

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br. 2496

**Optimiranje ulazno-izlaznih energetske
tokova zgrade i susjedstva u stohastičkom
okruženju**

Valentina Mehkek

Zagreb, lipanj 2012.

Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Mariu Vašku na pomoći pri pisanju i razumijevanju ovog rada.

Sadržaj:

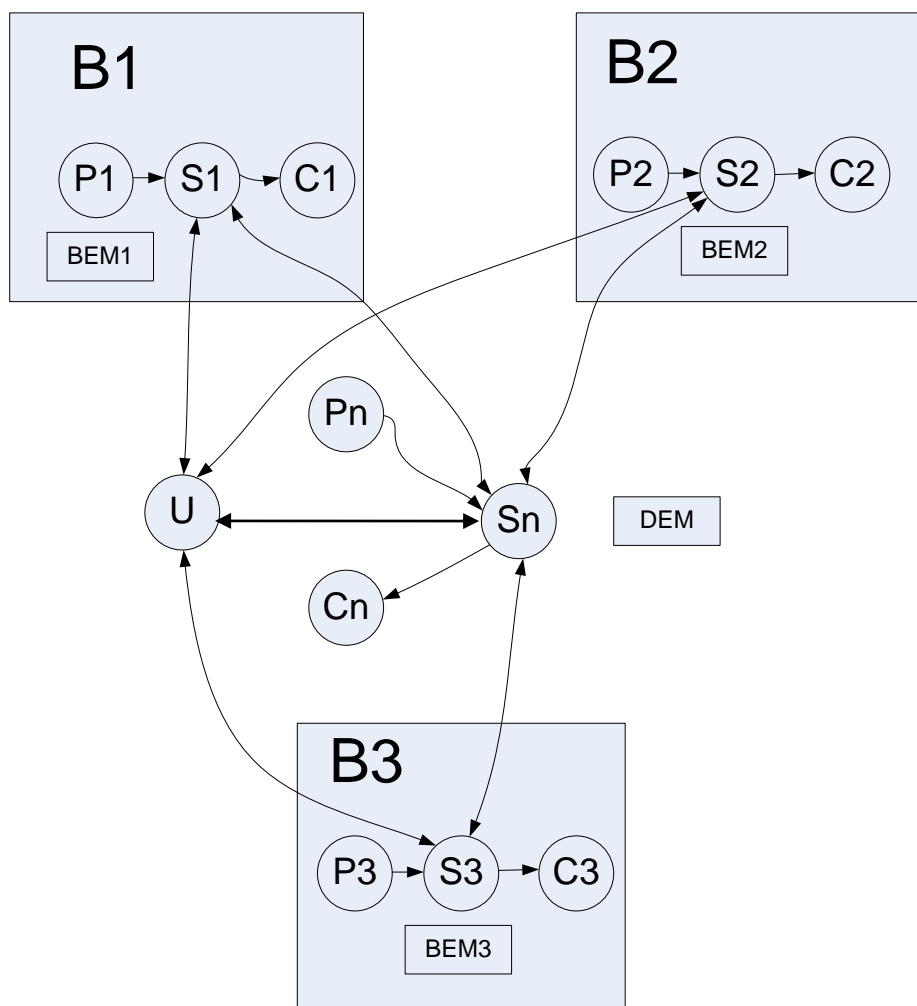
1. Uvod	1
2. BEM (building energy management)	3
2.1. Matematički model	4
2.2. Ograničenja.....	5
2.3. Kriterij.....	6
3. Determinističko modelsko prediktivno upravljanje	7
4. Stohastičko modelsko prediktivno upravljanje	11
4.1 Opis postupka optimizacije.....	11
4.2 Rezultati.....	15
5. Usporedba determinističkog i stohastičkog prediktivnog upravljanja	17
6. Zaključak	20
7. Literatura	21
Sažetak	22
Životopis	23

1.Uvod

U ovome se radu razrađuje optimizacijski algoritam za tzv. building energy management (BEM), odnosno algoritam koji će upravljati pohranom i izvlačenjem energije iz lokalnog spremnika prisutnog u zgradi te međusobnom trgovinom s mrežom i zajedničkim spremnikom svih zgrada. Glavni zadatak optimizacije zapravo je bio da se u svakom trenutku zna koliko trenutno energije imamo u svom spremniku, koliko energije proizvodimo, trošimo te na temelju tih podataka i podataka o cijenama prodaje odnosno kupnje energije program sam pronalazi najefikasniji i najprofitabilniji slučaj i za njega izračuna koliki je protok energije sa zajedničkim spremnikom i ukupna promjena energije zgrade. Također bitno je da svaka zgrada gleda svoju isplativost i korist trgovine energijom. Svi profili proizvodnje i potrošnje, te cijene kupnje i prodaje energije od distributera su poznati i proizvoljno odabrani.

Optimizacijski problem rješavan je na dva načina, stohastički i deterministički. Glavni zadatak zapravo je bio napraviti svaki zasebno te kasnije usporediti dobivene rezultate. Deterministički pristup u potpunosti odnosno 100% poštuje zadana ograničenja i na taj način daje optimalno rješenje za slučaj sasvim točnog predviđanja svih varijabli potrošnje i proizvodnje. Pošto se nikada sa sigurnošću ne može znati točan profil određenih veličina i kako će se one ponašati u sljedećem koraku, uvodimo stohastičko modelsko prediktivno upravljanje. U obzir se uzimaju nesigurnosti poremećajnih veličina koje djeluju na sustav.

Na slici 1. prikazana je konfiguracija zgrade prema kojoj se kasnije radi model, određuju ograničenja i provodi optimizacija.



Bi – Building i
 Pi – Local production in building i
 Ci – Consumption in building i
 Si – Storage in Building i
 BEMi – Building energy management system for building i
 Pn – Local production in neighbourhood
 Cn – Consumption in neighbourhood
 Sn – common storage in neighbourhood
 DEM – district energy management system
 U - utility

Slika 1. Konfiguracija tri zgrade sa zajedničkim spremnikom energije

2. BEM (building energy management)

U matematičkom modelu nalaze se mnoge oznake, pa za početak slijedi njihovo objašnjenje:

- C [kW] – energija koju troši zgrada
- P [kW] - energija koju proizvodi zgrada
- C_u [$\frac{kn}{kWh}$] - cijena energije javne mreže
- C_z [$\frac{kn}{kWh}$] - cijena energije zajedničkog spremnika
- $S_{n \rightarrow 1 \min}$ [kW] – najmanja snaga koju možemo prodati zajedničkom spremniku
- $S_{n \rightarrow 1 \max}$ [kW] – najveća snaga koju možemo kupiti iz zajedničkog spremnika
- $U_{1 \min}$ [kW] - najveća snaga koju možemo prodati javnoj mreži
- $U_{1 \max}$ [kW] - najveća snaga koju možemo kupiti iz javne mreže
- $S_{1 \max}$ [kWh] - kapacitet spremnika zgrade
- $S_{1,0}$ [kWh] - početno stanje spremnika zgrade

Oznake su slične onima sa slike 1. radi lakšeg razumijevanja i praćenja formula.

Sljedeće tri najbitnije stvari koje se definiraju su model, kriterij i ograničenja koja se koriste kod optimizacije.

2.1. Matematički model

Matematički model koji opisuje ponašanje sustava opisan je u sljedeće dvije jednačbe:

$$S_{1,k+1} = S_{1,k} + S_{1u,k} * \Delta t \quad [kWh] \quad (2.1)$$

$$S_{1u,k} = U_{1,k} + P_{1,k} - C_{1,k} + S_{n \rightarrow 1,k} \quad [kW] \quad (2.2)$$

Bitno je napomenuti da se u svim jednažbama koristi $\Delta t=1h$.

Jednažba (2.1) prikazuje kako je količina energije spremnika u jednom koraku jednaka zbroju energije spremnika na kraju prethodnog koraka i promjeni količine energije (S_{1u}) tokom trenutnog koraka odnosno jednog sata.

Jednažba (2.2) objašnjava što je to promjena količine energije u jednom koraku odnosno satu, kao razlika i zbroj svih doprinosa energija promatranoj zgradi.

2.2. Ograničenja

Kapacitet spremnika, maksimalna količina energije koju možemo unutar jednog koraka (sata) prodati ili kupiti od javne mreže ili zajedničkog spremnika odabrani su proizvoljno i zapisani u tablici.

Parametar	Vrijednost
$S_{n \rightarrow 1 \min}$	-10 kW
$S_{n \rightarrow 1 \max}$	10 kW
$U_{1 \min}$	-4 kW
$U_{1 \max}$	4 kW
$S_{1 \max}$	5 kWh
$S_{1,0}$	3 kWh

Tablica 1. Parametri modela

No, ta ograničenja zadana su i kroz 3 jednađbe koje se koriste u algoritmu za optimizaciju.

Prva jednađba koja ograničava koliko se maksimalno energije kupuje iz zajedničkog spremnika odnosno $|S_{n \rightarrow 1 \max}|$ te koliko se energije najviše može prodati tom istom spremniku $|S_{n \rightarrow 1 \min}|$ je:

$$S_{n \rightarrow 1 \min} \leq S_{n \rightarrow 1, k} \leq S_{n \rightarrow 1 \max} \quad (2.3)$$

Sljedeća jednađba kojom se regulira razmjena energije s javnom mrežom je:

$$U_{1 \min} \leq U_{1, k} \leq U_{1 \max} \quad (2.4)$$

gdje je $|U_{1 \max}|$ najveća količina energije koja se može prodati mreži u jednom koraku, a $|U_{1 \min}|$ najveća količina energije koja se može kupiti iz mreže u jednom koraku (satu).

Koriste se apsolutne vrijednosti zbog toga što pozitivni predznak na grafovima predstavlja kupnju energije, a negativni prodaju.

Jednađbom

$$0 \leq S_{1, k} \leq S_{1 \max} \quad (2.5)$$

se regulira spremanje energije u spremnik zgrade, pri čemu se pazi da se ne prekorači njegov kapacitet $S_{1 \max}$, ili uzme više energije nego što je pohranjeno, $S_{1, k} \geq 0$.

2.3. Kriterij

Kao kriterij koristi se sljedeća jednačba:

$$J = \Delta t * \sum_{i=0}^k (C_{u,i} U_{1,i} + C_{z,i} S_{n \rightarrow 1,i}) - C_s S_{1,k} \quad (2.6)$$

Ovdje se pojavljuje nova nepoznanica C_s koja predstavlja cijenu energije spremnika zgrade i iznosi 0.39 kn/kWh, a dobivena je kao prosječna cijena iz mreže.

U jednačbi (2.6) umnožak cijene C_s i stanja spremnika $S_{1,k}$ koristi se kako se ne bi uvijek praznio spremnik zgrade već se uspoređuje cijena našeg spremnika i cijene distributera i na temelju toga se odlučuje o kupovini ili prodaji energiju ovisno o tome što je isplativije za zgradu.

3. Determinističko modelsko prediktivno upravljanje

Nakon što su zapisane sve jednadžbe potrebne za rješavanje zadanog problema, slijedi njihov raspis u nekoliko koraka kako bi se vidjela slijednost, te sastavljanje matrica potrebnih za korištenje funkcije Matlab-a *mpt_solveLP* kojom se zapravo rješava problem optimizacije.

Za funkciju *mpt_solveLP* potrebno je izračunati matrice A,K,f.

Matrica A i matrica K se izračunaju pomoću svih prethodno navedenih nejednadžbi stavljajući ih pravilno u sljedeći izraz:

$$A \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix} \leq b + B * S_{1,0} \quad (3.1)$$

gdje je $u_k = \begin{bmatrix} S_{1u,k} \\ S_{n \rightarrow 1,k} \end{bmatrix}$ (3.2)

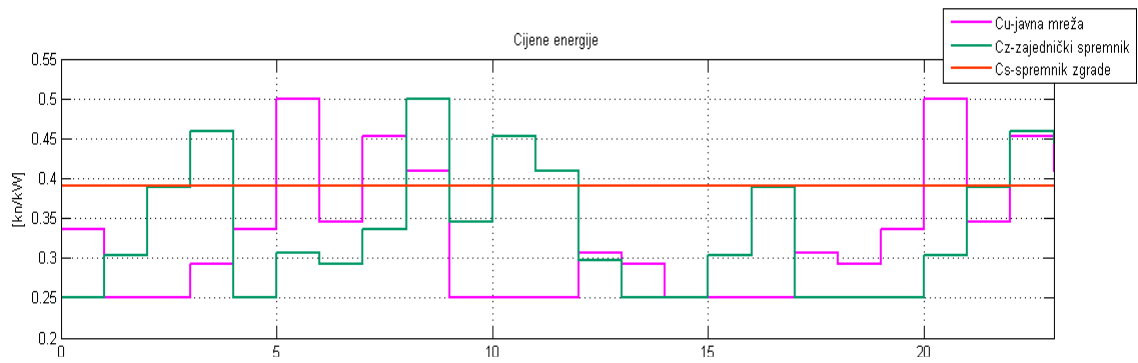
i $K = b + B * S_{1,0}$. (3.3)

Da bi se izračunala matrica f koriste se samo kriterij odnosno izraz (2.6) i sljedeći izraz:

$$\min[f_0 \quad f_1 \quad \dots \quad f_{N-1}] \begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_{N-1} \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

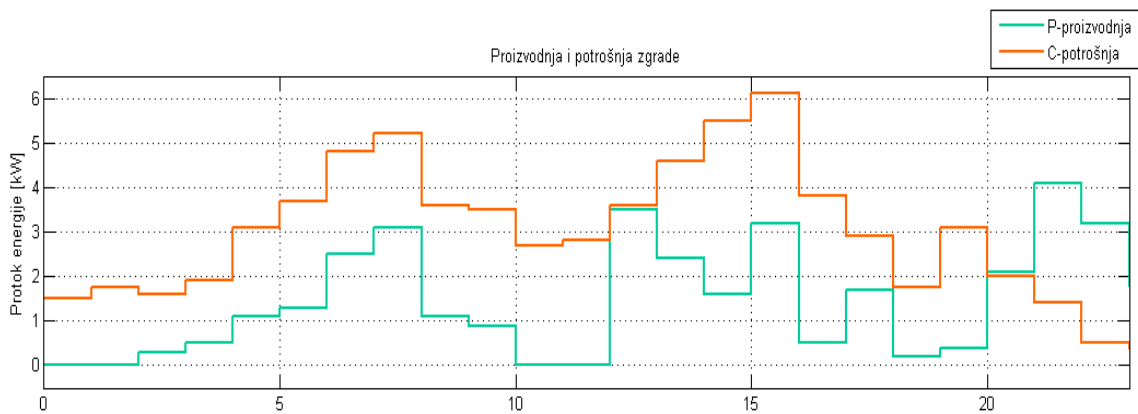
U funkciju *mpt_solveLP* uvrste se zadane matrice i time se dobiju optimizacije energetskih tokova tj. u konačnici vrijednosti S_{1uopt} , koja predstavlja promjenu količine energije u jednom koraku, odnosno razliku i zbroj svih doprinosa energija zgradi, i S_{1nopt} koja predstavlja koliko se energije kupuje ili prodaje zajedničkom spremniku u pojedinom koraku (satu).

Duljina horizonta na kojem se promatra optimizacija je 24 sata.



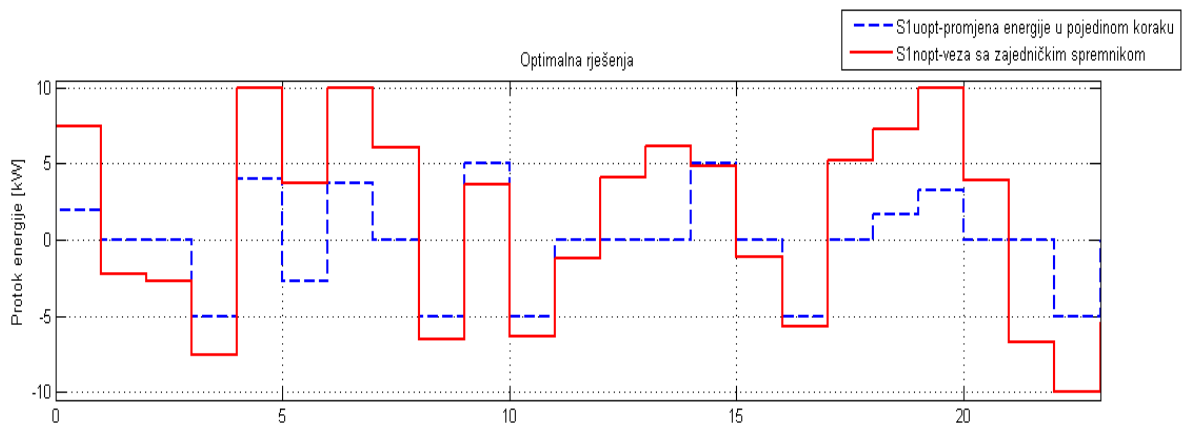
Slika 2. Zadani profili cijena

Slika 2. prikazuje proizvoljno zadane profile cijena javne mreže, zajedničkog spremnika i spremnika zgrade unutar 24 sata.



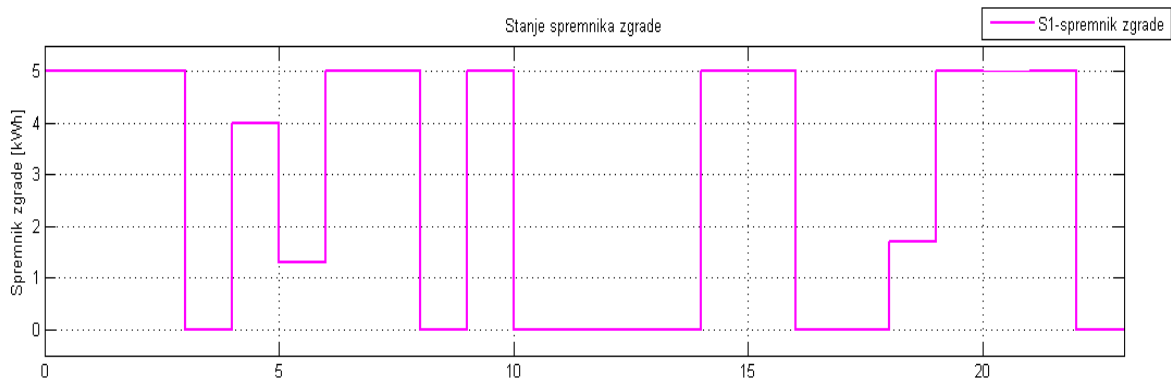
Slika 3. Profili proizvodnje i potrošnje energije zgrade

Na slici 3. imamo proizvoljno zadane profile potrošnje i proizvodnje energije unutar zgrade tokom 24 sata.



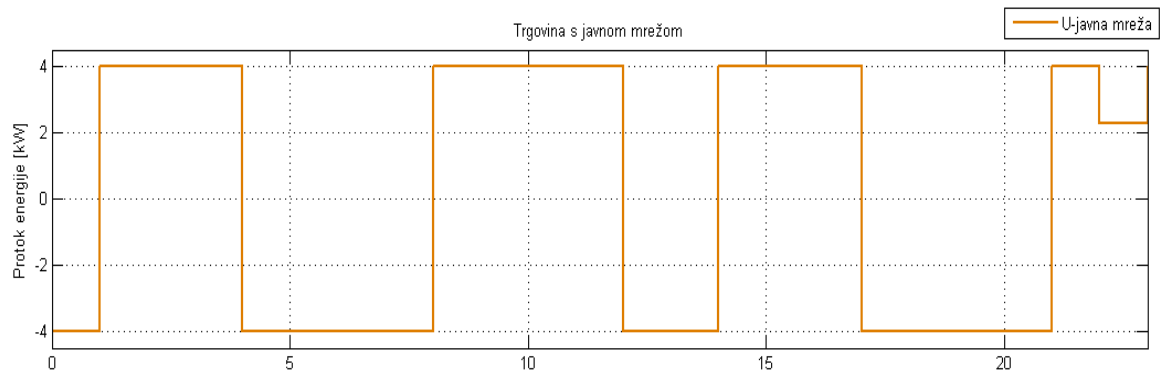
Slika 4. Optimalna rješenja

Na slici 4. koja prikazuje profile optimalnih rješenja crvena linija je trgovina odnosno kupnja (pozitivni iznosi) i prodaja (negativni iznosi) energije zajedničkom spremniku, dok iscrtkana plava linija predstavlja ukupnu promjenu energije u pojedinom koraku (2.2).



Slika 5. Stanje spremnika zgrade u pojedinom koraku

Slika 5. prikazuje stanje spremnika zgrade u svakom koraku.



Slika 6. Trgovina energije s javnom mrežom

Slika 6. prikazuje koliko se energije kupuje (pozitivni iznosi) i prodaje (negativni iznosi) javnoj mreži, a ona služi da bi lakše odredili da li optimizacijski algoritam radi ispravno.

Prolazeći kroz nekoliko koraka i prateći grafove vidi se zašto algoritam dobro radi.

Prvo promotrimo sliku 2. u prvom koraku. Cijena energije spremnika zgrade veća je od cijena javne mreže i zajedničkog spremnika. Iz tog razloga će se u ovom koraku kupovati i prodavati energija distributerima, pritom pazeći da se nadoknadi razlika potrošnje i proizvodnje zgrade te napuni spremnik kupnjom iz zajedničkog spremnika, jer je to isplativo zbog niske cijene. Ako pogledamo sliku 4. vidi se kako zbog niske cijene

kupujemo puno energije iz zajedničkog spremnika, dok na slici 6. vidimo da manji dio energije prodajemo javnoj mreži.

U drugom koraku na slici 2. vidimo da je u ovom slučaju cijena spremnika zgrade veća od ostalih cijena pa ćemo u ovom koraku jednako kao i u prethodnom trgovati sa ostalim distributerima. Cijena javne mreže je manja pa ćemo od njih kupovati veći dio energije (slika 6.), dok ćemo manji dio energije prodati zajedničkom spremniku. U ovom koraku smo također spremnik ostavili pun (slika 5.), jer nam je bilo isplativije trgovati sa ostalim distributerima zbog manjih cijena.

Treći korak je približno jednak prethodnom, pa prelazimo na četvrti.

U četvrtom koraku na slici 2. vidimo da je cijena zajedničkog spremnika veća od cijene spremnika zgrade, dok je cijena javne mreže manja. To znači da ćemo u ovom koraku kupovati energiju od javne mreže (slika 6.), a zbog visoke cijene prodavati što više energije zajedničkom spremniku i prazniti spremnik zgrade pošto je trenutna cijena skladištene energije manja od cijene prodaje zajedničkom spremniku. Na slici 5. vidljivo je da se u ovom koraku skladištena energija zgrade smanjila zbog prodaje energije.

Daljnjom analizom možemo vidjeti da će se već u slijedećem koraku spremnik puniti (slika 5. korak 5) jer su cijene javne mreže i zajedničkog spremnika manje od spremnika zgrade. Kao i u prethodnim koracima promatranjem grafova možemo uočiti pravilno ponašanje protoka energije i zaključiti da optimizacijski algoritam radi pravilno.

4. Stohastičko modelsko prediktivno upravljanje

4.1. Opis postupka optimizacije

Nakon analize strategije determinističkog modelskog prediktivnog upravljanja prelazi se na analizu strategije stohastičkog modelskog prediktivnog upravljanja. Ova metoda je puno bolja jer nikada se sa sigurnošću ne mogu odrediti vanjski uvjeti koji utječu na ponašanje određenih veličina. Tako i u ovom slučaju unaprijed zadane vrijednosti proizvodnje i potrošnje uzimaju se sa određenom granicom nesigurnosti tj. stohastički se uzima u obzir nesigurnost poremećaja koji djeluju na sustav. Uvode se slučajne poremećajne varijable s Gaussovom funkcijom gustoće razdiobe, te iz tog razloga ograničenja mogu biti ispunjena samo s određenom vjerojatnošću.

U ovom primjeru koristi se nesigurnost varijabli od 5% posebno za svaku veličinu.

Model sustava opisan je jednadžbom stanja sustava koja glasi:

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + Dd_k \quad (4.1)$$

gdje je matrica:

$$x_k = S_k \quad (4.2)$$

stanje sustava u pojedinom koraku,

$$u_k = \begin{bmatrix} S n_k \\ U_k \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

upravljačke veličine koje optimiramo,

$$d_k = \begin{bmatrix} P_k \\ C_k \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

poremećajne veličine odnosno proizvodnja i potrošnja zgrade.

Matrice A, B i D iznose:

$$A = [1] \quad B = [1 \quad 1] \quad D = [1 \quad -1] \quad (45)$$

Stanja X i optimalini ulazi U definirani su na predikcijskom horizontu kao:

$$X = (x_{t+1|t}^T, x_{t+2|t}^T, \dots, x_{t+N|t}^T)^T \quad (4.6)$$

$$U = (u_{t|t}^T, u_{t+1|t}^T, \dots, u_{t+N-1|t}^T)^T \quad (4.7)$$

gdje $x_{t+k|t}^T$ označava predviđeno stanje spremnika u trenutku $t+k$, a N je duljina predikcijskog horizonta.

Diskretna stanja sustava sadržana u vektoru X ovise o početnim uvjetima, ograničenjima, ulazima i smetnjama duž predikcijskog horizonta, te o matricama modela A, B i D .

Kod daljnjeg rješavanja optimizacijskog problema i proširenja matrica s obzirom na horizont dobije se sustav opisan kao:

$$X = \alpha x_{t|t} + \beta U + \gamma D, \quad (4.8)$$

gdje su matrice α, β, γ :

$$\alpha = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ A^N \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & 0 \\ AB & B & \dots & 0 \\ A^2B & AB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N-1}B & \dots & AB & B \end{bmatrix} \quad \gamma = \begin{bmatrix} D & 0 & \dots & 0 \\ AD & D & \dots & 0 \\ A^2D & AD & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N-1}D & \dots & AD & D \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

odnosno ako se uzme u obzir vrijednost matrice A iz izraza (15) dobije se:

$$\alpha = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & 0 \\ B & B & \dots & 0 \\ B & B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B & \dots & B & B \end{bmatrix} \quad \gamma = \begin{bmatrix} D & 0 & \dots & 0 \\ D & D & \dots & 0 \\ D & D & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ D & \dots & D & D \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Ponašanje poremećaja opisano je kao:

$$d_k = \bar{d}_k + \omega_k \quad (4.11)$$

gdje je \bar{d}_k predikcija proizvodnje i potrošnje, ω_k stohastička pogreška prognoze u koraku k , a d_k iznos ukupnog poremećaja koji djeluje na sustav u trenutku k .

Kako je već prije i spomenuto slučajne poremećajne varijable imaju Gaussovu razdiobu:

$$\omega_k \sim \mathcal{N}(\bar{\omega}_k, \delta^2). \quad (4.12)$$

Varijancu δ korisnik odabire sam, a slučajna varijabla ω_k (4.12) sa 99,73% poprima vrijednost iz intervala $(\bar{\omega}_k - 3\delta, \bar{\omega}_k + 3\delta)$. Slijedno tome ukoliko je $\bar{\omega}_k = 0$ tada će ω_k poprimiti vrijednost iz intervala $(-3\delta, +3\delta)$.

U ovom programskom rješenju korištena je vrijednost varijance $\delta = 0.1$.

Koristeći stohastički pristup optimizaciji pojavljuje se i nova varijabla, smetnja:

$$W = (\omega_{t|t}^T, \omega_{t+1|t}^T, \dots, \omega_{t+N-1|t}^T)^T \quad (4.13)$$

Sustav u koji je uvedena i nesigurnost ima novu jednadžbu:

$$X = \alpha x_{t|t} + \beta U + \gamma W \quad (4.14)$$

Daljnji je zadatak, nakon što smo u sustav uveli nesigurnost procjene ponašanja poremećajnih veličina, optimirati ulaze U . Prvo uvodimo afino povratno djelovanje koje u matricnoj formi ima oblik:

$$U = MW + H \quad (4.15)$$

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ M_{1,0} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N-1,0} & \dots & M_{N-1,N-2} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$H = (h_{t|t}^T, h_{t+1|t}^T, \dots, h_{t+N-1|t}^T)^T. \quad (4.17)$$

Izrazom (4.15) se ulazi definiraju kao afine funkcije normalno distribuiranih slučajnih varijabli koje imaju neograničeno područje vrijednosti. Ulazna ograničenja (2.3,2.4) ne mogu biti zajamčena za sve moguće ishode poremećaja, što čini optimizaciju problema neisplativom, osim kada je $M = 0$. Mogući je pristup da ta ograničenja gledamo sa određenom vjerojatnošću $(1 - \alpha_k)$, pa je to definirano na sljedeći način:

$$P[S_j U \leq s_j] \geq (1 - \alpha_k) \quad \forall j = 1, \dots, q \quad (4.18)$$

gdje je q broj postavljenih ograničenja nad ulazima. Izrazom (4.18) definirano je da će se svaki redak ograničenja ispuniti sa zasebnom vjerojatnošću $(1 - \alpha_k)$.

Slijedno tome uvodimo ograničenja i na iznose stanja kao i kod determinističkog postupka (2.5) gdje r u ovom slučaju predstavlja broj graničenja nad stanjima.

$$P[G_i X \leq g_i] \geq (1 - \alpha_k) \quad \forall i = 1, \dots, r. \quad (4.19)$$

Ako se X zamjeni prema (4.14, 4.15) dobije se:

$$\begin{aligned} P[G_i(\alpha x_{t|t} + \beta MW + \beta H + \gamma W \leq g_i)] &\geq (1 - \alpha_k) \\ P[G_i(\alpha x_{t|t} + (\beta M + \gamma)W + \beta H \leq g_i)] &\geq (1 - \alpha_k). \end{aligned} \quad (4.20)$$

Varijabla ω se ravna po normalnoj razdiobi, pa kako je poznato da zbroj dviju varijabli koje se ravnaju po normalnoj razdiobi ponovo daje varijablu koja se također ravna po normalnoj razdiobi, i uzimajući u obzir da sve smetnje imaju istu varijancu δ slijedi:

$$\delta \Phi^{-1}(1 - \alpha_k) \|G_i(\beta M + \gamma)\|_2 \leq g_i - G_i(\alpha x_{t|t} + \beta H) \quad (4.21)$$

Ograničenja nad ulazima tada postaju:

$$\begin{aligned} P[S_j(MW + H) \leq s_j] &\geq (1 - \alpha_k) \\ \delta \Phi^{-1}(1 - \alpha_k) \|S_j M\|_2 &\leq s_j - S_j H \end{aligned} \quad (4.22)$$

Optimizacijom pronalazimo vektor U prema:

$$\min c^T (M\bar{\omega} + H) \quad (4.23)$$

odnosno pošto uzimamo $\bar{\omega} = 0$ imamo:

$$\min c^T H. \quad (4.24)$$

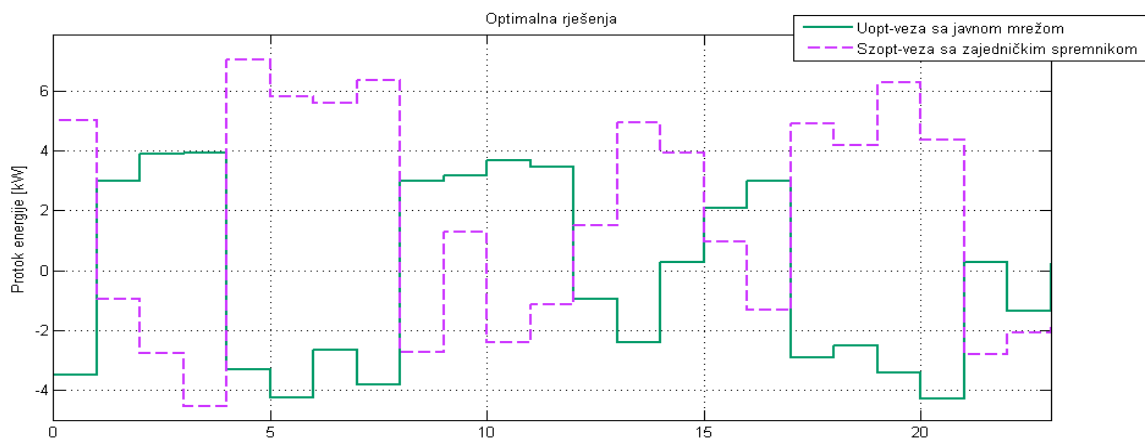
Za rješavanje problema optimizacije korišten je SeDuMi solver.

4.2 Rezultati

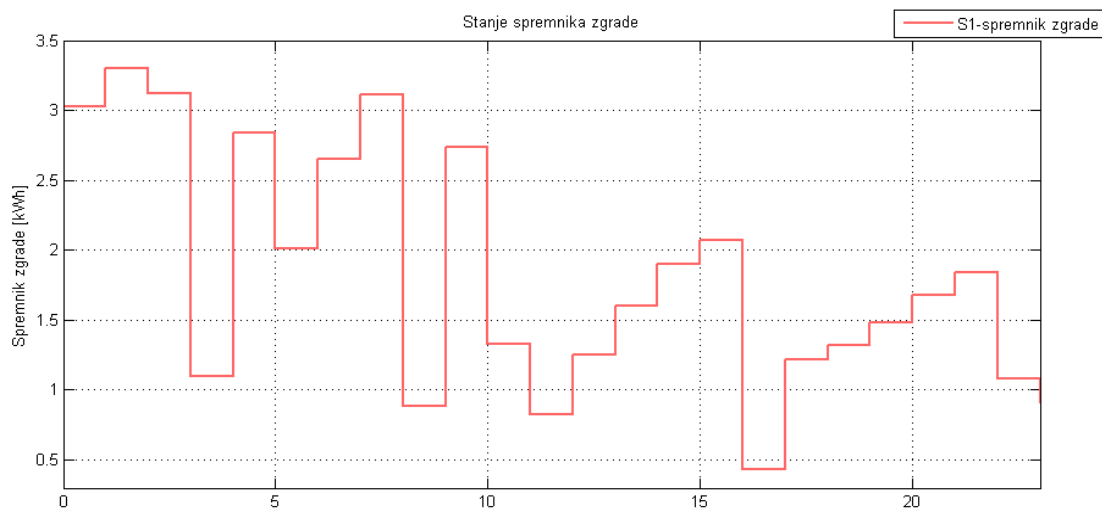
Rješavanjem optimizacijskog problema pomoću SeDuMi slovera dobiveni su unaprijed predviđeni rezultati. Uvođenjem nesigurnosti poremećaja sustav se ponaša znatno bliže realnom sustavu.

Profili cijena te proizvodnje i potrošnje zgrade koji se koriste jednaki su profilima koji se koriste i u determinističkom pristupu rješavanja problema (slika 2., slika 3.). Uzimaju se jednaki profili kako bi kasnije mogli lakše usporediti prednosti ili nedostatke stohastičkog modelskog prediktivnog upravljanja.

Na slici 7. prikazan je krajnji rezultat optimizacije koju smo proveli. Kroz horizon od 24 sata i razne varijante događaja imamo optimalna rješenja koja prikazuju koliko se energije kupuje ili prodaje u određenom satu zajedničkom spremniku i javnoj mreži.



Slika 7. Optimalna rješenja



Slika 8. Stanje spremnika zgrade u pojedinom koraku

Slika 8. prikazuje kako se uz sve unaprijed definirane uvjete i profile ponaša stanje spremnika zgrade u pojedinom koraku.

Kroz kratku analizu rezultata te promatranje ponašanja sustava u određenim ključnim trenucima vidi se da je ponašanje sustava pravilno i bliže realnom.

Promotrimo sliku 2. u prvom koraku. Cijena energije spremnika zgrade veća je od cijena javne mreže i zajedničkog spremnika. No, vidi se i da je cijena zajedničkog spremnika manja od cijene javne mreže. Zbog visoke cijene spremnika, a niskih cijena distributera u ovom ćemo koraku energiju prodavati i kupovati s namjerom da nadoknadimo razliku potrošnje i proizvodnje. Na slici 7. vidimo kako u prvom koraku kupujemo znatnu količinu energije od zajedničkog spremnika, dok manji dio prodajemo javnoj mreži. Pošto je početno stanje spremnika 3kWh, vidimo da je stanje spremnika ostalo gotovo jednako, te da smo u ovom koraku „preprodali“ energiju od jednog distributera drugom i na taj način zarađivali što se trenutnim algoritmom ne može spriječiti.

U sljedećem koraku je situacija gotovo jednaka, samo što je zamjenjena uloga cijena distributera pa će se sustav ponašati jednako, ali će umijesti kupnje sada prodavati energiju zajedničkom spremniku. U ovom smo koraku također, kao što je i vidljivo sa slike 8., spremnik ostavili gotovo pun jer nam je isplativije trgovati sa ostalim distributerima.

Ako promotrimo četvrti korak vidimo da je u ovom koraku cijena zajedničkog spremnika veća od cijene spremnika zgrade, pa iz toga proizlazi da ćemo u ovom koraku zbog niske cijene kupovati energiju od javne mreže (slika 7.), ali i prodavati što više energije zajedničkom spremniku s namjerom pražnjenja spremnika (slika 8.) pošto je cijena skladištene energije manja.

Sličnom analizom na temelju dva opisana koraka vidimo da sustav radi pravilno te da je optimizacija uspješno provedena.

5. Usporedba stohastičkog i determinističkog modelskog prediktivnog upravljanja

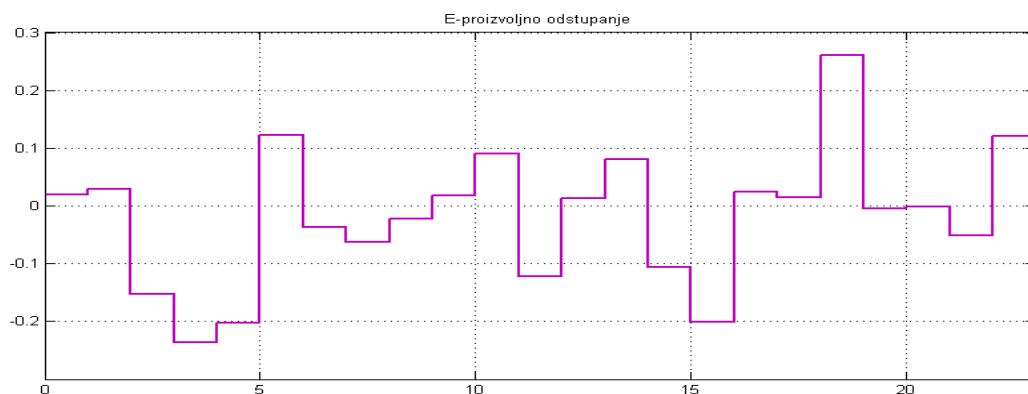
Na kraju kao najbitniji dio slijedi usporedba koja od ovih analiza na bolji i realniji način upravlja sustavom koji bi mogli upotrijebiti i u stvarnome životu.

Prije svega da bi usporedba bila što realnija i bolja uvodimo proizvoljno odstupanje ε kojim želimo simulirati da se poremećajne veličine stvarno mijenjaju po unaprijed nepoznatom slijedu. Samo odstupanje smo ostvarili preko *randn* funkcije u Matlabu. Uvođenjem odstupanja ε iznosi proizvodnje i potrošnje u pojedinom koraku će biti:

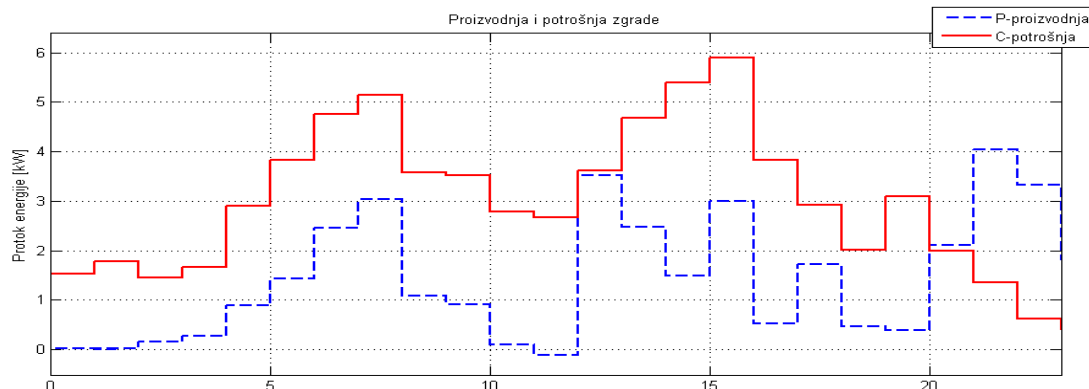
$$P_k = P_k + \varepsilon_k \quad (5.1)$$

$$C_k = C_k + \varepsilon_k \quad (5.2)$$

Na slici 9. prikazano je koliko iznosi to odstupanje u pojedinom koraku, a na slici 10. kako izgledaju novi profili proizvodnje i potrošnje.

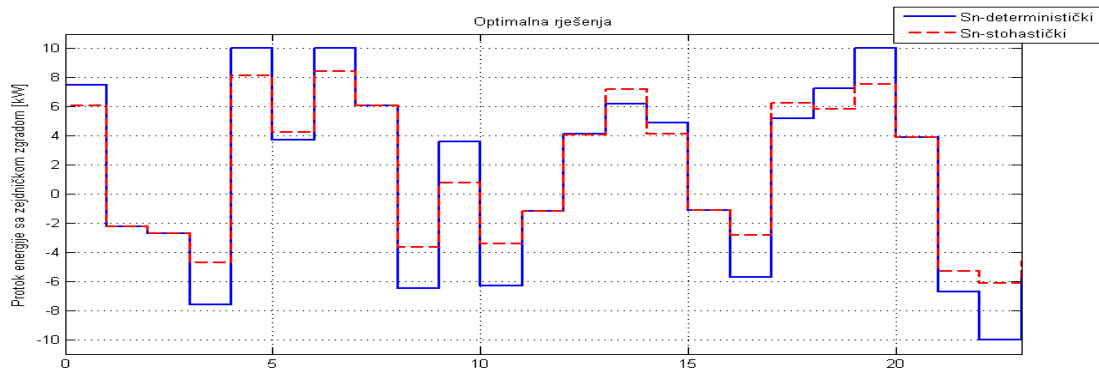


Slika 9. Proizvoljno odstupanje ε [kWh]

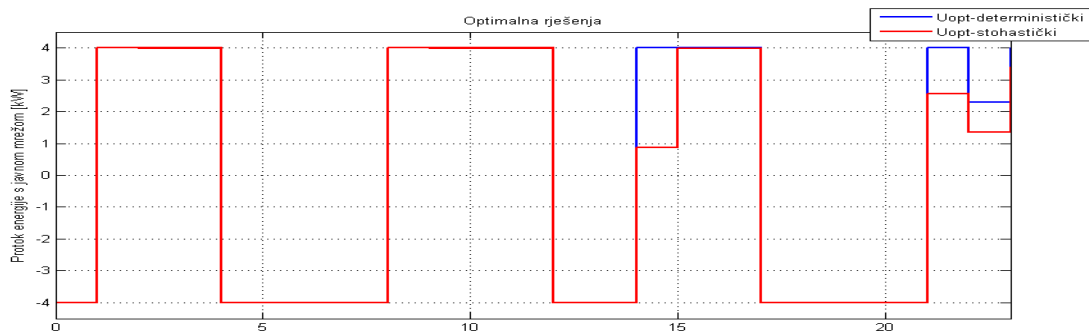


Slika 10. Profili proizvodnje i potrošnje energije zgrade

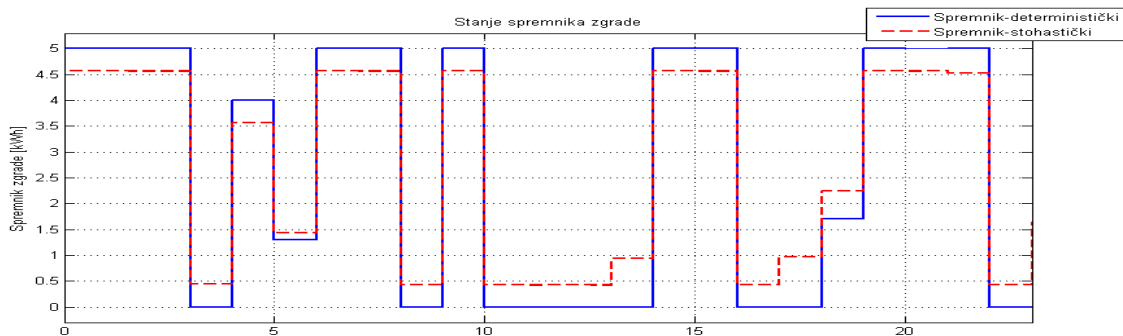
Sljedeće tri slike prikazuju na istom grafu krivulje ponašanja optimiranih veličina i stanja spremnika u pojedinom koraku nakon provedbe optimizacije deterministički i stohastički.



Slika 11. Usporedba optimalnih rješenja za razmjenu energije sa zajedničkim spremnikom



Slika 12. Usporedba optimalnih rješenja za razmjenu energije sa javnom mrežom



Slika 13. Usporedba stanja spremnika zgrade u pojedinom koraku

Prvo što je bitno napomenuti kod usporedbe je da stohastički pristup ne poštuje u potpunosti ograničenja zbog postojanja nesigurnosti djelovanja poremećaja. U optimizaciji je korišteno da su predviđeni profili proizvodnje i potrošnje kod stohastičkog pristupa točni sa vjerojatnošću od 95%. Usporedbom rezultata optimizacije ova dva postupka mogu se uočiti neke prednosti stohastičkog pristupa. Prije svega najveća je prednost što uvodimo nesigurnost predviđenih profila jer nikada sa sigurnošću ne možemo znati kako će se ponašati određeni vanjski parametri i na koji će način oni utjecati na naš zadani profil.

Sa slike 12. možemo jasno vidjeti kako deterministički pristup zadovoljava ograničenja sa 100% vjerojatnosti i bez obzira na sve kupuje i prodaje javnoj mreži maksimalno koliko može. Dok se već na toj slici vidi da je u nekoliko koraka stohastički pristup puno pažljiviji u donošenju ti odluka. To se najjasnije vidi na slikama 11. i 13.. Kod usporedbe stanja spremnika i razmjene energije sa zajedničkim spremnikom vidimo kako je stohastički pristup kod optimizacije puno bolji jer nikada ne uzima iz spremnika maksimalno moguće niti nikada ne kupuje ili prodaje zajedničkom spremniku maksimalno do zadanih ograničenja. To je veoma bitno jer je najbliže realnom sustavu odnosno ponašanju kakvo bismo htjeli. Pošto nikada sa sigurnošću ne možemo znati kakvi će biti svi parametri u sljedećem koraku dobro je što se spremnik ne prazni u pojedinim koracima potpuno do kraja.

6. Zaključak

U budućnosti će potreba za ovakvim programskim rješenjima biti sve veća, jer će zgrade i kućanstva na taj način štedjeti. Naravno, to zahtjeva određenu infrastrukturu kod same gradnje i o tome je potrebno razmišljati od samih početaka, kao i o načinu na koji će zgrada ili okrug stvarati svoju energiju.

Mi smo implementacijom u Matlab-u dobili konačan i očekivani rezultat - program koji pravilno odabire postupke i daje nam optimalne protoke energije. Točnost optimizacijskog algoritma provjerili smo uz pomoć grafova koji se dobiju kao rezultat pokretanja traženog algoritma i služe kao dokaz o ispravnosti izračuna.

Također, uvođenjem stohastičkog pristupa uveli smo i nesigurnost ponašanja varijabli, što je poboljšanje determinističkog. Velika prednost je u tome što smo time obuhvatili i sve vanjske uvjete poput vremenske prognoze koji direktno utječu na unaprijed zadane profile.

7. Literatura:

- Baotić M., Perić N., Vašak M., *Deterministic power flow optimization in an experimental microgrid*, University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing, 2011.
- Baotić M., *Optimal Control of Piecewise Affine Systems - a Multi-parametric Approach*, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2005.
- Martinčević A., *Modelsko prediktivno upravljanje toplinskim procesom u zgradi uz uzimanje u obzir nesigurnosti podataka iz vremenske prognoze*, Završni rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2011.
- Oldewurtel F., Parisio A., Jones C.N., Morari M., Gyalistras D., Gwerder M., Stauch V., Lehman B., Wirth K., *Energy Efficient Building Climate Control using Stochastic Model Predictive Control and Weather Predictions* Proceedings of American Control Conference 2010, Baltimore, SAD, pp. 5100-5105.
- SeDuMi-Matlab toolbox for optimization over symmetric cones. *User Manual* <http://sedumi.ie.lehigh.edu/>

Optimiranje ulazno-izlaznih energetske tokova zgrade i susjedstva u stohastičkom okruženju

Sažetak

U ovom radu riješen je problem optimizacije modela zgrade sa dva pristupa modelskom prediktivnom upravljanju, stohastički i deterministički. Razvijen je algoritam proračuna profila energetskih tokova zgrade, a profil buduće proizvodnje i lokalnih potreba za energijom znana je samo s konačnom dozom sigurnosti, pa u ovome radu za te svrhe koristimo stohastičko modelsko prediktivno upravljanje.

Ključne riječi: BEM, determinističko modelsko prediktivno upravljanje, MPC, stohastičko modelsko prediktivno upravljanje, SMPC

Optimization of Building and Neighbourhood Input-output Energy Flows in a Stochastic Framework

Abstract

In this thesis the optimization problem of the building model, with two approaches of model predictive control, deterministic and stochastic, has been solved. The estimation algorithm for building energy flow profiles has been developed, while future production profile and local energy needs are known with just specific dose of certainty. This is the reason why the stochastic model predictive control is used.

Keywords: Building Energy Management (BEM), Deterministic Model Predictive Control, MPC, Stochastic Model Predictive Control, SMPC

Životopis

Rođena sam 28. srpnja 1990. godine u Koprivnici. Nakon završene osnovne škole Braće Radić u Koprivnici upisala sam prirodoslovno-matematičku gimnaziju Fran Galović, koju sam završila 2009. godine. Te iste godine upisala sam Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu. Na drugoj godini studija odlučila sam se za smjer Elektrotehnika i informacijska tehnologija dok sam na trećoj godini studija odabrala modul Automatika. Aktivna sam članica studentske udruge EESTEC (engl. Electrical Engineering Students' European assoCiation) te 2012. godine postajem članom udruge „Hrvatska Mensa“.