$\frac{kg}{s}$]

Gustoća zraka u sobi se računa iz tlaka i temperature:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (2.7)$$

Iz masenih tokova se računaju toplinski tokovi. Jednadžba topline za sobu glasi:

$$\frac{d}{dt}(mcT) = \dot{m}_{12}cT_o - \dot{m}_{21}cT \quad (2.8)$$

Gdje su:

c - specifični toplinski kapacitet zraka, $1006 \left[\frac{J}{kgK}\right]$
 T_o - temperatura okoline $[K]$

U sobi se mogu mijenjati i temperatura i masa zraka. Zbog toga vrijedi sljedeći izraz:

$$\frac{dm}{dt}cT + mc\frac{dT}{dt} = \dot{m}_{12}cT_o - \dot{m}_{21}cT \quad (2.9)$$

Promjena mase ovisi o ulaznim i izlaznim tokovima, dakle vrijedi:

$$(\dot{m}_{12} - \dot{m}_{21})cT + mc\frac{dT}{dt} = \dot{m}_{12}cT_o - \dot{m}_{21}cT \quad (2.10)$$

te iz toga slijedi:

$$mc\frac{dT}{dt} = \dot{m}_{12}c(T_o - T) \quad (2.11)$$

Toplinski tok je onda:

$$H = q_u c(T_o - T) \quad (2.12)$$

2.3 Matematički model prostorije

Sada, kada imamo fizički opis prostorije i jednadžbe toplinskih tokova, može se izvesti matematički model prostorije. U modeliranju se uzimaju i neka pojednostavljena kako bi sve uopće bilo izvedivo na računalo. Jedno od pojednostavljenja (Starčić, A. 2011) je model zida kojemu je temperatura konstanta, iako se ona mijenja vremenom. Sam zid je dosta kompleksno modelirati jer se sastoji od više slojeva različitih toplinskih kapaciteta. Međutim, promjena temperature zida je relativno spora u odnosu na promjenu temperature prostorije pa je time njen utjecaj beznačajan.

Promjena mase unutar prostorije mijenja se prema sljedećem izrazu (Seem, J. E. 1987):

$$\frac{dm_u}{dt} = A(\varphi)C_d(\sqrt{2\rho_v\Delta P_{dno}} - \sqrt{2\rho_u\Delta P_{vrh}}) \quad (2.13)$$

gdje su:

$A(\varphi)$ - efektivna površina otvorenosti prozora [m^2]

ρ_v - vanjska gustoća zraka [kg/m^3]

ρ_u - gustoća zraka unutar prostorije [kg/m^3]

ΔP_{dno} - promjena vanjskog i unutarnjeg tlaka zraka na dnu prozora (donji dio) [Pa]

ΔP_{vrh} - promjena vanjskog i unutarnjeg tlaka zraka na vrhu prozora (gornji dio) [Pa]

Izraz za efektivnu površinu otvorenosti prozora glasi:

$$A(\varphi) = 0.5(\sqrt{l^2 - (l \sin \varphi)^2}(l \sin \varphi)^2 + (w - 2\sqrt{l^2 - (l \sin \varphi)^2}(h + l \sin \varphi)) \quad (2.14)$$

gdje su:

φ - kut otvorenosti prozora [rad/sec]

w - širina prozora [m]

h - visina prozora [m]

$l = \frac{w}{2}$ [m]

Unutarnja i vanjska gustoća zraka izražavaju se preko unutarnje mase zraka, temperature te vanjskog tlaka i temperature (sve veličine možemo izravno ili neizravno mjeriti):

$$\rho_v = \frac{P_v}{RT_v} \quad (2.15)$$

$$\rho_u = \frac{m_u}{MV_u} \quad (2.16)$$

Razlike tlakova na vrhu i dnu prozora također izražavamo prema gore navedenim veličinama (Seem, J. E. 1987):

$$\Delta P_{vrh} = \frac{m_u RT_u}{V_u M} - \frac{m_u g 0.75}{V_u M} - P_v + \frac{P_v g 0.75}{RT_v} \quad (2.17)$$

$$\Delta P_{dno} = \frac{m_u RT_u}{V_u M} - \frac{m_u g 0.25}{V_u M} - P_v + \frac{P_v g 0.25}{RT_v} \quad (2.18)$$

gdje su:

V_u - volumen zraka unutar prostorije [m^3]

T_u - unutarnja temperatura zraka [K]

T_v - vanjska temperatura zraka [K]

P_v - vanjski tlak zraka [Pa]

M - molarna masa zraka []

Iz jednadžbe promjene mase unutar prostorije slijedi izraz za promjenu temperature unutar prostorije:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{cm} (A_{zid} h_{zid} (T_{zid} - T) + c\dot{m}_{12} (T_o - T) + u_{grhl}) \quad (2.19)$$

gdje su:

c_z - toplinska vodljivost zraka []

A_{zid} - površina zida [m^2]

h_{zid} - koeficijent konvekcije zida []

T_{zid} - temperatura zida (u ovoj iteraciji se pretpostavlja konstantnom) [K]
 u_{grhl} - izvor grijanja/hlađenja unutar prostorije [W]

Promjena kuta otvorenosti prozora je konstantna:

$$\frac{d\varphi}{dt} = 0 \tag{2.20}$$

Poglavlje 3

Estimacija otvorenosti prozora

Iz postavljenih diferencijalnih jednadžbi sustava lako se vidi da je sustav nelinearan. Zbog toga se za estimaciju otvorenosti prozora (poremećaja sustava) koristi nederivacijski Kalmanov filter (UKF).

3.1 UKF

Za estimaciju parametara nelinearnih sustava koristi se prošireni Kalmanov filter (eng. extended Kalman filter) ili skraćeno EKF. EKF osigurava samo aproksimaciju optimalne estimacije nelinearnih sustava. Postoji više izvedbi algoritama EKF-a. Algoritam koji se ovdje koristi je nederivacijski Kalmanov filter (eng. unscented Kalman filter) ili skraćeno UKF. Osnovna razlika između EKF-a i UKF-a proizlazi iz ponašanja Gaussovih slučajnih varijabli, tj. njihove propagacije kroz dinamiku sustava. Kod EKF-a raspodjela stanja se aproksimira Gausovim slučajnim varijablama koje se lineariziraju (prvim redom) kao i nelinearni sustav. Ovo može prouzrokovati velike pogreške očekivanja i kovarijance koje ponekad mogu dovesti i do divergencije samog filtra. Kod UKF-a ovaj problem se rješava tako da se Gaussove slučajne varijable odaberu kao skup točaka. Njima se točno znaju očekivanje i kovarijanca i takvi dalje prolaze kroz nelinearni sustav.

Diskretni nelinearni sustav opisan je jedndžbama stanja i izlaza:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, \mathbf{v}_k) \quad (3.1)$$

$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{H}(\mathbf{x}_k, \mathbf{n}_k) \quad (3.2)$$

3.1.1 UT

Nederivacijska transformacija (eng. unscented transformation) ili skraćeno UT je metoda računanja statistika slučajnih varijabli koje podliježi nelinearnoj transformaciji. Pretpostavimo propagaciju slučajne varijable \mathbf{x} (dimenzije L) kroz nelinearni sustav $\mathbf{y} = f(\mathbf{x})$. Neka \mathbf{x} ima očekivanje $\bar{\mathbf{x}}$ i kovarijancu \mathbf{P}_x . Da bismo izračunali statistike od \mathbf{y} , formira se matrica χ od $2L + 1$ sigma vektora:

$$\chi_0 = \bar{\mathbf{x}} \quad (3.3)$$

$$\chi_i = \bar{\mathbf{x}} + (\sqrt{(L + \lambda)\mathbf{P}_x})_i \quad (3.4)$$

$$\chi_i = \bar{\mathbf{x}} - (\sqrt{(L + \lambda)\mathbf{P}_x})_{i-L} \quad (3.5)$$

gdje je $\lambda = \alpha^2(L + \kappa) - L$ koeficijent skaliranja.

Ovi sigma vektori propagiraju kroz nelinearnu funkciju:

$$y_i = f(\chi_i) \quad (3.6)$$

gdje se očekivanje i kovarijanca aproksimiraju sljedećim izrazima:

$$\bar{\mathbf{y}} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \mathbf{y}_i \quad (3.7)$$

$$\mathbf{P}_y = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \{\mathbf{Y}_i - \bar{\mathbf{y}}\} \{\mathbf{Y}_i - \bar{\mathbf{y}}\}^T \quad (3.8)$$

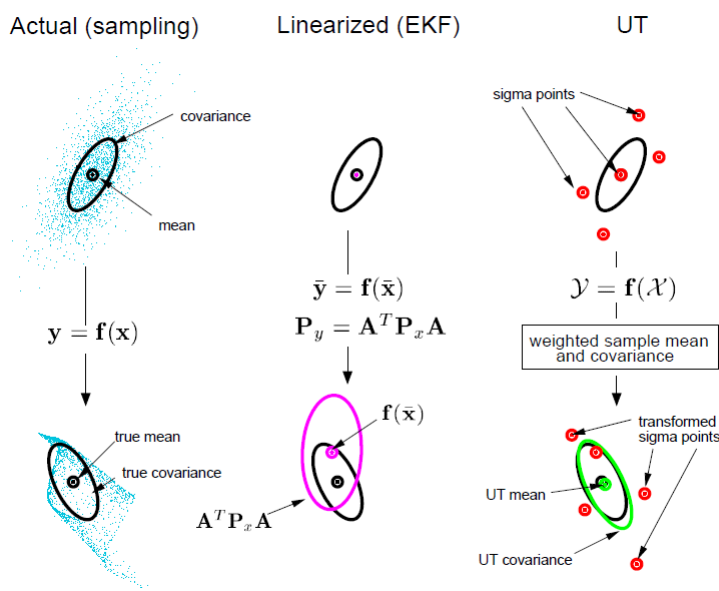
gdje su faktori otežavanja:

$$W_0^{(m)} = \frac{\lambda}{L + \lambda} \quad (3.9)$$

$$W_0^{(c)} = \frac{\lambda}{L + \lambda} + (1 - \alpha^2 - \beta) \quad (3.10)$$

$$W_i^{(m)} = W_i^{(c)} = \frac{1}{2(L + \lambda)} \quad (3.11)$$

Na sljedećoj slici je ilustrirana nederivacijska transformacija:



Slika 3.1. *Nederivacijska transformacija*

3.1.2 Algoritam za UKF

Inicijalizacija:

$$\hat{x}_0 = E[x_0] \quad (3.12)$$

$$P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T] \quad (3.13)$$

$$\hat{x}_0^a = E[x^a] = [\hat{x}^T \quad 0 \quad 0]^T \quad (3.14)$$

$$P_0^a = E[(x_0^a - \hat{x}_0^a)(x_0^a - \hat{x}_0^a)^T] = \begin{bmatrix} P_0 & 0 & 0 \\ 0 & R^v & 0 \\ 0 & 0 & R^n \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Računanje sigma točaka (za $k \in \{1, 2, \dots, \infty\}$):

$$\chi_{k-1}^a = [\hat{x}_{k-1}^a \quad \hat{x}_{k-1}^a + \gamma\sqrt{P_{k-1}^a} \quad \hat{x}_{k-1}^a - \gamma\sqrt{P_{k-1}^a}] \quad (3.16)$$

Time update:

$$\chi_{k|k-1}^a = F(\chi_{k-1}^x, u_{k-1}, \chi_{k-1}^v) \quad (3.17)$$

$$\hat{x}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \chi_{i,k|k-1}^a \quad (3.18)$$

$$P_0^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [\chi_{i,k|k-1}^a - \hat{x}_k^-][\chi_{i,k|k-1}^a - \hat{x}_k^-]^T \quad (3.19)$$

$$Y_{k|k-1} = H(\chi_{k|k-1}^a, \chi_{k-1}^n) \quad (3.20)$$

$$y_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} Y_{i,k|k-1} \quad (3.21)$$

Measurement update:

$$P_{\hat{y}_k \hat{y}_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [Y_{i,k|k-1}^a - \hat{y}_k^-][Y_{i,k|k-1}^a - \hat{y}_k^-]^T \quad (3.22)$$

$$P_{x_k y_k} = \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} [\chi_{i,k|k-1}^a - \hat{x}_k^-][Y_{i,k|k-1}^a - \hat{y}_k^-]^T \quad (3.23)$$

$$K_k = P_{x_k y_k} P_{\hat{y}_k \hat{y}_k}^{-1} \quad (3.24)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(y_k - y_k^-) \quad (3.25)$$

$$P_k = P_k^- - K_k P_{\tilde{y}_k \tilde{y}_k} K_k^T \quad (3.26)$$

gdje su:

$$x^a = [x^T \quad v^T \quad n^T]^T$$

$$\chi^a = [(\chi^x)^T \quad (\chi^v)^T \quad (\chi^n)^T]^T$$

$$\gamma = \sqrt{(L + \lambda)}$$

L -dimenzija varijabli stanja

R^v -kovarijanca procesnog šuma

R^n -kovarijanca mjernog šuma

W_i -faktori otežavanja

3.2 Realizacija Kalmanovog filtra za estimaciju otvorenosti prozora

Sada kada poznajemo rad nederivacijskog Kalmanovog filtra i imamo kompletan model sustava možemo odrediti sve ulaze i izlaze filtra. Ovi ulazi i izlazi razlikuju se od ulaza i zlaza samog sustava (i stanja sustava). Kalmanov filter koji implementiramo ima 5 ulaza i 3 izlaza:

$$u = [u_{grhl} \quad P_v \quad T_v \quad m_u \quad T_u]$$

$$y = [p_u \quad T_u \quad \varphi]$$

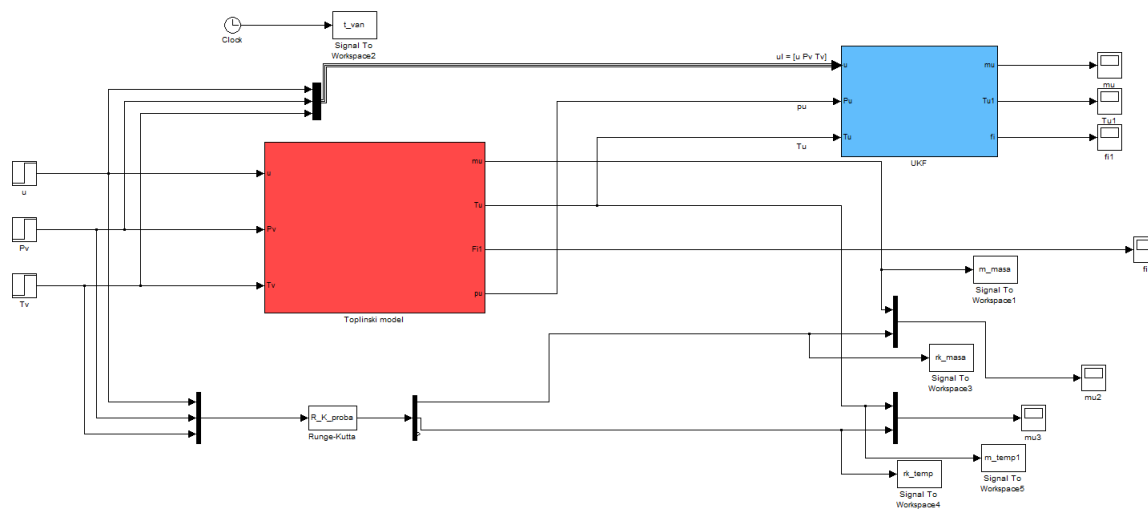
Poglavlje 4

Simulacija i rezultati

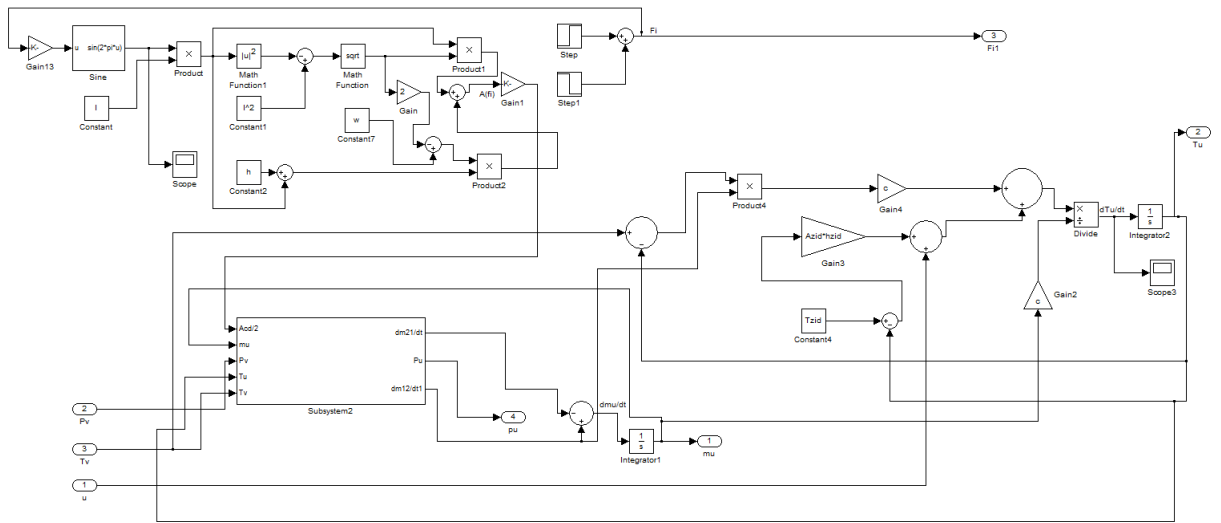
Sljedeći korak je implementacija modela sustava i nederivacijskog Kalmanovog filtra u Matlabu.

4.1 Blok shema toplinskog modela sustava

Na sljedećoj slici prikazana je blokovska shema toplinskog/ventilacijskog modela sustava s pripadajućim blokom UKF-a.

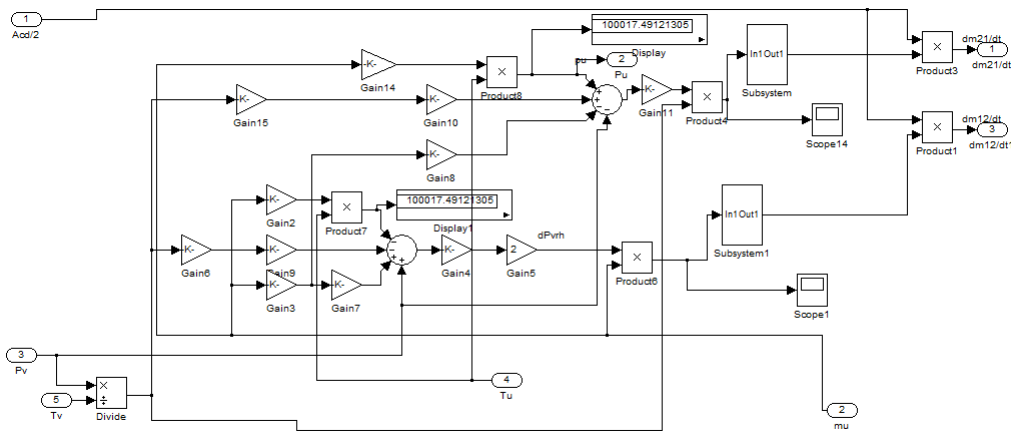


Slika 4.1. Toplinski/ventilacijski model sustava



Slika 4.2. *Podsustav modela koji prikazuje modeliranje otvorenosti prozora i proračun temperature i mase*

Na gornjoj blok shemi je prikazan dio modela opisan jednadžbama za promjenu mase i promjenu temperature. Gornji dio blok sheme predstavlja izraz za mijenjanje efektivne površine ulaska zraka kroz otvor (prozor).



Slika 4.3. *Podsustav koji prikazuje promjenu tlakova*

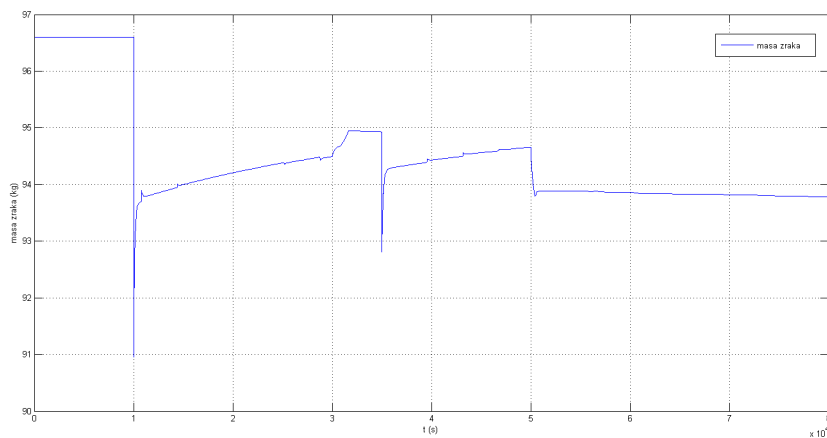
Ova blok shema predstavlja promjenu tlakova na gornjem, odnosno donjem dijelu prozora. Iz sheme je jasno vidljivo da postoje i određena ograničenja zbog korjenovanja, ali i neegativnog smjera kretanja zraka.

4.2 Simulacije i odzivi

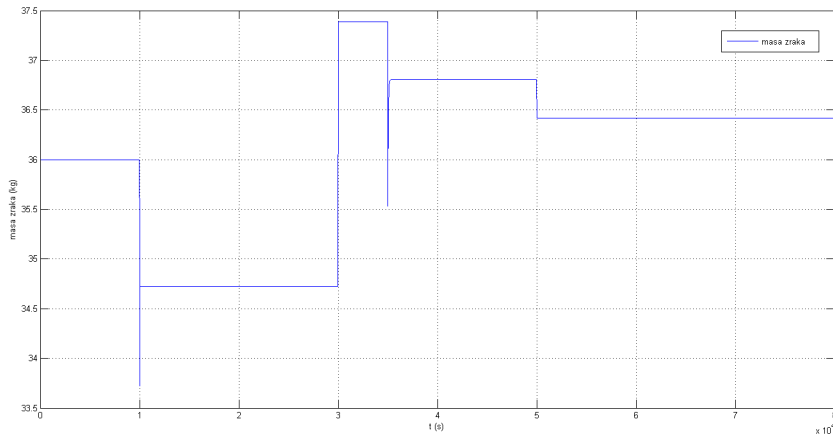
Simulacije sustava rađene su u vremenskom razdoblju od jednog dana (86400 sekundi) s vremenom uzorkovanja od 1 sekunde. Kao referenca točnog odziva sustava uzet je rad A. Starčića. Zbog smanjenog broja stanja i time pojednostavljenja kompleksnosti samog modela nije modeliran toplinski dio s matricama stanja. Za temperaturu zida (zidova) uzeta je konstantna vrijednost za prvu iteraciju zbog jednostavnosti, ali i smanjenog utjecaja temperature zida.

4.2.1 Simulacija modela

Simulacija kojom se provjerava točnost modela sustava kvalitativno se uspoređuje s onom A. Starčića. Još jedna razlika između ova dva modela je u tome što se vanjska temperatura u modelu A. Starčića mijenja, a u ovom modelu je konstantna. To utječe na promjenu mase u prostoriji, ali to nije od posebnog značenja jer je bitan faktor samo trenutak u kojem se prozor otvara i zatvara, odnosno ponašanje mase u okolini te točke. Na sljedeće dvije slike su prikazani odzivi mase i temperature jednog i drugog modela.



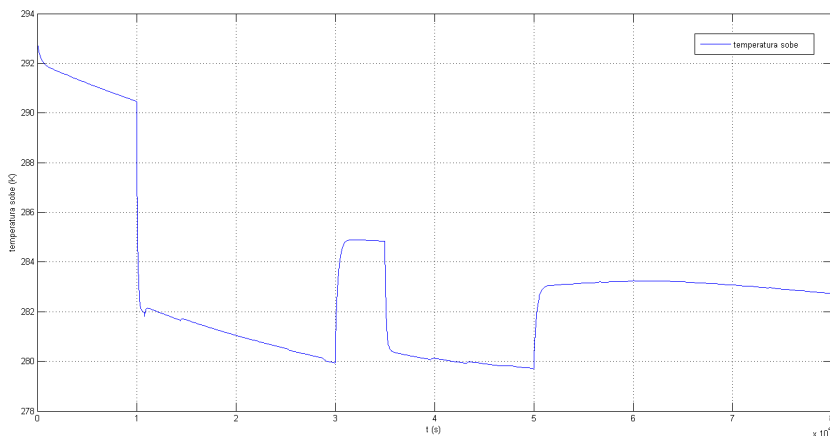
Slika 4.4. *Odziv mase zraka - A. Starčić*



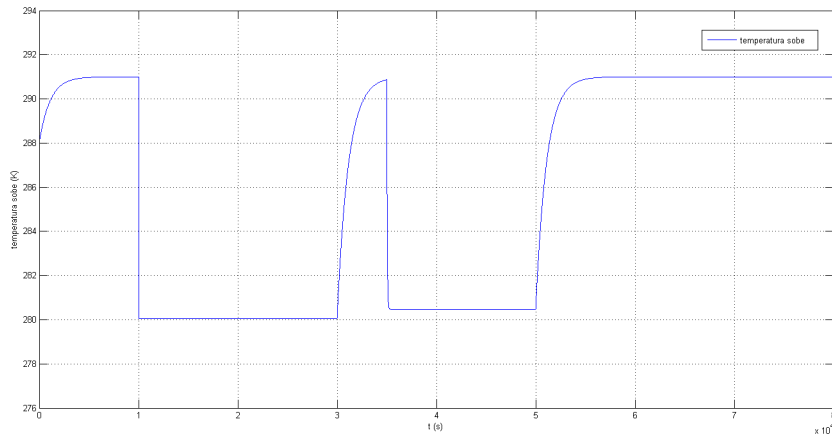
Slika 4.5. *Odziv mase zraka - promatrani model*

Simulacija je rađena tako da se prozor otvori nakon 10000 sekundi potpuno ($\pi/2$) te na 30000 zatvori i na 35000 ponovno otvori ($\pi/4$) pa na 50000 ponovno zatvori. Sa slika se jasno vidi da i jedan i drugi odziv pokazuju određenu nestabilnost promjene mase (tlaka). To se očituje na grafovima "skokovima" u trenucima otvaranja i zatvaranja prozora. To se događa zbog iznimne osjetljivosti sustava na male promjene te zbog činjenice da smo model idealizirali na način da ga promaramo kao termički izoliran sustav. To u praksi, naravno, nije slučaj. Za promatrani problem i ovakvo reagiranje promjene mase je zadovoljavajuće što će se i kasnije pokazati.

Na sljedeće dvije slike je usporedba temperatura soba za istu situaciju promjene otvorenosti prozora jednog i drugog modela.



Slika 4.6. *Odziv temperature sobe - A. Starčić*



Slika 4.7. *Odziv temperature sobe - promatrani model*

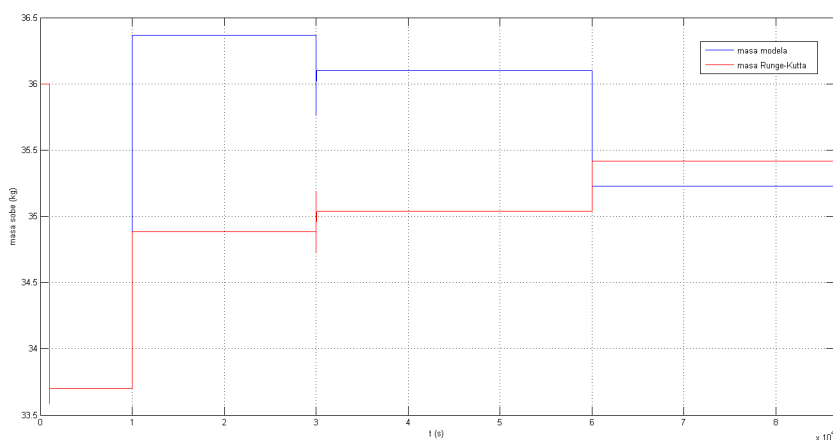
Iz gore prikazanih slika je vidljivo da se i temperature jednog i drugog modela mijenjaju gotovo identično.

Iz svih ovih grafova se može zaključiti da je model, iako pojednostavljen, dobar.

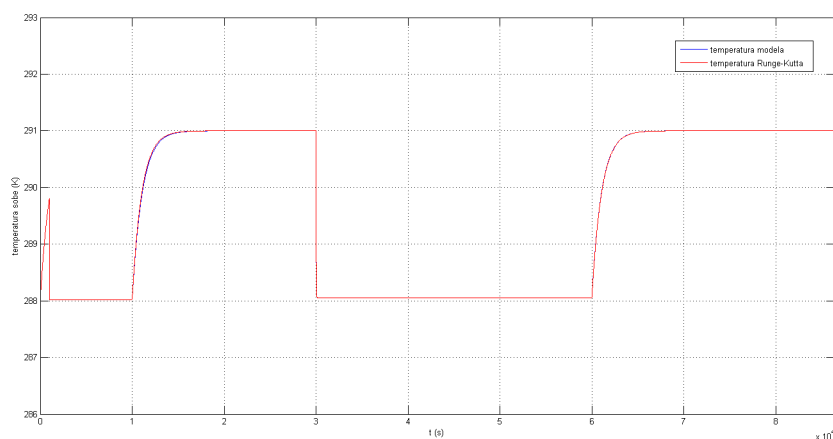
4.2.2 Odziv Runge-Kutta funkcije

Kako se za implementaciju UKF-a koristi ode4 funkcija (Runge-Kutta) potrebno je tu funkciju zasebno implementirati i provjeriti njen odziv. Odzivi bi se trebali potpuno poklapati s odzivom modela (masa i temperatura).

Na sljedećim slikama prikazana je usporedba odziva mase i temperature modela i Runge-Kutta funkcije.



Slika 4.8. *Odziv promjene mase zraka*



Slika 4.9. *Odziv promjene temperature*

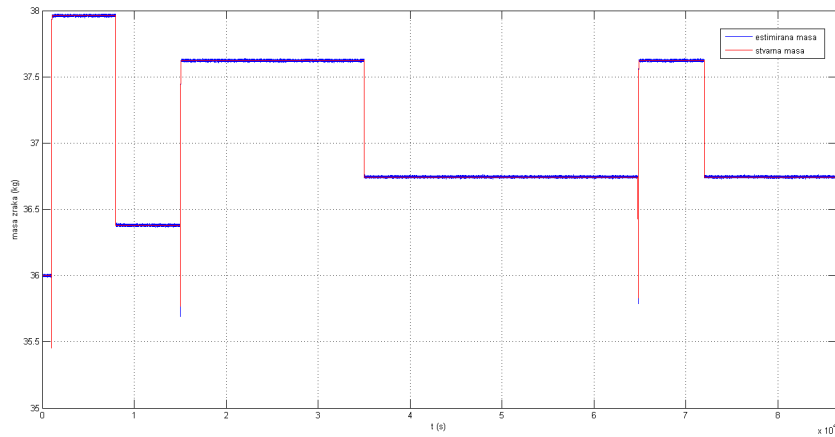
Sa slika se jasno vidi da se odzivi temperature idealno poklapaju, dok odzivi mase odstupaju za određeni iznos. To znači da se pri izboru matrica nesigurnosti kod projektiranja UKF-a o tome mora voditi računa. Više se u obzir mora uzimati iznos temperature, a manje mase jer je još jednom pokazano da je odziv mase nestabilan. Ipak, promjena mase se mora uzeti u obzir kod projektiranja UKF-a jer samo informacija o temperaturi nije dovoljna da bi se estimirala otvorenost prozora.

4.2.3 Odzivi estimiranih veličina

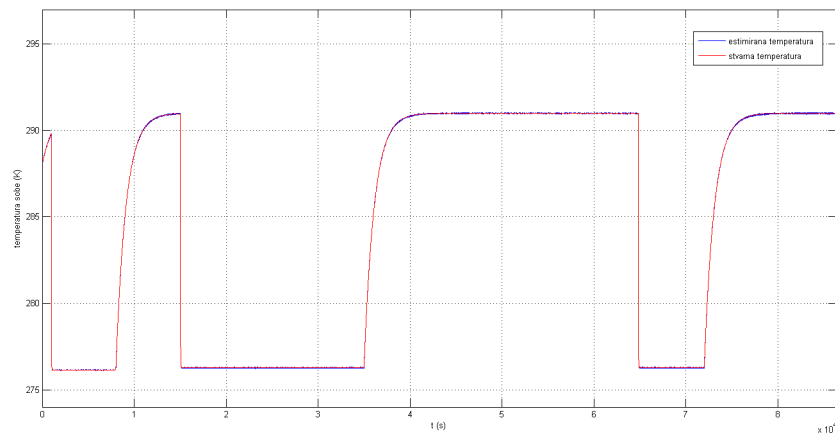
Prilikom implementiranja UKF-a vrlo je važno voditi računa o veličinama za koje smo poprilično sigurni da su toče (mjerjenja) i onima za koje nismo

toliko sigurni (masa). Zbog ovih problema vrlo je teško nekom određenom logikom doći do iznosa matrica Q i R UKF-a. Metodom pokušaja i pogreške određene su matrice za koje su odzivi postali zadovoljavajući.

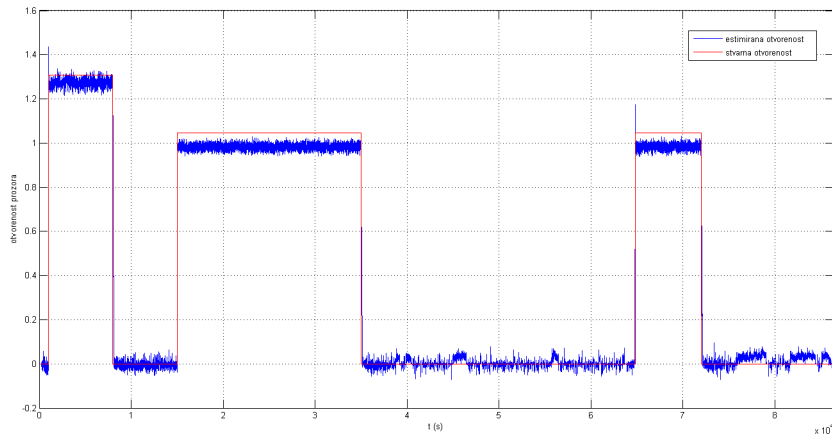
Testiranje je prvo napravljeno za vanjsku temperaturu veću od temperature sobe (i zida) te kasnije za nižu. Vanjska temperatura je pretpostavljena kao konstantna. Prozor se otvara na 1000 sekundi (zatvara na 8000), ponovno otvara na 15000 sekundi (zatvara na 35000) i još jednom otvara na 64000 sekundi (zatvara na 72000 sekundi). Dobiveni su sljedeći rezultati.



Slika 4.10. *Odziv promjene mase za $T_v = 30^\circ\text{C}$*



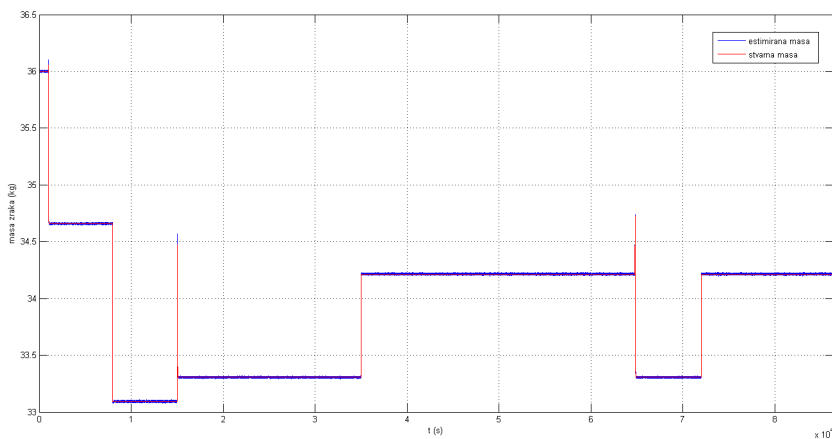
Slika 4.11. *Odziv promjene temperature za $T_v = 30^\circ\text{C}$*



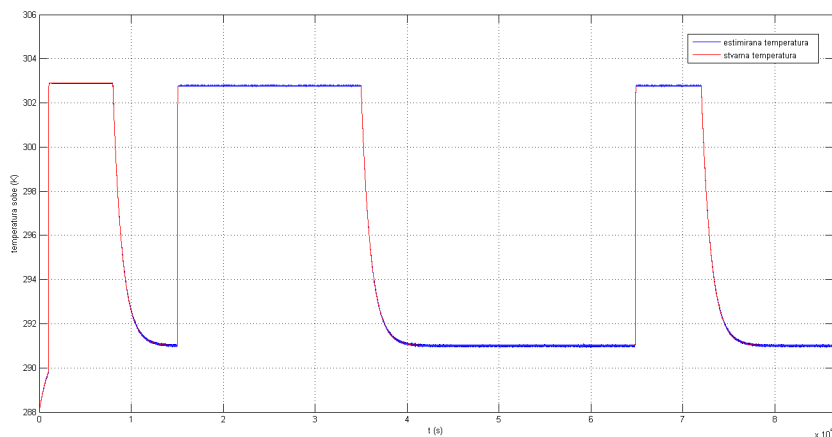
Slika 4.12. *Odziv otvorenosti prozora za $T_v = 30^\circ\text{C}$*

Sa grafova koji predstavljaju odzive temperature i mase se vidi da se stvarne i estimirane vrijednosti gotovo idealno poklapaju. Estimacija otvorenosti prozora (poremećajne veličine) je zadovoljavajuća iako postoji određeno odstupanje od stvarne veličine u stacionarnom stanju. Međutim, to nije presudno za ovu namjenu. Važno je da je odziv brz i koliko toliko prati stvarnu veličinu.

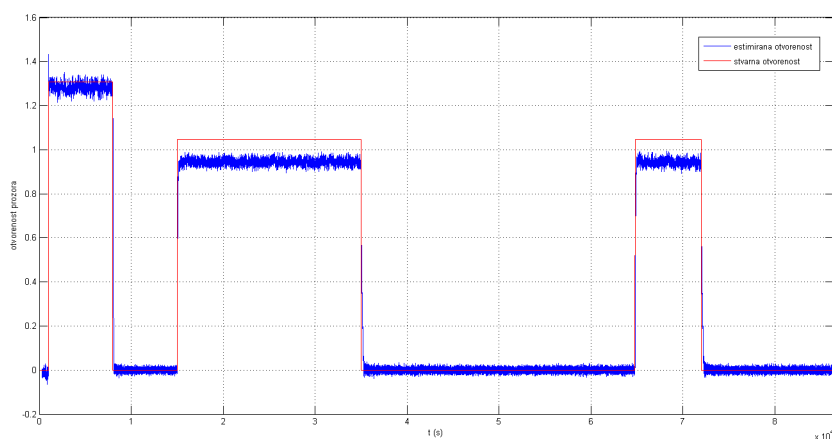
Sljedeće slike prikazuju odzive stvarnih i estimiranih veličina za vanjsku temperaturu od 4 stupnja celzijusa.



Slika 4.13. *Odziv promjene mase za $T_v = 4^\circ\text{C}$*



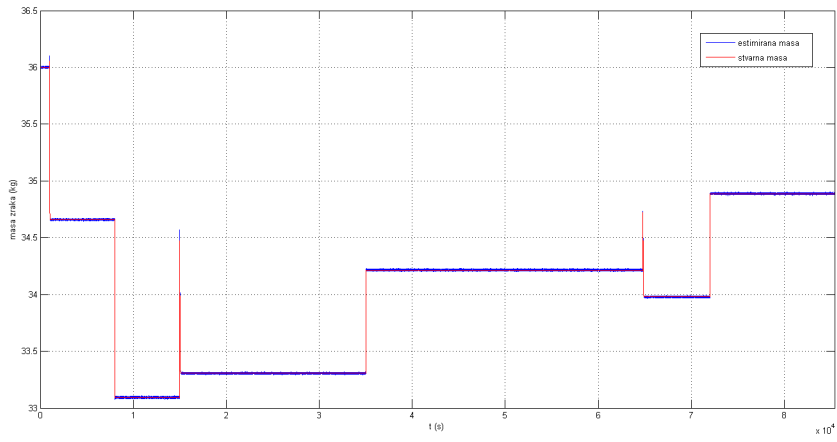
Slika 4.14. *Odziv promjene temperature za $T_v = 4^\circ\text{C}$*



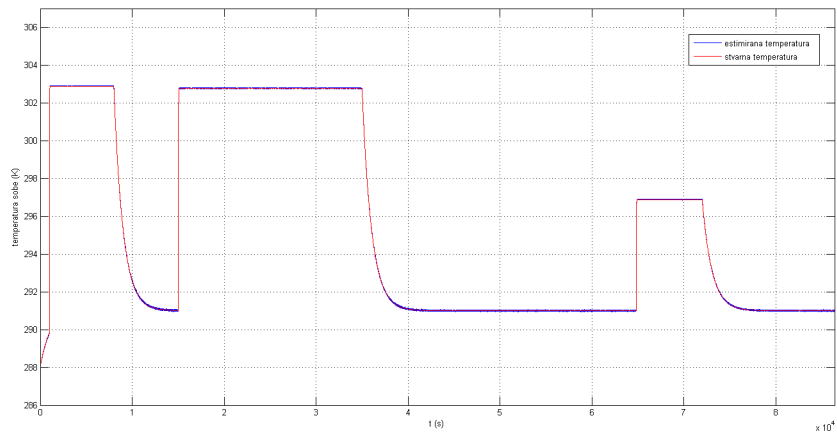
Slika 4.15. *Odziv otvorenosti prozora za $T_v = 4^\circ\text{C}$*

Sa sljedećih grafova je vidljivo da se UKF ponaša dobro te daje zadovoljavajuće rezultate i kada je vanjska temperatura niža od unutarnje.

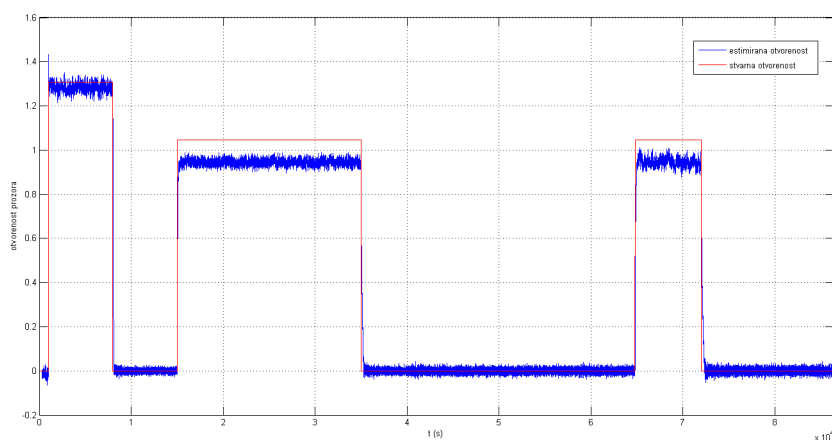
Potrebno je ispitati model i za situaciju kada se vanjska temperatura mijenja i te provjeriti utječe li ta promjena na estimaciju veličina. Uzet je slučaj da vanjska temperatura na 40000 sekundi padne s početnih 30 stupnjeva na 24 stupnja. Ponovno, ovo nije realna situacija, ali je za testiranje ponašanja modela u redu.



Slika 4.16. *Odziv promejene mase zraka za promjenu vanjske temperature*



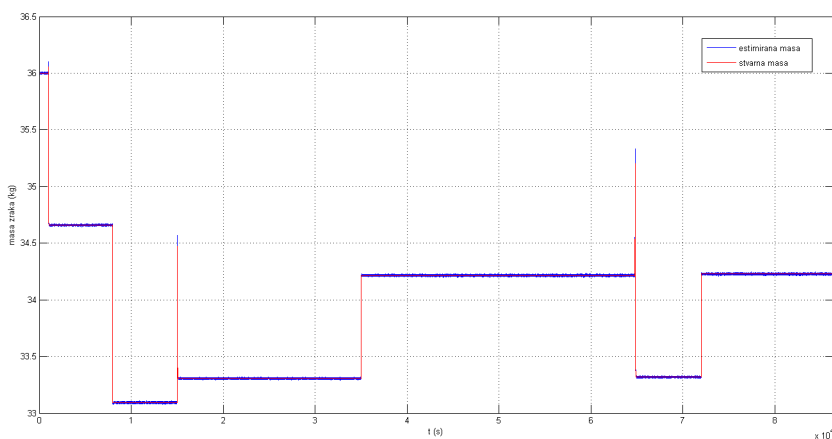
Slika 4.17. *Odziv promejen temperature za promjenu vanjske temperature*



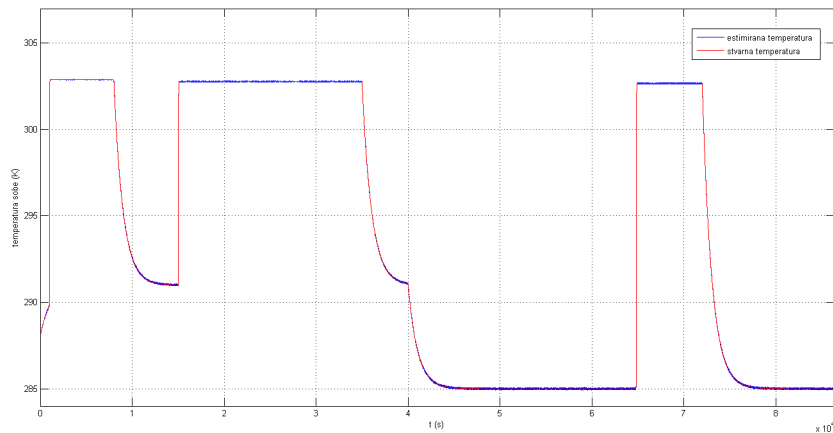
Slika 4.18. *Odziv otvorenosti prozora za promjenu vanjske temperature*

Sa gornjih slika se vidi da promjena vanjske temperature ne utječe na estimaciju otvorenosti prozora. Utječe na temperaturu sobe i estimaciju temperature sobe što je bilo i za očekivati.

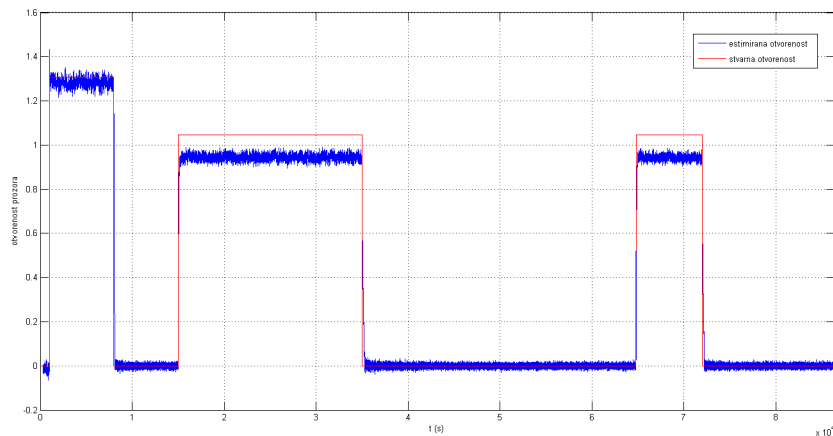
Sljedeća provjera je ponašanje modela i UKF-a na utjecaj promjene unutarnjeg izvora topline (U). U trenutku 40000 sekundi uključuje se unutarnji izvor topline iznosa -200 J. Dobiveni su sljedeći rezultati.



Slika 4.19. *Odziv promjene mase na promjenu unutarnjeg izvora topline*



Slika 4.20. *Odziv promjene temperature na promjenu unutarnjeg izvora topline*

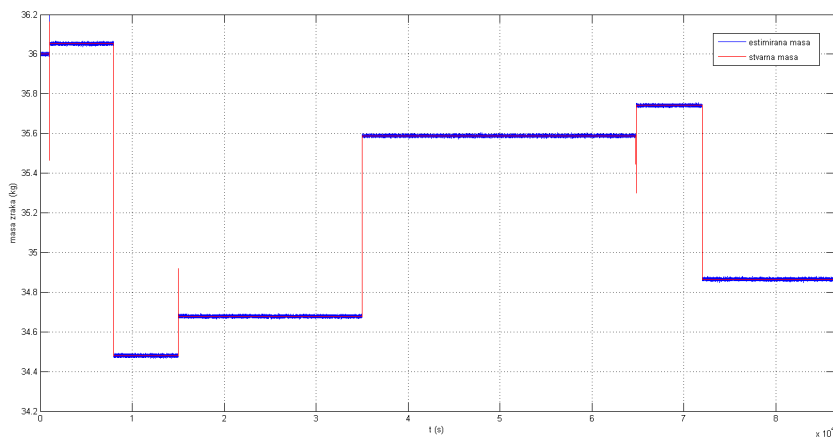


Slika 4.21. *Odziv otvorenosti prozora na promjenu unutarnjeg izvora topline*

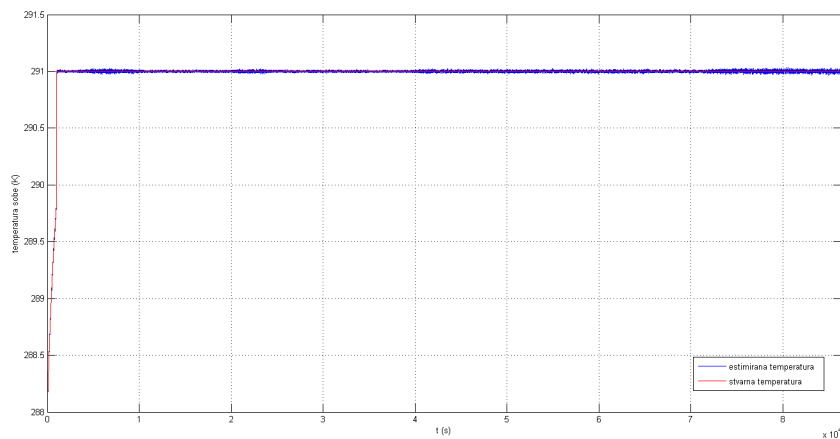
Sa grafova se jasno vidi da promjena unutarnjeg izvora topline utječe na promjenu topline sobe, ali ne utječe na estimaciju otvorenosti prozora. Još jednom, estimator promjenu temperature nije tretirao kao promjenu otvorenosti prozora. Iz ovoga se može izvući zaključak da je i promjena mase bitan faktor kako bi se estimirala otvorenost prozora, a ne samo promjena temperature.

Estimator je potrebno provjeriti i za slučaj kada je temperatura vani i unutra jednaka. Za očekivati je da u tom slučaju estimator neće dobro raditi jer jednostavno nema informaciju o promjeni temperature. Sve temperature

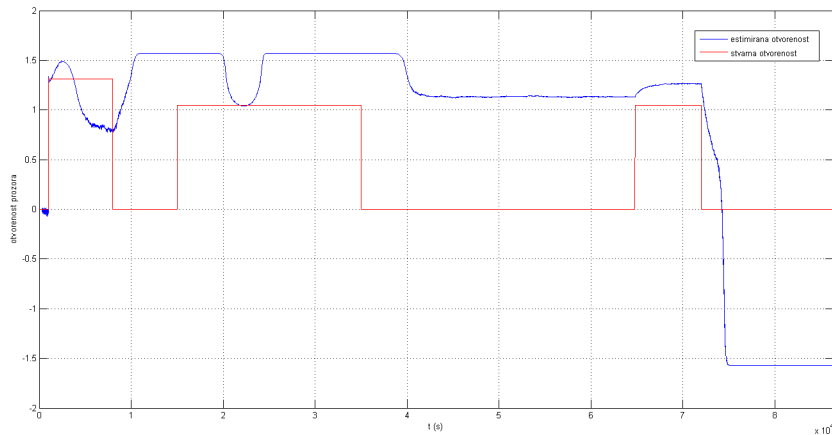
u simulaciji su postavljene na iznos od 18 stupnjeva. Dobiveni su sljedeći rezultati.



Slika 4.22. *Odziv promjene mase za istu temperaturu vani i unutra*



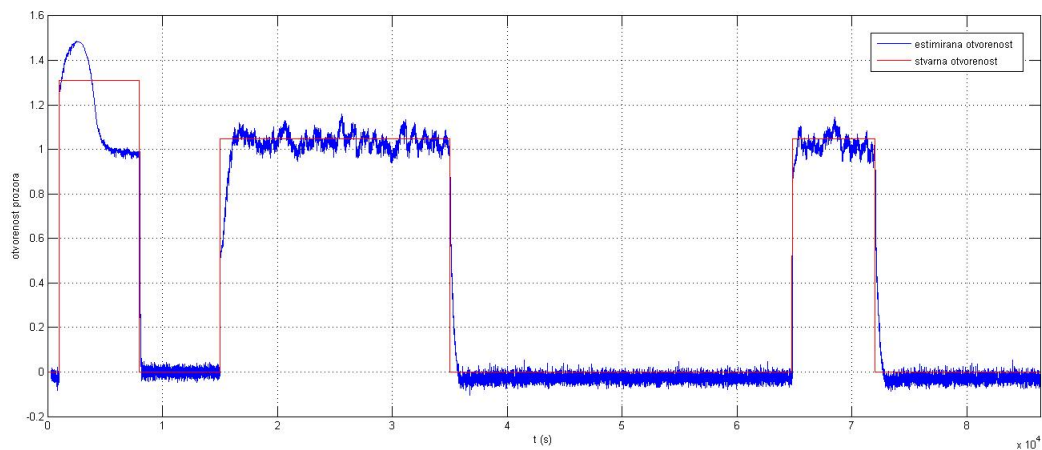
Slika 4.23. *Odziv promjene temperature sobe za istu temperaturu vani i unutra*



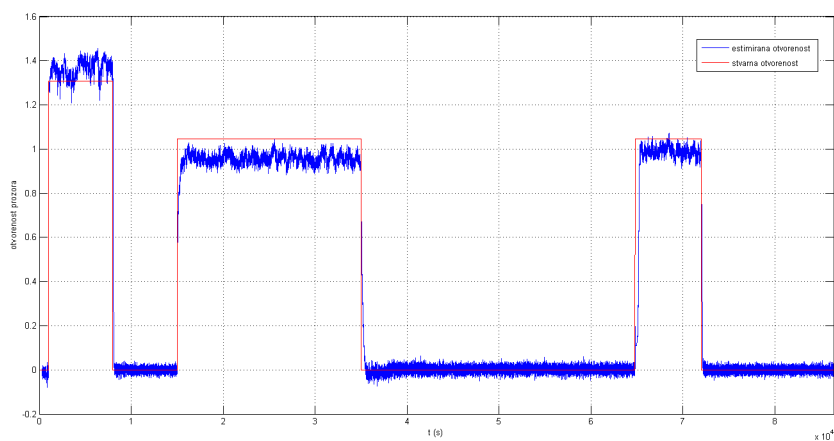
Slika 4.24. *Odziv otvorenosti prozora za istu temperaturu vani i unutra*

Iz gornjih grafova je vidljivo da su promjene mase i temperature svarnih vrijednosti i estimiranih vrijednosti jednake. Međutim, estimacija otvorenosti prozora ne radi dobro. Pošto nema informacije o promjeni temperature jer su unutarnja i vanjska temperatura jednake, estimacija ovisi samo o promjeni mase. Kako smo ranije rekli da je promjena mase nestabilna i estimacija otvorenosti prozora daje nerazumne rezultate. Zaključak je da estimacija otvorenosti prozora ovisi i o masi i o temperaturi kao što je bilo i za pretpostaviti.

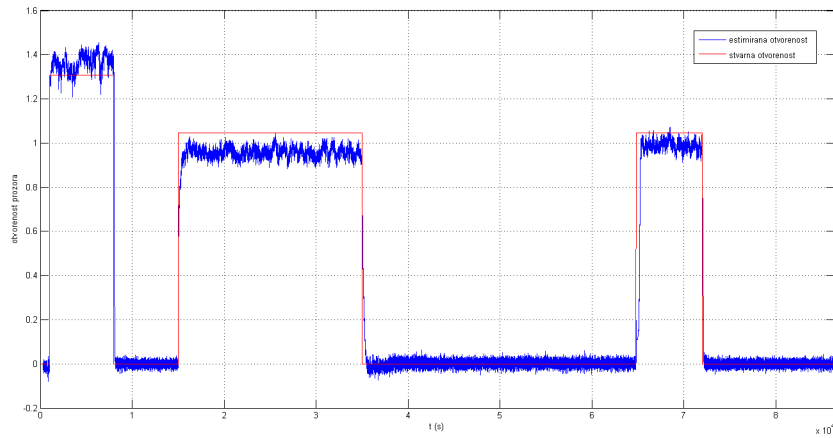
Vođeni ovom idejom potrebno je ispitati za koju vrijednost razlike temperatura unutra i vani estimacija radi dobro. Na sljedeće dvije slike prikazani su odzivi estimacija otvorenosti za razlike 1 i 2 stupnja razlike temperature unutra i vani.



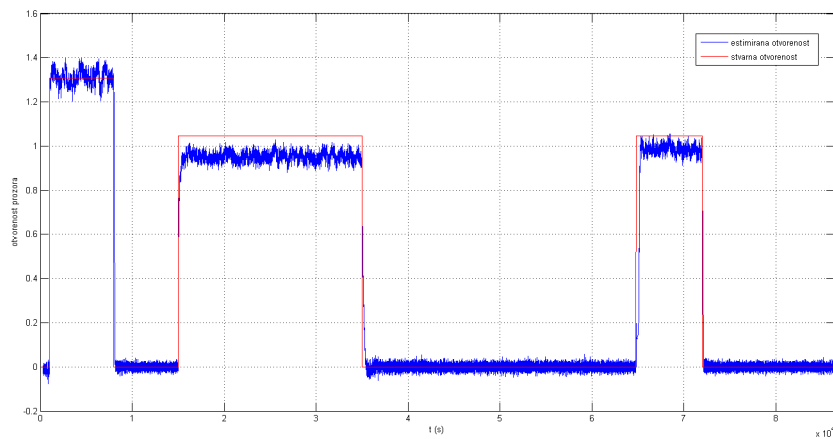
Slika 4.25. *Odziv otvorenosti prozora za razliku od 1 stupnja temperature vani i unutra*



Slika 4.26. *Odziv otvorenosti prozora za razliku od 2 stupnja temperature vani i unutra*



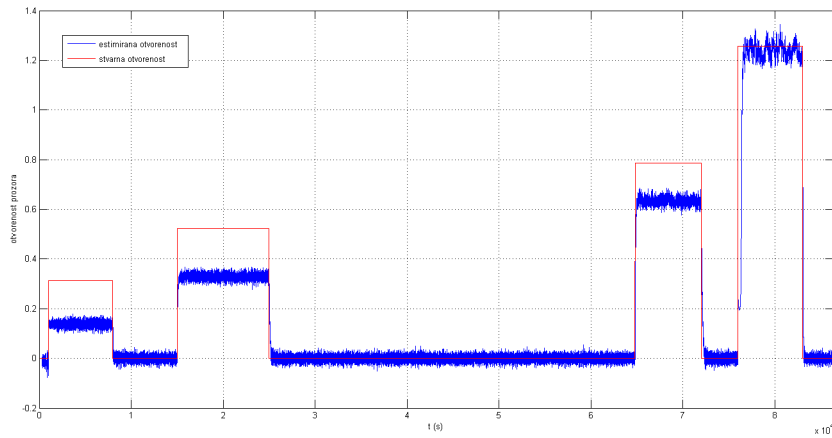
Slika 4.27. *Odziv otvorenosti prozora za razliku od 3 stupnja temperature vani i unutra*



Slika 4.28. *Odziv otvorenosti prozora za razliku od 4 stupnja temperature vani i unutra*

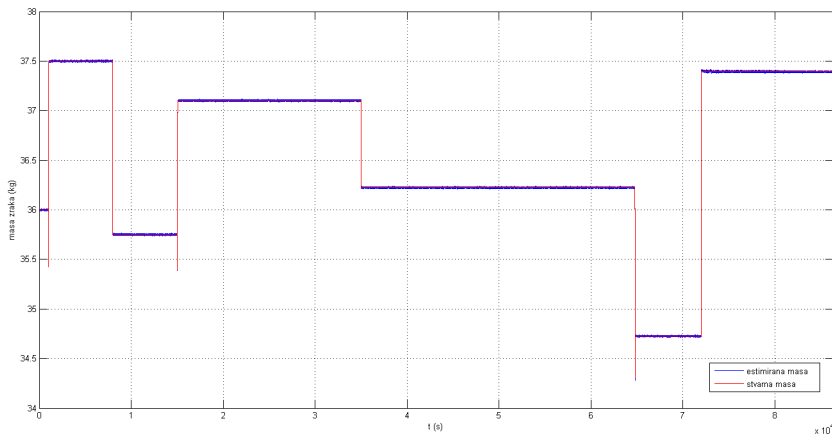
Sa gore prikazanih grafova jasno se vidi da je za razliku temperature od 1 ili 2 stupnja unutra i vanka estimacija neprecizna, ali se ipak može odrediti o kojoj se otvorenosti radi. Za veće razlike u temperaturi (4, 5 stupnjeva) estimacija se ustabilila.

Iz do sada viđenih grafova može se uočiti da estimacija ima određena odstupanja od stvarne vrijednosti otvorenosti za različite vrijednosti otvorenosti. Sljedeći graf pokazuje ponašanje estimacije za razne otvorenosti prozora.

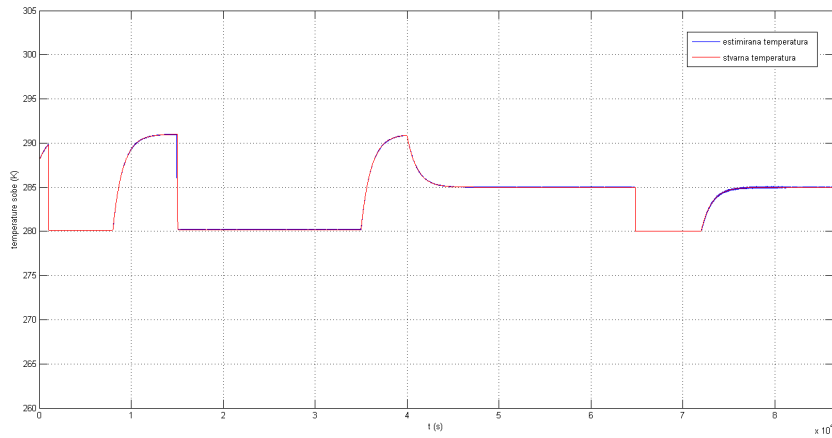


Slika 4.29. *Odziv estimirane otvorenosti prozora za različite otvorenosti*

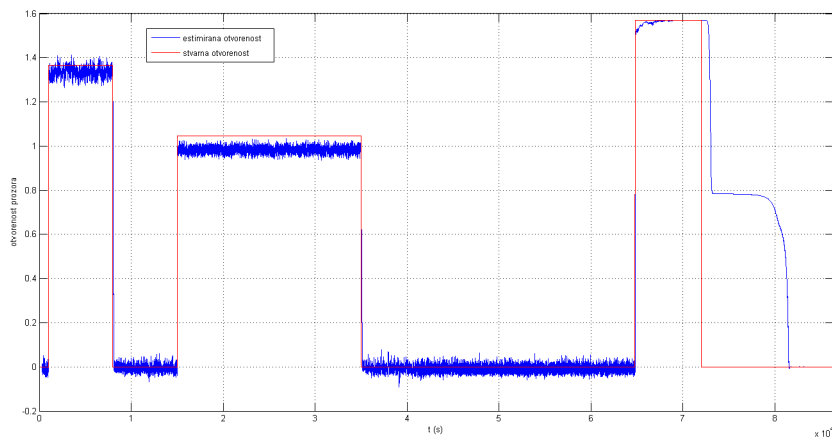
Sa slike se jasno vidi da estimirana otvorenost prozora bolje prati stvarnu otvorenost za veće vrijednosti otvorenosti, a lošije za manje. To je iz razloga što postoji veća nesigurnost za manje vrijednosti otvorenosti. Jedan specifičan slučaj je prikazan na sljedećoj slici, a radi se o situaciji kada je otvorenost prozora potpuna ($\pi/2$).



Slika 4.30. *Odziv mase za otvorenost $\pi/2$*

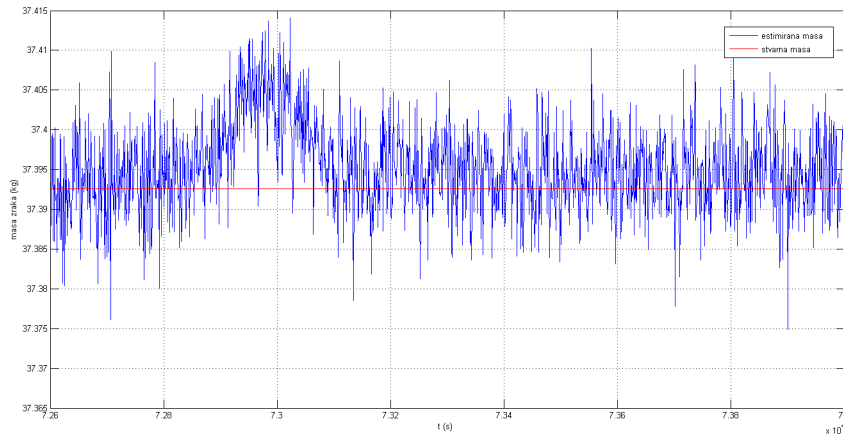


Slika 4.31. *Odziv temperature za otvorenost $\pi/2$*



Slika 4.32. *Odziv estimacije otvorenosti prozora za otvorenost $\pi/2$*

Sa grafa koji predstavlja odziv stvarne i estimirane otvorenosti prozora se vidi da postoji određena nesigurnost i pogreška kada je otvorenost prozora $\pi/2$. To iz prve ruke nije lako objasniti, ali se na jednom dijelu odziva promjene mase vidi čudno ponašanje te mase. U jednom trenutku, iako ne postoji nikakva promjena temperature, otvorenosti niti postoji utjecaj nekog unutarnjeg izvora, masa se na trenutak mijenja (skok). Upravo u tom trenutku se mijenja i estimirana vrijednost otvorenosti prozora. To je pokazano (za masu) na sljedećoj slici.



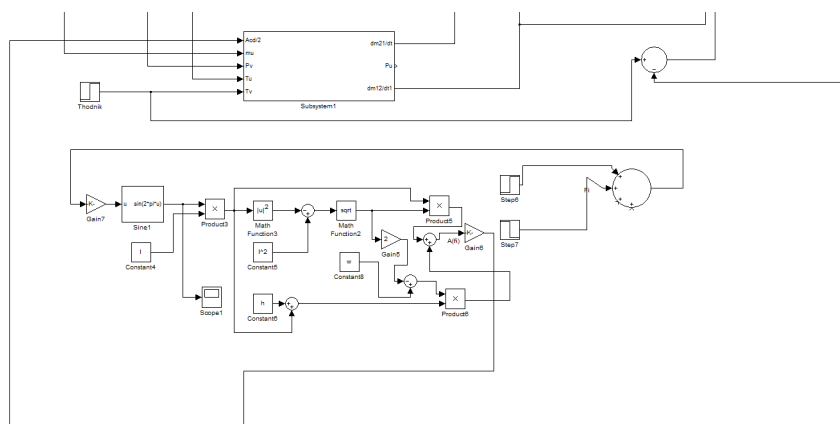
Slika 4.33. Uvećani prikaz "skoka" mase

Radi se o jedinstvenoj situaciji i za sada neobjašnjivom fenomenu. Slične situacije su za sve vrijednosti otvorenosti prozora blizu $\pi/2$. Simulacija se ustabilila za vrijednost otvorenosti 85 % u odnosu na punu otvorenost $\pi/2$ ($\pi/2.4$).

4.2.4 Simulacije s uključenim otvaranjem i zatvaranjem vrata sobe

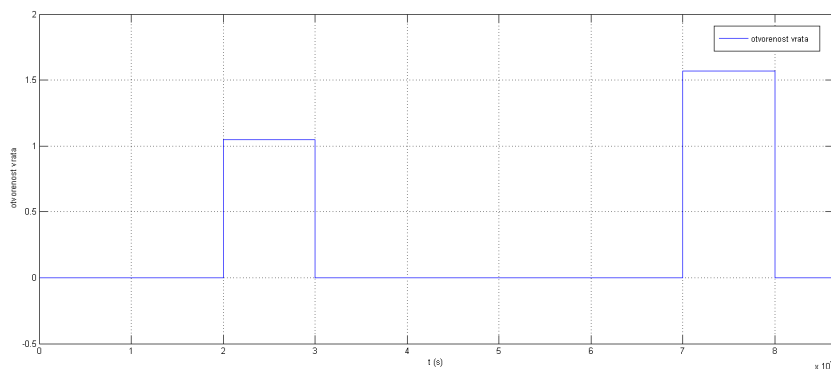
Sve do sada simulirano rađeno je s modelom koji pretpostavlja zatvorena vrata, tj. nema ih u samom modelu. S obzirom da je jedan od glavnih ciljeva ovog rada neosjetljivost algoritma na otvaranje vrata potrebno je provjeriti i taj slučaj.

Na sljedećoj slici je prikazan dio blok sheme koji predstavlja računanje efektivne površine vata kroz koji ulazi zrak s hodnika te proračun tlakova i masenih protoka.



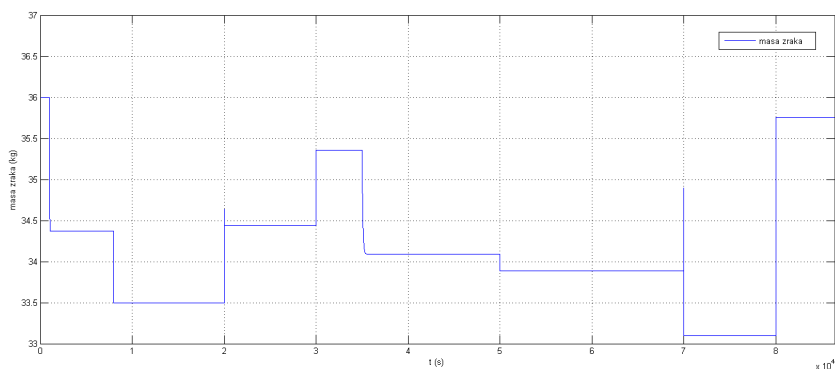
Slika 4.34. Dio blok sheme koji predstavlja model otvaranja vrata

Dakle, još je potrebno testirati UKF na otvaranje vrata. Sljedeća slika prikazuje profil otvorenosti vrata za koji je testiran model. Profil otvorenosti prozora je isti kao i u prošlom primjeru.

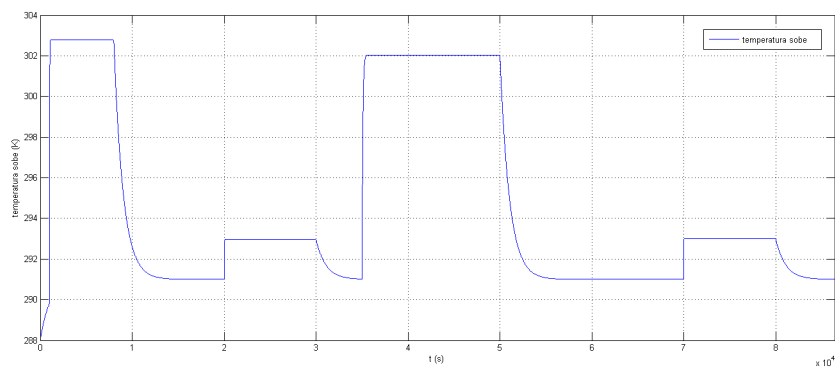


Slika 4.35. Profil otvorenosti vrata

Za gore navedeni profil otvorenosti provode se 2 testiranja - jedno za različite vrijednosti temperatura hodnika i temperature vani, a drugo za iste temperature. Dobiveni su sljedeći rezultati.



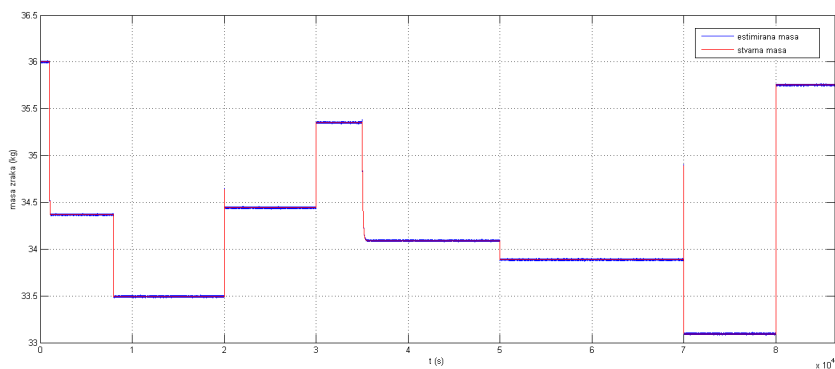
Slika 4.36. *Odziv promjene mase zraka u sobi*



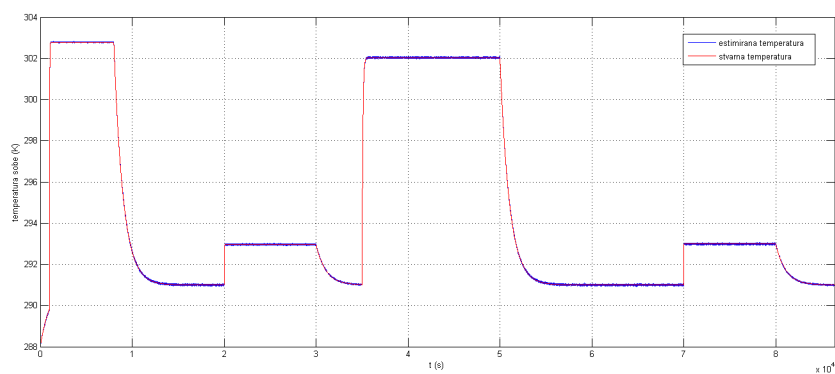
Slika 4.37. *Odziv promjene temperature sobe*

Iz gore prikazanih grafova jasno se vidi da je model u redu. Prilikom otvaranja prozora soba poprima vanjsku temperaturu, a prilikom otvaranja vrata temperaturu hodnika.

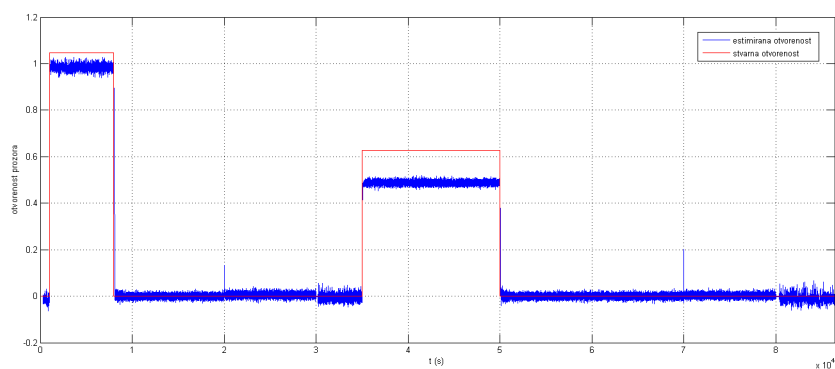
Sljedeće slike prikazuju odziv estimiranih veličina.



Slika 4.38. *Odziv promjene mase zraka*



Slika 4.39. *Odziv promjene temperature sobe*

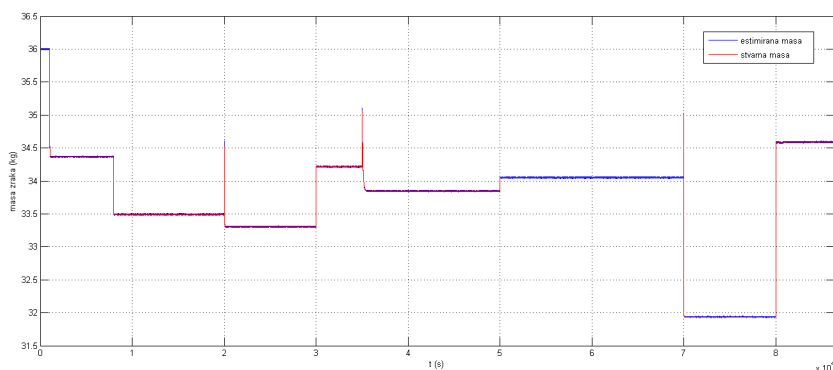


Slika 4.40. *Odziv otvorenosti prozora*

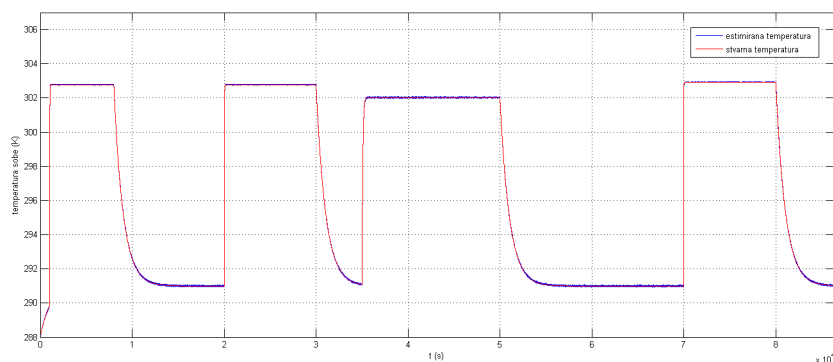
Iz gore prikazanih slika jasno se vidi da je estimacija mjerenih veličina ponovno gotovo idealna. S grafa estimacije otvorenosti prozora vidi se da je u trenucima

otvaranja vrata UKF reagirao, ali zbog razlike vanjske temperature i temperature hodnika nije to estimirao kao otvaranje prozora.

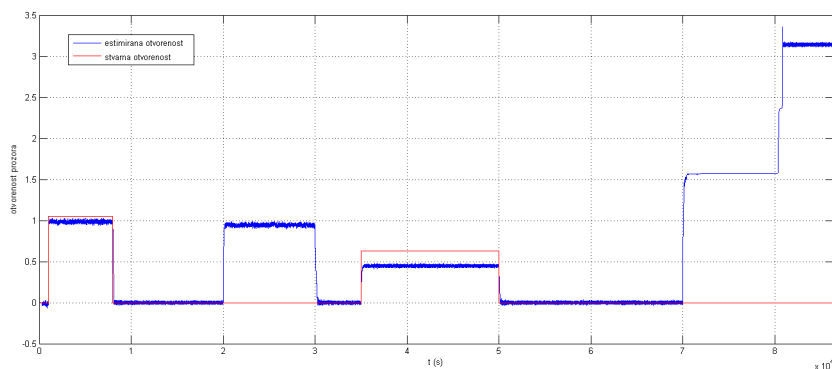
Sljedeća situacija je kada su temperature hodnika i vanjska temperatura iste. Za očekivati je da u tom slučaju estimator neće prepoznati kada su se otvorila vrata, a kada prozor. Dobiveni su sljedeći rezultati.



Slika 4.41. *Odziv promjene mase zraka*



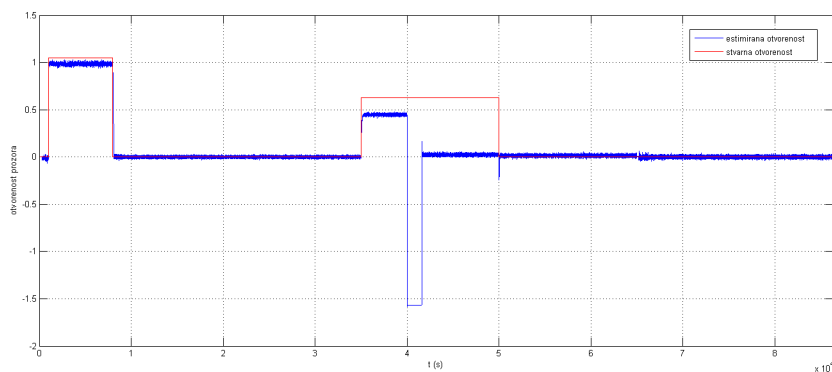
Slika 4.42. *Odziv promjene temperature sobe*



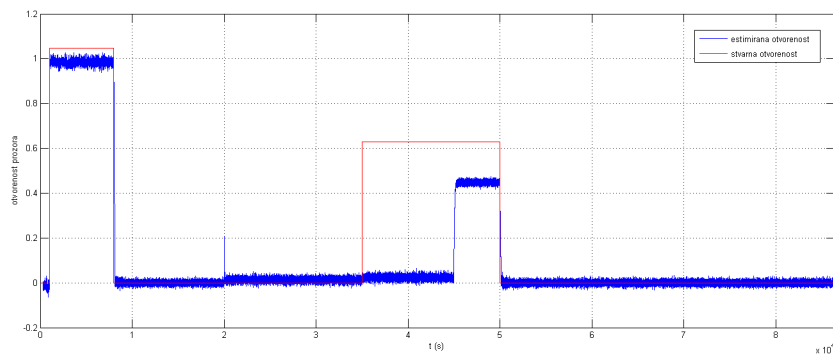
Slika 4.43. *Odziv otvorenosti prozora*

Sa grafa se jasno vidi da je estimator prepoznao otvaranje vrata kao otvaranje prozora zbog ranije navedenog razloga jednakosti temperatura.

Još su ostale dvije specifične situacije, a to su kada imamo otvaranje vrata za vrijeme kada je prozor otvoren i obrnuto. Sljedeće slike prikazuju ponašanje estimatora u tim slučajevima.



Slika 4.44. *Odziv otvorenosti prozora kada je prvo otvoren prozora pa vrata*



Slika 4.45. *Odziv otvorenosti prozora kada su prvo otvorena vrata pa prozor*

Sa slika se jasno vidi da estimator ne reagira dobro u situacijama kada se za vrijeme otvorenosti prozora otvore vrata i obrnuto.

Poglavlje 5

Zaključak

Modeliranje toplinskih procesa vrlo je izazovan problem posebno kada ga je potrebno prilagoditi i pojednostaviti kako bi se s njim dalje moglo manipulirati. To vrijedi kako za veće procese tako i za samo jednu jednu prostoriju s jednim prozorom i jednim vratima. Ipak, po odzivima temperature sobe možemo zaključiti da je model dobar za implementiranje Kalmanova filtra kao posredne metode detekcije otvorenosti prozora. Nakon što su ekperimentalno određeni iznosi matrica Q i R testiran je estimator. Pokazalo se da za jednake vrijednosti temperatura vani i unutar sobe on ne radi dobro što je bilo i za očekivati. U ostalim slučajevima estimator daje zadovoljavajuće rezultate. Problem otvaranja vrata u određenim slučajevima ne predstavlja problem estimatoru, ali u nekim situacijama ne prepoznaje jesu li otvorena vrata ili prozor te daje krive informacije. Ovaj problem je više simulacijske prirode jer u stvarnosti su vrata uglavnom zatvorena, a kada se otvore jako se brzo zatvaraju pa ona nebi trebala predstavljati problem. Također, u realnim uvjetima je i ponašanje promjene mase zraka stabilnije nego u samoj simulaciji pa bi eventualno trebalo promijeniti neke vrijednosti matrica nesigurnosti prilikom testiranja sustava u samoj prostoriji.

Bibliografija

- [1] Seem, J. E.: *Modeling of heat transfer in buildings*, 1999
- [2] Woloszyn, M.: *Airflow through large vertical openings in multizone modelling*, 1987
- [3] Starčić, A.: *Modeliranje i upravljanje toplinskim procesom u zgradi*, 2011

Poglavlje 6

Sažetak

Glavni zadatak i cilj ovog projekta je razviti posrednu metodu detekcije otvorenosti prozora. Prvo je razvijen toplinski model jedne prostorije FER-a s jednim prozorom i jednim vratima. U model nisu uzeti svi parametri potrebni za detaljan opis, ali nisu ni bili potrebni za ovu namjenu (radi jednostavnosti). Iako pojednostavljen, model je jako nelinearan i nestabilan. Nestabilnost mu se očituje ponajviše s obzirom na promjenu mase u prostoriji kada se otvore prozori ili vrata, iako je dio sustava za protok mase detaljno modeliran. Odzivi promjena temperature su se pokazali zadovoljavajućim pa je i model proglašen dobrim. S obzirom da je model nelinearan kao estimator otvorenosti prozora uzet je nederivacijski Kalmanov filtar (UKF). Uz napisan algoritam trebalo je odrediti iznose matrica nesigurnosti. To je napravljeno eksperimentalno. Estimator se pokazao relativno dobrim. U pojedinim situacijama nije dobro radio (ista vanjsaka i unutarnja temperatura), ali to je bilo za očekivati. Što se tiče neosjetljivosti na otvaranje vrata može se reći da je djlomično dobar. Ukoliko bi se algoritam primjenjivao na stvarnom sustavu vjerojatno će biti potrebno neke stvari redefinirati u Kalmanovu filtru, ali ideja bi trebala ostati ista.

Poglavlje 7

Summary

Main goal of this project was developing direct windows opening detection method. At first is developed transfer heat model of one room on FER with one window and one door. Model was simplified for this purpose, but it was very unlinear and unstable. Loss of stability was manifested beacause of mass flow in the room although it was very detailed model. Temperature responses were very good so it was good model. Beacuse of nonlinearity we used UKF for estimator. When algorithm was written we experimentaly defined Q and R matrix. Estimator showed good pefromances but there were some situations when it did not give good informations. It was expected. Algorithm is partialy sensitive to door opening. For real system use there have to be some changes in UKF and it should be fine.

Poglavlje 8

Dodatak - Matlab kodovi

8.1 UKF

```
function [sys ,x0 ,str ,ts] = UKF2(t ,x ,u ,flag ,xpoc ,T,Q,R1,R,Vu,M)

switch flag ,

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Initialization %
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 0 ,
        [sys ,x0 ,str ,ts]=mdlInitializeSizes (xpoc ,T);

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Derivatives %
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 1 ,
        sys=mdlDerivatives (t ,x ,u);

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Update %
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    case 2 ,
        sys=mdlUpdate (t ,x ,u ,Q ,R1 ,T ,R ,Vu ,M);

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    % Outputs %
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```



```

case 3,
    sys=mdlOutputs(t,x,u);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% GetTimeOfNextVarHit %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 4,
    sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Terminate %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
case 9,
    sys=mdlTerminate(t,x,u);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Unexpected flags %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
otherwise
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);

end

% end sfuntmpl

%
%=====
% mdlInitializeSizes
% Return the sizes, initial conditions, and sample times for the S-fun
%=====
%
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes(xpoc,T)

sizes = simsizes;

sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 20;
sizes.NumOutputs = 3;
sizes.NumInputs = 5;

```

```

sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1; % at least one sample time is needed

sys = simsizes(sizes);

%
% initialize the initial conditions
%
x0=xpoc;
x0(4) = 1; x0(8)=1; x0(12)=1; % poc. uvjeti za matricu kovarijanci
%
% str is always an empty matrix
%
str = [];

%
% initialize the array of sample times
%
ts = [T 0];

% end mdlInitializeSizes

%
%=====
% mdlDerivatives
% Return the derivatives for the continuous states.
%=====
%
function sys=mdlDerivatives(t,x,u)

sys = [];

% end mdlDerivatives

%
%=====
% mdlUpdate
% Handle discrete state updates, sample time hits, and major time step
% requirements.
%=====
%

```

```

function sys=mdlUpdate(t,x,u,Q,R1,T,R,Vu,M)

    %L=3; % broj stanja
    L=7;
    %%% VL - L je dimenzija pro irenog vektora [xs;0;0;0;0], zato 7 - b
    %alpha=1e-3; % alpha
    alpha=1;
    %%% VL
    %ki=0; % k=3-L
    ki=1;
    %%% VL
    beta=2; % beta
    lambda=alpha^2*(L+ki)-L; % lambda
    c=L+lambda; % c
    %Wm=[lambda/c 0.5/c+zeros(1,2*L)]; % weights for means
    Wm=[lambda/c 0.5*lambda/c+zeros(1,2*L)];
    %%% VL - mala promjena
    Wc=Wm;
    Wc(1)=Wc(1)+(1-alpha^2+beta); % weights for covarian
    c=sqrt(c);

    h=@(x,n)[x(1)+n(1); R/Vu/M*x(1)*x(2)+n(2)];
    %%% VL - mjerenje, dodao sam mjerni um

    ul=[u(3) u(4) u(5)];
    y=[u(1) u(2)]';

    xs=x(1:3);
    P=[x(4:6) x(7:9) x(10:12)];
    K=[x(15:16)'; x(17:18)'; x(19:20)'];
    y1=x(13:14);

    xs=xs+K*(y-y1); % Korekcija stanja uz mjerenja

    xs=[xs;0;0;0;0;0]; % Pro irivanje matrica xs i P
    P(4,4)=Q(1,1);
    P(5,5)=Q(2,2);
    P(6,6)=Q(3,3);
    P(7,7)=R1(1,1);
    P(8,8)=R1(2,2);

```

```

A = c*chol(P)'; %sigma to ke
Y = xs(:,ones(1,numel(xs)));
X = [xs Y+A Y-A];
%Xx=X(1:3,1:7);
Xx=X(1:3,1:2*L+1);
%%%%% VL – promjena zbog L=7, X ima 2*L+1=15 stupaca
Xv=X(4:6,1:2*L+1);
%%%%% VL – dio koji predstavlja procesni um
Xn=X(7:8,1:2*L+1);
%%%%% VL – dio koji predstavlja mjerni um

x1=zeros(3,1);
for i=1:size(Xx,2)
    %Xx(:,i)=f(Xx(:,i),ul);
    %Xx(:,i)=f(Xx(:,i),ul,Xv(:,i));
%%%%% VL – uba en procesni um

    pom = ode4(@funkcija_modela,[t,t+T],Xx(:,i),ul,Xv(:,i));
    Xx(:,i) = pom(2,:);

    %Xx(:,i) = funkcija_modela(Xx(:,i),ul,Xv(:,i));
    x1=x1+Wm(i)*Xx(:,i); %PRORAUN SLJEDEEG STANJA
end

X2=Xx-x1(:,ones(1,size(Xx,2)));
P1=X2*diag(Wc)*X2'; %Pk=Wc*(Xk-x)(Xk-x)'

% for i=1:size(Xx,2)
% P1=P1+Wc(i)*X2(:,i)*X2(:,i)';
% end

y1=zeros(2,1);
Y1=zeros(2,size(Xx,2));
for i=1:size(Xx,2);
    %Y1(:,i)=h(Xx(:,i));
    Y1(:,i)=h(Xx(:,i),Xn(:,i));
%%%%% VL – uba en mjerni um
    y1=y1+Wm(i)*Y1(:,i); %sljede i izlaz y
end
Y2=Y1-y1(:,ones(1,size(Xx,2)));
P2=Y2*diag(Wc)*Y2';

```

```

    P12=X2*diag(Wc)*Y2';
    K=P12/(P2);
    %P=P1-K*P12';
    P=P1-K*P2*K';
%%%% VL – malo modificirano prema formuli

    for i=1:size(P)
%%%% VL – ovaj dio je osiguranje da elementi na glavnoj dijagonali ma
        if P(i,i) < 1e-15
%%%% to je savjet koji sam pokupio od profesora. Radi i bez tog
            P(i,i) = 1e-15;
        end
    end

    aux=[];
    aux(1:3)=x1;
    aux(4:6)=P(1:3,1);
    aux(7:9)=P(1:3,2);
    aux(10:12)=P(1:3,3);
    aux(13:14)=y1;
    aux(15:16)=K(1,:);
    aux(17:18)=K(2,:);
    aux(19:20)=K(3,:);
    sys=aux;

% end mdlUpdate

%
%=====
% mdlOutputs
% Return the block outputs.
%=====
%
function sys=mdlOutputs(t,x,u)

    x1=x(1:3);
    y1=x(13:14);
    y=[u(1) u(2)]';
    K=[x(15:16)'; x(17:18)'; x(19:20)'];

```

```

        xs=x1+K*(y-y1);

        sys=xs;
    % end mdlOutputs

%
%=====
% mdlGetTimeOfNextVarHit
% Return the time of the next hit for this block. Note that the result is
% absolute time. Note that this function is only used when you specify
% variable discrete-time sample time [-2 0] in the sample time array in
% mdlInitializeSizes.
%=====
%
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)

sampleTime = 1; % Example, set the next hit to be one second later
sys = t + sampleTime;

% end mdlGetTimeOfNextVarHit

%
%=====
% mdlTerminate
% Perform any end of simulation tasks.
%=====
%
function sys=mdlTerminate(t,x,u)

sys = [];

% end mdlTerminate

```

8.2 Funkcija modela

```
function dx = funkcija_modela(t,x,u,v)

g=9.81;
Cd=0.65/20;
R=8.3144621;
cz=1006;
Vu=30;           %volumen zraka u prostori
M=0.0289644;     %molarna masa zraka
Tzid=18+273;     %temperatura zida (za sada se pretpostavlja konstan
Az=12;           %povr ina zida (4x3)
hz=2.778;        %koeficijent konvekcije zida
h=1;             %visina prozora
w=2;             %irina prozora
l=w/2;

    dx = zeros(3,1);

    %Racunanje dm/dt
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    pom1 = sin(x(3))*l;
    pom2 = l^2-pom1^2;
    pom3 = pom1*sqrt(pom2);
    pom4 = h+pom1;
    pom5 = w-2*sqrt(pom2);
    pom6 = pom4*pom5;
    %
    A = pom3 + pom6;
    %

    %
    p1_pom = (x(1)*R)/(M*Vu);
    p1 = p1_pom*x(2);
    p2_pom = (g*M*0.25)/R;
    p2 = p2_pom*(u(2)/u(3));
```

```

p3 = (g*0.25*x(1))/Vu;
%
p_bot = p1 + p2 - p3 - u(2);
%
%
p_bot_pom = (p_bot*2*M)/R;
ulaz1 = p_bot_pom*(u(2)/u(3));
%
%
izlaz1 = 0.25*(sign(ulaz1)+1)*sqrt(abs(ulaz1))*A*Cd;
%

%
p4 = (R*x(1)*x(2))/(Vu*M);
p5 = (0.75*g*M*u(2))/(R*u(3));
p6 = (0.75*g*x(1))/Vu;
%
%
p_top = u(2) + p6 - p4 - p5;
%
%
p_top_pom = (2*p_top)/Vu;
ulaz2 = p_top_pom*x(1);
%
%
izlaz2 = 0.25*(sign(ulaz2)+1)*sqrt(abs(ulaz2))*A*Cd;
%

%
dx(1) = izlaz2 - izlaz1;
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

%Racunanje dTu/dt
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
T_pom1 = u(3) - x(2);
T_pom2 = izlaz2;
T_pom3 = T_pom1*T_pom2*cz;
T_pom4 = Tzid - x(2);

```



```
T_pom5 = Az*hz*T_pom4 + u(1);
%
%
dx(2) = (T_pom3 + T_pom5)/(cz*x(1));
dx(3) = 0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
dx = dx + v;
end
```

8.3 Ode4

```
function Y = ode4(odefun ,tspan ,y0 ,varargin)

%

if ~isnumeric(tspan)
    error('TSPAN should be a vector of integration steps.');
```

```
end

if ~isnumeric(y0)
    error('Y0 should be a vector of initial conditions.');
```

```
end

h = diff(tspan);
if any(sign(h(1))*h <= 0)
    error('Entries of TSPAN are not in order.');
```

```
end

try
    f0 = feval(odefun ,tspan(1) ,y0 ,varargin{:});
catch
    msg = ['Unable to evaluate the ODEFUN at t0,y0. ',lasterr];
    error(msg);
end

y0 = y0(:); % Make a column vector.
if ~isequal(size(y0),size(f0))
    error('Inconsistent sizes of Y0 and f(t0,y0).');
```

```
end

neq = length(y0);
N = length(tspan);
Y = zeros(neq,N);
F = zeros(neq,4);

Y(:,1) = y0;
for i = 2:N
    ti = tspan(i-1);
    hi = h(i-1);
```

```
yi = Y(:, i - 1);
F(:, 1) = feval(odefun, ti, yi, varargin{:});
F(:, 2) = feval(odefun, ti + 0.5*hi, yi + 0.5*hi*F(:, 1), varargin{:});
F(:, 3) = feval(odefun, ti + 0.5*hi, yi + 0.5*hi*F(:, 2), varargin{:});
F(:, 4) = feval(odefun, tspan(i), yi + hi*F(:, 3), varargin{:});
Y(:, i) = yi + (hi/6)*(F(:, 1) + 2*F(:, 2) + 2*F(:, 3) + F(:, 4));
end
```