

# Večagentni model za agente odjemalce in agente proizvajalce na trgu električne energije, 2. del – testni primer

Blaž Kladnik<sup>1</sup>, Gašper Artač<sup>2</sup>, Melita Hajdinjak<sup>3</sup>, Andrej Gubina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>HSE, d.o.o., Koprška ulica 92, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup>GEN-I, d.o.o., Vrblina 17, 8270 Krško, Slovenija

<sup>3</sup>Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: [blaz.kladnik@fe.uni-lj.si](mailto:blaz.kladnik@fe.uni-lj.si)

**Povzetek.** V drugem delu članka predstavljamo testni sistem in rezultate delovanja adaptivnega agentnega sistema, ki kažejo na to, da posameznemu agentu odjemalcu uspe stroške za nakup električne energije na urnem trgu prilagoditi stroškom iz pogodbe med odjemalcem in dobaviteljem, ki jih definirajo napovedane količine odjema in referenčna cena. Odvisno od strategije odjema in s tem potrebne količine energije na trgu na debelo lahko odjem povečajo ali zmanjšajo. Če agent svoj odjem za določen odstotek zmanjša, je njegovo zmanjšanje stroškov v odstotkih od odstotkovnega zmanjšanja odjema večje. Če agent svoj odjem glede na napovedanega za določen odstotek poveča, je v odstotkih povečanje stroškov od odstotkovnega povečanja odjema manjše ali pa agent celo doseže zmanjšanje stroškov. Ko agentom odjemalcem na trgu dodamo agente proizvajalce, agenti odjemalci svoj specifični strošek za nakup energije nekoliko povečajo, vendar pa se na drugi strani znižajo cene električne energije. Aktivni agenti odjemalci namreč iz obratovanja izločijo proizvodne enote, ki so prej določale tržne cene, zato se te ustrezno znižajo. Iz obrazložitve sledi, da so odzivni odjemalci ustrezna protiutež strateškemu povečevanju ponudb odjemalcev na trgu, kar proizvajalcem ne povzroča izgube, pomeni pa zmanjšanje dobička.

**Ključne besede:** agentno modeliranje, Q-učenje, agentno modeliranje, modeliranje odjemalcev, integracija aktivnega odjema

## A Multi-agent electricity market model for the demand-side and producers agents – Part 2

The test results of using the adaptive multi-agent system show an improved cost-effective performance of the multiple demand-side agents. Depending on their strategy, they can either increase or decrease their consumption. By decreasing it for a certain percentage, the relative reduction of their costs (on the wholesale market) is higher than their consumption reduction. By increasing it, their relative cost increase is either lower than their consumption increase, or the costs can even decrease. This is true for any demand-side agent at any time and in any scenario, meaning that the agents are able to reduce their electricity buying costs on the day-ahead market. They can also adjust their costs to the contracted customers-supplier costs, defined by the forecasted quantities and the reference (contract) price, and can decrease the specific costs of the purchased electricity. With the producer agents added to the demand-side agents, the specific costs of the latter increase, but on the other hand the electricity prices decrease slightly.

## 1 UVOD

V drugem delu članka predstavljamo testni sistem, s katerim smo preverili delovanje večagentnega sistema za agente odjemalce, ki smo jim v nadaljevanju dodali

tudi aktivne agente proizvajalce. V prvem delu tega članka smo podrobno predstavili model [1]. V nadaljevanju podajamo najprej definicijo testnega sistema, nato pa prikazujemo rezultate delovanja agentov.

## 2 TESTNI SISTEM

### 2.1 Definicija sistema

Za prikaz delovanja modela zagotavljanja rezerv pri odjemalcih električne energije za dan vnaprej smo za testni sistem uporabili *IEEE Reliability Test System* [2], [3]. Izbrani testni sistem ima 32 proizvodnih enot različnih tehnologij. Te so združene v devet različnih proizvodnih podjetij ali proizvajalcev. Stroškovne krivulje, ki jih potrebujemo za oblikovanje ponudb proizvajalcev, imajo obliko kvadratne funkcije [4]. Ker je stroškovna krivulja posamezne proizvodne enote kvadratna funkcija stroškov in moči, ne izpolnjuje zahtev linearnega programiranja. Zato moramo namesto kvadratne stroškovne krivulje uporabiti linearni približek le-te. Kvadratno stroškovno krivuljo lineariziramo z odsekoma zveznimi linearnimi

krivuljami, ki je sprejemljiv približek kvadratne stroškovne krivulje [5]. Z upoštevanjem koeficientov  $A$ ,  $B$  in  $C$  lahko za vsako od elektrarn konstruiramo svojo stroškovno krivuljo, tabela 2.

Tabela 1: Podatki proizvodnih enot

Št. pr.	Min. moč	Max. moč	$A$	$B$	$C$
(Št. en.)	[MW]	[MW]	[(€/MWh) <sup>2</sup> ]	[(€/MWh)]	[€]
1 (5)	2,4	12	0,328412	56,564	86,3852
2 (4)	16	20	0	130	400,6849
3 (6)	10	50	0	0,001	0,001
4 (4)	15,2	76	0,014142	16,0811	212,3076
5 (3)	25	100	0,052672	43,6615	781,521
6 (4)	54,3	155	0,008342	12,3883	382,2391
7 (3)	69	197	0,007170	48,5804	832,7575
8 (1)	140	350	0,004895	11,8495	665,1094
9 (2)	100	400	0,000213	4,4231	395,3749

Tabela 2: Definicija posameznih odjemnih skupin v odstotkih za delavnike (D) in vikende (V) glede na urne moči

[%]	Skup. 1 AOD 1		Skup. 2 AOD 2		Skup. 3 AOD 3		Skup. 4 AOD 4	
	D	V	D	V	D	V	D	V
1	30	34	11	11	55	51	4	4
2	30	34	10	11	56	51	4	4
3	30	35	11	11	55	50	4	4
4	31	35	11	11	54	50	4	4
5	31	34	11	11	54	51	4	4
6	32	35	18	12	47	49	3	4
7	32	39	26	13	39	44	3	4
8	33	40	29	13	36	43	3	4
9	31	39	29	14	38	43	3	4
10	32	39	30	14	36	43	3	4
11	32	40	30	14	35	42	3	4
12	32	40	30	14	34	42	4	4
13	34	40	31	14	31	42	5	4
14	35	40	31	13	30	42	5	5
15	35	40	30	12	29	43	6	5
16	37	41	29	12	29	42	5	5
17	37	41	28	12	29	42	6	5
18	39	40	27	11	30	44	5	5
19	40	41	24	10	32	44	4	5
20	40	44	18	9	38	44	4	3
21	39	44	13	9	44	44	4	4
22	36	42	12	9	47	46	6	3
23	34	38	12	9	49	49	6	4
24	32	35	11	10	51	51	6	4

Odjemna moč je definirana kot urna napoved odjema za vse leto, definirana je v odstotkih glede na konično moč sistema za posamezne tedne, dneve v tednu in po urah v dnevu. Za potrebe večagentnega modela za odjemalce moramo obstoječi diagram razdeliti na več različnih skupin odjema. Napoved podrobnega urnega profila za posamezne skupine je definirana v odstotkih, in sicer glede na urno moč. Da dobimo napoved odjemne moči za eno od odjemnih skupin, moramo pripadajočo urno moč  $P_h$  pomnožiti z ustreznim

odstotkom, da dobimo  $P_h^{(i)}$ . Ustrezne odstotke za posamezne skupine podaja tabela 2, vsi drugi potrebni parametri za izračun urnih moči pa so podani v [6].

## 2.2 Definicija variant in scenarijev

Ponazorili bomo delovanje večagentnega modela za agente odjemalce (brez agentov proizvajalcev) in delovanje večagentnega modela za agente odjemalce in agente proizvajalce.

Za ponazoritev delovanja večagentnega sistema za agente odjemalce smo uporabili vhodne parametre, tabeli 3 in 4. Različne variante smo poimenovali z imeni varianta 1 (V 1), varianta 2 (V 2) in varianta 3 (V 3). Oznaka AOD pomeni agent ODjemalec.

Večagentni sistem za odjemalce ima v našem primeru štiri agente odjemalce, kar pomeni štiri dobavitelje, ki imajo s svojimi odjemalci, ki jih združuje vsak od dobaviteljev, sklenjeno enoletno pogodbo o dobavi napovedanih količin ter različne enotne cene, ki jih imenujemo referenčne cene agentov  $\lambda_{ref}^{(i)}$  in ki so neodvisne od scenarijev. To pomeni, da ima vsak dobavitelj s svojimi odjemalci sklenjeno pogodbo o enotarifnem obračunu cene in prilagajanju količine odjema. Odjemalci dobaviteljem omogočajo stroškovno prilagajanje po pogodbah. Prilagajanje na sprotnem trgu izvajajo agenti odjemalci.

Predstavljeno stanje, v katerem ima vsak dobavitelj na voljo v določenih mejah prilagodljive odjemalce v taki meri, da lahko povratno vpliva na ceno na trgu, ni nujno odraz realnosti na vseh trgih. Zato imamo v naboru agentov odjemalcev tri velike agente, ki s svojimi količinami lahko vplivajo na določitev cene, in enega malega agenta AOD 4, ki s spremembo svojih količin na ceno na trgu tako rekoč ne more vplivati. S tem bi radi preverili, ali agent odjemalec deluje v obeh primerih, ko je s spremembo svojega povpraševanja zmožen vplivati na ceno in ko tega povratnega vpliva na ceno zaradi svoje majhnosti nima.

Definirani vhodni parametri so minimalne in maksimalne Q-vrednosti ( $Q_{min}^{(i)}$  in  $Q_{max}^{(i)}$ ) za vsakega od agentov odjemalcev, ki se razlikujejo glede na variante. Vhodni parametri, ki se s scenariji ne spreminjajo, so faktor  $u^{(i)}$ , število stanj za posameznega agenta  $m^{(i)}$  in faktor  $\phi^{(i)}$ . Če kateri od parametrov ni podan ( $Q_{min}^{(i)}$  in  $Q_{max}^{(i)}$ ), gre za izhodiščno varianto, pri kateri se učenje ne izvaja.

Za agente proizvajalce smo uporabili proizvajalce skupin 4, 5, 6 in 8 (tabela 2, siva barva). To so mejne enote, kar pomeni, da največkrat enote iz ene od teh skupin proizvajalcev določajo tržno ceno, v obratovanju pa v povprečju pomenijo približno dobro tretjino proizvedenih količin. Njihova ponudba na trgu je prilagodljiva in na koncu tudi sprejeta, kar pomeni, da s prilagajanjem strategije lahko povečajo svoj dobiček. Cenejše enote skupin 3 in 9 vseskozi obratujejo, dražje enote skupin 1, 2 in 7 pa obratujejo le nekaj ur na leto in bi morale svoje ponudbe zmanjševati pod sprejemljive meje, da bi lahko izpodrivale mejne enote, zato nobene od omenjenih enot ne bomo modelirali kot aktivno.

Poleg vhodnih parametrov za agente odjemalce smo definirali še vhodne parametre za agente proizvajalce (tabela 5). To so minimalne in maksimalne Q-vrednosti ( $Q_{\min}^{(j)}$  in  $Q_{\max}^{(j)}$ ) za vsakega od agentov proizvajalcev, ki se razlikujejo glede na scenarije. Vhodni parametri, ki se s scenariji ne spreminjajo, so faktor  $u^{(j)}$ , število stanj za posameznega agenta  $m^{(j)}$  in faktor  $\varphi^{(j)}$ . Učenje agentov proizvajalcev smo prikazali samo v varianti V 8, vendar smo učecim agentom proizvajalcem potem dodajali različne variante učenja agentov odjemalcev. Varianta V 7, v kateri eden od parametrov ni podan ( $Q_{\min}^{(j)}$  in  $Q_{\max}^{(j)}$ ), je izhodiščno varianto, pri kateri se učenje ne izvaja.

Tabela 3: Definicija vhodnih parametrov za večagentni sistem za agente odjemalce

Agent $i$	Varianta	$Q_{\min}^{(i)}$	$Q_{\max}^{(i)}$	$m^{(i)}$	$u^{(i)}$	$\varphi^{(i)}$
AOD 1	V 1	/	/	10	0,97	0,97
	V 2	0,85	1,15			
	V 3	0,70	1,30			
AOD 2	V 1	/	/	9	0,95	0,94
	V 2	0,95	1,05			
	V 3	0,90	1,10			
AOD 3	V 1	/	/	12	0,96	0,96
	V 2	0,90	1,10			
	V 3	0,80	1,20			
AOD 4	V 1	/	/	8	0,95	0,95
	V 2	0,95	1,05			
	V 3	0,85	1,15			

Tabela 4: Definicija referenčnih cen za večagentni sistem za agente odjemalce

[€/MWh]	Agent	AOD 1	AOD 2	AOD 3	AOD 4
$\lambda_{\text{ref}}^{(i)}$	AOD	18,0	21,0	15,0	25,0

Tabela 5: Definicija vhodnih parametrov za večagentni sistem za agente proizvajalce

Št. Pr.	Agent $j$	Var.	$Q_{\min}^{(j)}$	$Q_{\max}^{(j)}$	$n^{(j)}$	$u^{(j)}$	$\varphi^{(j)}$
4	APR 1	V 4	/	/	10	0,91	0,92
		V 5	0,80	1,50			
5	APR 2	V 4	/	/	10	0,91	0,92
		V 5	0,85	1,50			
6	APR 3	V 4	/	/	12	0,93	0,94
		V 5	0,80	1,40			
8	APR 4	V 4	/	/	10	0,89	0,90
		V 5	0,80	1,40			

Pregled scenarijev združuje različne variante učenja agentov odjemalcev in agentov proizvajalcev in ga prikazuje tabela 6.

Tabela 6: Pregled scenarijev

	Učenje odjemalcev	Učenje proizvajalcev	Oznaka scen.
Izhodiščni sc.	V 1	V 4	SC 1
Samo agenti odjemalci	V 2	V 4	SC 2
Agenti proizvajalci in odjemalci	V 3	V 4	SC 3
Agenti	V 1	V 5	SC 4
proizvajalci in odjemalci	V 2	V 5	SC 5
	V 3	V 5	SC 6

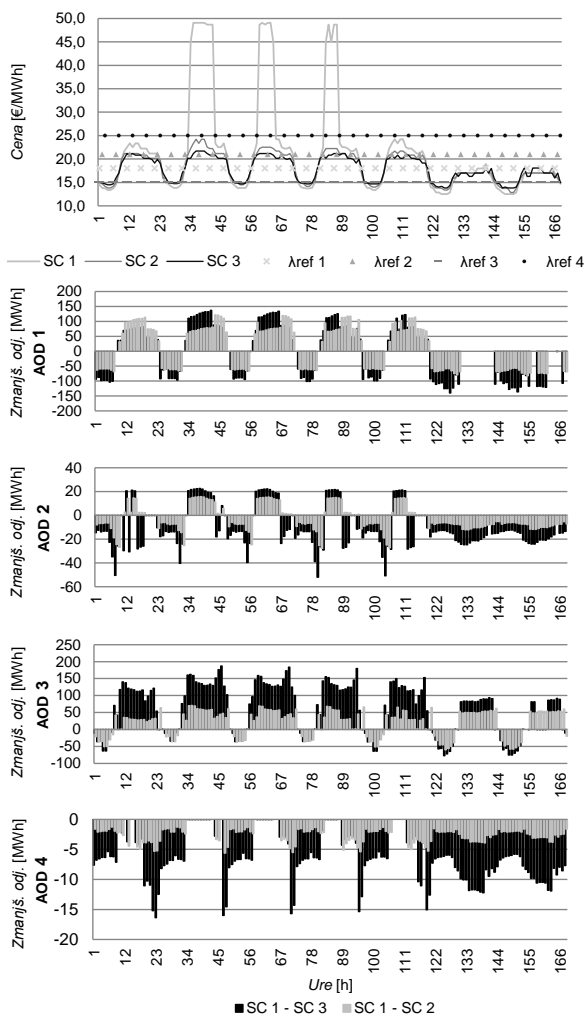
### 3 REZULTATI

#### 3.1 Večagentni sistem za agente odjemalce

Za večagentni sistem za agente odjemalce rezultate prikazuje tabela 7 ter sliki 1 in 2.

Tabela 7: Večagentni sistem za agente odjemalce – zmanjšanje odjema in stroškov v odstotkih (SC 1, SC 2, SC 3)

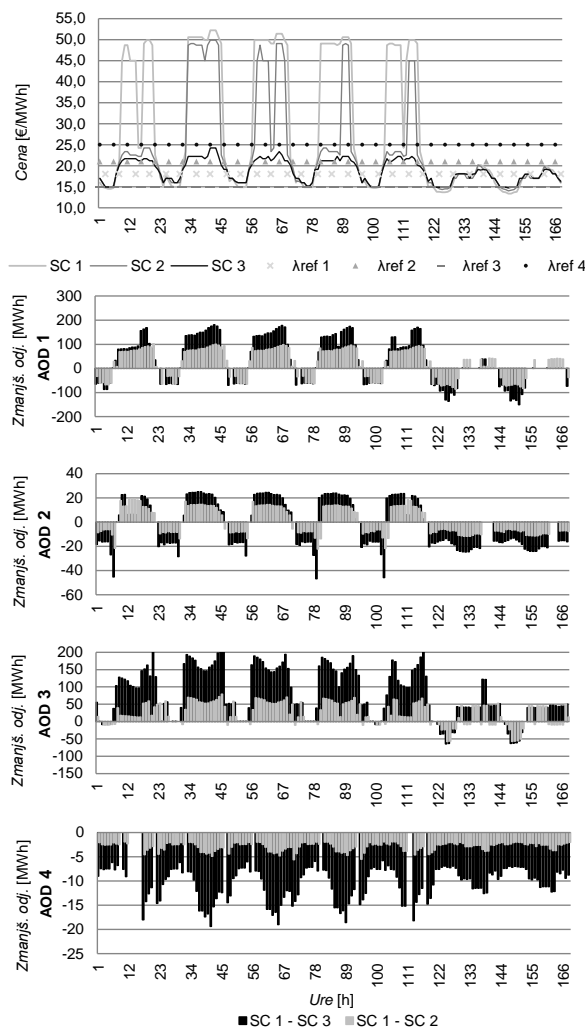
			[%]	Poletje	Zima	
AOD 1	SCI-SC2	Celotna sezona	Zman. odj.	-1,8	-0,2	
		Zadn. ted.	Zman. odj.	1,7	3,0	
		sez.	Zman. str.	20,9	24,3	
	SCI-SC3	Celotna sezona	Zman. odj.	-4,5	-1,3	
		Zadn. ted.	Zman. odj.	-0,2	4,3	
		sez.	Zman. str.	21,0	42,0	
	AOD 2	SCI-SC2	Celotna sezona	Zman. odj.	-1,5	-0,7
			Zadn. ted.	Zman. odj.	-0,8	0,1
			sez.	Zman. str.	24,4	24,5
SCI-SC3		Celotna sezona	Zman. odj.	-3,4	-1,5	
		Zadn. ted.	Zman. odj.	-2,7	-0,5	
		sez.	Zman. str.	25,3	45,1	
AOD 3	SCI-SC2	Celotna sezona	Zman. odj.	0,3	1,0	
		Zadn. ted.	Zman. odj.	2,4	2,8	
		sez.	Zman. str.	17,9	21,7	
	SCI-SC3	Celotna sezona	Zman. odj.	3,2	5,6	
		Zadn. ted.	Zman. odj.	7,7	9,6	
		sez.	Zman. str.	24,1	41,2	
AOD 4	SCI-SC2	Celotna sezona	Zman. odj.	-3,2	-2,9	
		Zadn. ted.	Zman. odj.	-2,8	-3,1	
		sez.	Zman. str.	17,5	17,3	
	SCI-SC3	Celotna sezona	Zman. odj.	-8,9	-9,9	
		Zadn. ted.	Zman. odj.	-7,6	-11,3	
		sez.	Zman. str.	15,9	31,3	



Slika 1: Večagentni sistem za agente odjemalce – cene, zmanjšanje odjema, zadnji teden, poletje (SC 1, SC 2, SC 3)

Opisane trditve veljajo za vse agente in vse letne čase. Agenti AOD 1, AOD 2 in AOD 3 so po odjemni moči tako veliki, da v odvisnosti od ure in dneva vsakokrat kateri od njih s svojo spremembo odjema lahko vpliva tudi na spremembo cene. Agent AOD 4 na spremembo cene zaradi svoje majhnosti ne vpliva. Meje agentov so bolj kot pri SC 3 odprte pri SC 2, zato imamo pri SC 3 po navadi tudi večje absolutne vrednosti zmanjšanja stroškov in odjema kot pri SC 2.

Če opazujemo nekatere rezultate, vidimo, da agenti največje zmanjšanje stroškov dosegajo prav v zadnjem tednu zimske sezone, ko so tudi napovedane cene na trgu najvišje. AOD 1 z zmanjšanjem odjema za 4,3 % doseže 42,0-odstotno zmanjšanje stroškov, AOD 2 kljub 0,5-odstotnemu povečanju odjema doseže 45,1-odstotno zmanjšanje stroškov, AOD 3 z 9,6-odstotnim zmanjšanjem odjema doseže 41,2-odstotno zmanjšanje stroškov, AOD 4 pa kljub 11,3-odstotnemu povečanju odjema doseže 31,1-odstotno zmanjšanje stroškov.



Slika 2: Večagentni sistem za agente odjemalce – cene, zmanjšanje odjema, zadnji teden, zima (SC 1, SC 2, SC 3)

Sliki 1 in 2 prikazujeta rezultate SC 1, 2 in 3 v zadnjih tednih in zime. Prvi graf na vsaki od slik predstavlja cene v vseh treh scenarijih in referenčne cene za vsakega od agentov. Preostali grafi na vsaki od slik so grafi zmanjšanja odjema v MW za vsakega od agentov, kjer med seboj primerjamo SC 1 in SC 2 (siva barva) ter SC 1 in SC 3 (črna barva).

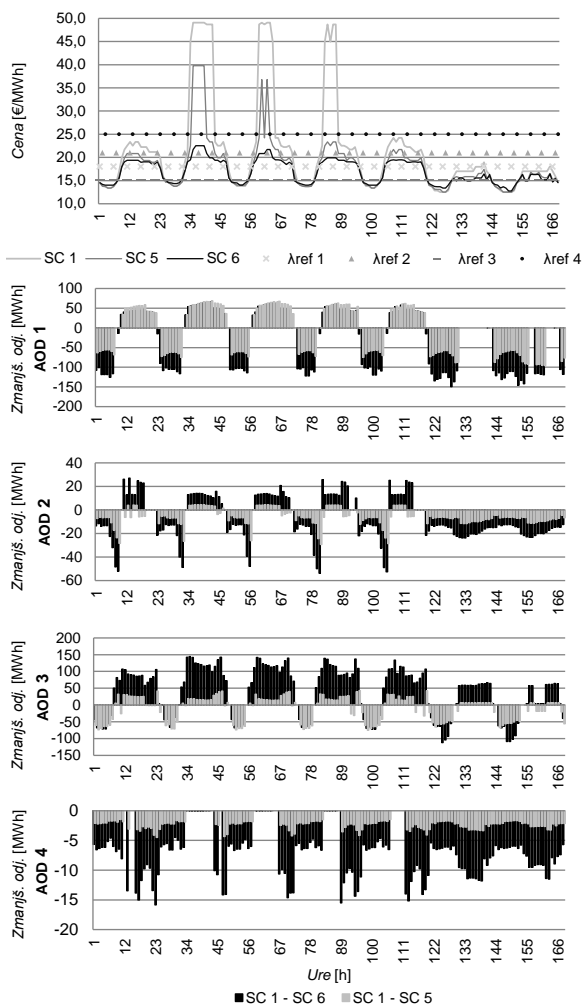
### 3.2 Večagentni sistem za agente odjemalce in agente proizvajalce

Za večagentni sistem za agente odjemalce in agente proizvajalce tabela 8 ter sliki 3 in 4 prikazuje rezultate za agente odjemalce, za proizvajalce pa rezultate prikazuje slika 5.

Tabela 8: Večagentni sistem za agente odjemalce in agente proizvajalce – zmanjšanje odjema in zmanjšanje stroškov v odstotkih (SC 1, SC 5, SC 6)

		[%]		Poletje	Zima
AOD 1	SCI-SC5	Celotna sezona	Zman. odj.	-3,4	-2,8
		Zadn. ted. sez.	Zman. str.	10,3	14,3
		Zadn. ted. sez.	Zman. odj.	-0,7	-0,4
	SCI-SC6	Celotna sezona	Zman. odj.	-7,5	-3,8
		Zadn. ted. sez.	Zman. str.	10,1	18,7
		Zadn. ted. sez.	Zman. odj.	-3,9	1,5
AOD 2	SCI-SC5	Celotna sezona	Zman. odj.	-1,9	-1,7
		Zadn. ted. sez.	Zman. str.	13,7	16,1
		Zadn. ted. sez.	Zman. odj.	-1,5	-1,6
	SCI-SC6	Celotna sezona	Zman. odj.	-3,2	-3,7
		Zadn. ted. sez.	Zman. str.	17,8	21,1
		Zadn. ted. sez.	Zman. odj.	-1,9	-3,3
AOD 3	SCI-SC5	Celotna sezona	Zman. odj.	-2,0	-0,1
		Zadn. ted. sez.	Zman. str.	9,4	14,7
		Zadn. ted. sez.	Zman. odj.	-1,2	2,0
	SCI-SC6	Celotna sezona	Zman. odj.	1,2	2,2
		Zadn. ted. sez.	Zman. str.	14,9	20,5
		Zadn. ted. sez.	Zman. odj.	5,1	5,6
AOD 4	SCI-SC5	Celotna sezona	Zman. odj.	-2,8	-2,3
		Zadn. ted. sez.	Zman. str.	-2,8	-2,3
		Zadn. ted. sez.	Zman. odj.	-2,5	-2,2
	SCI-SC6	Celotna sezona	Zman. odj.	-9,4	-8,2
		Zadn. ted. sez.	Zman. str.	-9,4	-8,2
		Zadn. ted. sez.	Zman. odj.	-8,5	-7,7
Zadn. ted. sez.	Zman. str.	19,7	31,3		

Tabela 8 prikazuje odstotkovno zmanjšanje odjema, ki ga je vsakemu od agentov uspelo realizirati, in posledične stroškovne prihranke v odstotkih med scenariji SC 5 in SC 1 ter SC 6 in SC 1. SC 1 je izhodiščni scenarij, pri katerem agentov odjemalcev ne učimo. Prihranki so prikazani za vsako od sezon, in sicer za vso sezono, ki pomeni celotno obdobje učenja agentov odjemalcev, ter le za zadnji teden v določeni sezoni, ki pomeni delovanje naučenih agentov. Tabela 8 kaže enako razmerje med odstotkovnim zmanjšanjem odjema in zmanjšanjem stroškov kot tabela 7. Ob primerjavi rezultatov (tabela 7 in 8) kaže tabela 8 nekoliko zmanjšan učinek delovanja agentov glede zmanjšanja stroškov na dnevnem trgu, kar pomeni, da se odjem zmanjša v manjših odstotkih in doseže manjše odstotkovne prihranke, ko v sistem dodamo še agente proizvajalce.

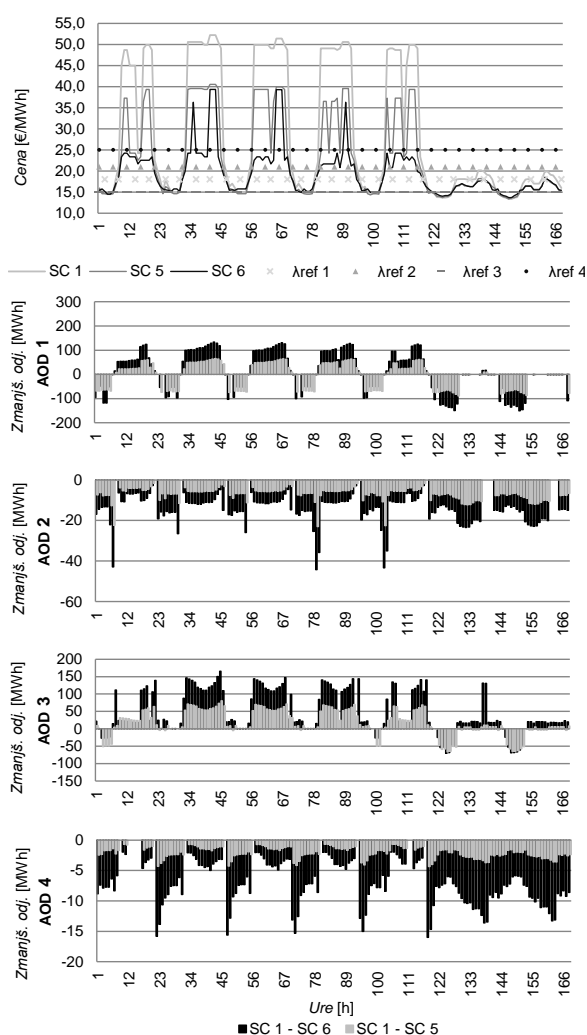


Slika 3: Večagentni sistem za agente odjemalce in agente proizvajalce – cene, zmanjšanje odjema, zadnji teden, poletje (SC 1, SC 5, SC 6)

V nasprotju s tem pa ob primerjavi tedenskih profilov cen opazimo, da so se cene z uporabo agentov proizvajalcev znižale. Agentom odjemalcem namreč uspe prilagoditi svoje ponudbe tako, da izpodrinejo dražje enote, s tem pridejo v obratovanje in znižajo ceno električne energije glede na napoved. To najbolje pokaže slika 3 v dneh 2–5 pri scenariju SC 6. Povedano za SC 5 ne velja poleti, kot kaže slika 3, ko so cene v dneh 2 in 3 z uporabo agentov proizvajalcev višje kot brez njih.

Rezultati kažejo, da trg pri več neodvisnih proizvajalcih, ki med seboj tekmujejo v ponudbah odjemalcem (brez kartelnih dogovorov), deluje bolje in vodi v zniževanje cen električne energije, seveda če se tudi odjemalci na cenovne signale znajo odzivati.

Naj omenimo, da bi bil predstavljeni agentni model ustrezen tudi za večtarifni sistem med odjemalci in dobaviteljem, le da bi za enako natančnost rezultatov potrebovali sorazmerno več obiskov posameznih cenovnih nivojev oz. daljše obdobje učenja.

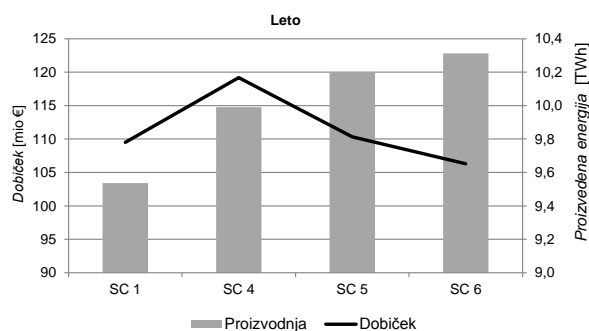


Slika 4: Večagentni sistem za agente odjemalce in agente proizvajalce – cene, zmanjšanje odjema, zadnji teden, zima (SC 1, SC 5, SC 6)

Slika 5 prikazuje skupno proizvodnjo in dobiček za vse agente proizvajalce za SC 1, SC 4, SC 5 in SC 6. SC 1 je izhodiščni scenarij, ko ni ne aktivnih agentov proizvajalcev ne aktivnih agentov odjemalcev, SC 4 pa ima aktivne samo agente proizvajalce, odjemalcev pa ne. SC 5 in SC 6 sta za odjemalce enaka kot SC 2 in SC 3, s tem da so aktivni tudi agenti proizvajalci, za katere so parametri v SC 4, SC 5 in SC 6 enaki. Slika 5 prikazuje proizvodnjo in dobiček agentov proizvajalcev za vse leto. Pri tem ne prikazujemo celotne proizvodnje, ampak samo tisti del, ki je modeliran kot aktivni agenti proizvajalci (APR).

Iz navedenega jasno izhaja, da proizvajalci največji dobiček dosežejo v SC 4, kjer pri agentih odjemalcev ni odziva. Svojo proizvodnjo povečajo, hkrati pa povečajo tudi dobiček. Ceno uspešnosti proizvajalcev v tem primeru plača odjemna stran, saj se zaradi neodzivnosti odjemalcev zvišajo cene na trgu, s tem pa se povečajo tudi stroški za nakup električne energije na dnevnem trgu.

V SC 5 in SC 6, ko so aktivni tudi odjemalci, vidimo, da je za agente proizvajalce pri nekoliko povečani količini proizvedene energije dobiček manjši. Za to poskrbijo agenti odjemalci, ki so s svojim delovanjem ustrezna protiutež delovanju agentov proizvajalcev. Delovanje agentov odjemalcev agentom proizvajalcem ne povzroči izgube, temveč le zmanjšanje dobička pri približno enaki količini proizvedene energije.



Slika 5: Skupna proizvodnja in dobiček agentov proizvajalcev po scenarijih SC 1, SC 4, SC 5 in SC 6 za vse leto

#### 4 SKLEP

V prvem in drugem delu članka je predstavljeno modeliranje agentov odjemalcev. Pri tem smo upoštevali, da na trgu na debelo po energiji v imenu odjemalcev povprašujejo njihovi dobavitelji. Dobavitelji ustrezne količine energije zagotovijo na terminskem ali sprotnem trgu. Predvidevali smo, da dobavitelji vso potrebno energijo na trgu na debelo kupijo na dnevnem trgu. Dobavitelji z odjemalci na trgu na drobno sklenejo pogodbo o dobavi električne energije po stalnih cenah. Kadar je ta cena ena sama, imamo opravka z enotarnim sistemom med dobaviteljem in odjemalci. Ceno, po kateri je sklenjena pogodba med dobaviteljem in odjemalci, smo imenovali referenčna cena agenta. Če je dobavitelj povezan z odjemalci tudi s pogodbo o prilagajanju odjema, ko bi bilo to prilagajanje potrebno, bodisi na prostovoljnem zmanjšanju odjema odjemalcev na poziv bodisi z neposrednim nadzorom nad porabniki odjemalcev, imajo dobavitelj in njegovi odjemalci skupen cilj, ki jim omogoča oblikovanje strategije glede prilagodljivosti na trgu na debelo.

Zaradi te prilagodljivosti ima dobavitelj na trgu na debelo določeno finančno korist. Če to korist deli tudi z odjemalci, so odjemalci ustrezno motivirani, da se obnašajo prožno in s tem zagotovijo dobaviteljevo prilagodljivost. To skupno delovanje odjemalcev in njihovega dobavitelja smo modelirali kot agenta odjemalca, ki v sebi združuje trg na drobno in nastopa na trgu na debelo. Taki agenti odjemalci so lahko učinkovita protiutež agentom proizvajalcem na trgu z električno energijo na debelo.

Rezultati delovanja adaptivnega večagentnega sistema za odjemalce kažejo, da posameznemu agentu

odjemalcu uspe stroške za nakup električne energije na urnem trgu prilagoditi stroškom iz pogodbe med odjemalcem in dobaviteljem, ki jih definirajo napovedane količine odjema in referenčna cena. Odvisno od strategije odjema in s tem potrebne količine energije na trgu na debelo lahko povečajo ali zmanjšajo [7]. Če svoj odjem agent zmanjša za določen odstotek, je v odstotkih njihovo zmanjšanje stroškov večje od odstotkovnega zmanjšanja odjema. Če svoj odjem agent poveča za določen odstotek glede na napovedanega, je v odstotkih povečanje stroškov manjše od odstotkovnega povečanja odjema, ali pa agent celo doseže zmanjšanje stroškov. Povedano velja za vse agente v vseh obdobjih, v vseh scenarijih, kar pomeni, da vsakemu agentu odjemalcu uspe znižati svoj specifični strošek za nakup električne energije. Korist, ki jo ima agent odjemalec, si razdelijo dobavitelj in njegovi odjemalci, vendar o delitvi te koristi med omenjene deležnike nismo podrobneje govorili, saj to presega okvire te raziskave.

Ko agentom odjemalcem na trgu dodamo agente proizvajalce, agenti odjemalci svoj specifični strošek za nakup energije nekoliko povečajo, vendar pa se na drugi strani znižajo cene električne energije. Aktivni agenti odjemalci namreč iz obratovanja izločijo proizvodne enote, ki so prej določale tržne cene, zato se tržne cene ustrezno znižajo. Iz povedanega sledi, da so odzivni odjemalci ustrezna protiutež strateškemu zviševanju ponudb odjemalcev na trgu, kar pa proizvajalcev ne vodi v izgubo, le v zmanjšanje dobička.

V članku je agentni sistem na strani odjema predstavljen s štirimi agenti dobavitelji, od katerih ima vsak agent dobavitelj svoj portfelj odjemalcev in pri tem določeno neko referenčno ceno. Predstavljeni sistem bi bil primeren tudi za simuliranje več agentov ali agenta, ki ima pod seboj več različnih skupin odjemalcev in pri vsaki od teh skupin različne omejitve prilagodljivosti in različne referenčne cene, vendar bi bilo pri tem treba dodati še preprosto logiko agregiranja različnih strategij za različne skupine odjemalcev v neko lastno strategijo dobavitelja, s katero bi nastopal na trgu na debelo. Pri tem osnovna logika delovanja agenta ostane nespremenjena.

Razvit agentni pristop modeliranja agentov odjemalcev bi lahko uporabljali dobavitelji električne energije in proizvajalci za simuliranje obnašanja odjemalcev in posledične učinke na trgu, da bi se znali temu učinkovito prilagoditi s svojimi ponudbenimi strategijami.

## 5 PRILOGA: LISTA SIMBOLOV

$a$	Akcije agenta odjemalca pri SA-Q-učenju
$A$	Konstanta pri kvadratnem členu v kvadratni funkciji, ki opisuje stroškovno krivuljo proizvodne enote
$B$	Konstanta pri linearnem členu v kvadratni funkciji, ki opisuje stroškovno krivuljo proizvodne enote
$C$	Prosti člen v kvadratni funkciji, ki opisuje

	stroškovno krivuljo proizvodne enote
$D$	Indeks odjemalca
$d_m$	Velikost stanja določenega stanja $M$ za agenta odjemalca pri SA-Q-učenju
$d_n$	Velikost stanja določenega stanja $N$ za agenta proizvajalca pri SA-Q-učenju
$h$	Ura
$i$	Zaporedna številka agenta odjemalca
$j$	Zaporedna številka agenta proizvajalca
$M$	Določeno stanje v naboru stanj agenta odjemalca pri SA-Q-učenju
$m$	Nabor stanj agenta odjemalca pri SA-Q-učenju
$\max$	Maksimalna vrednost spremenljivke
$\min$	Minimalna vrednost spremenljivke
$N$	Določeno stanje v naboru stanj agenta proizvajalca pri SA-Q-učenju
$n$	Nabor stanj agenta proizvajalca pri SA-Q-učenju
$o$	Akcije agenta proizvajalca pri SA-Q-učenju
$p$	Letni čas
$P_D$	Napovedana odjemna moč agenta odjemalca
$P_D^*$	Z učenjem prilagojena in realizirana odjemna moč agenta odjemalca
$P_G$	Proizvedena delovna moč proizvodne enote
$q$	Normalizirana SA-Q-vrednost
$Q$	Q-vrednost
$r$	Normalizirana nagrada agenta pri SA-Q-učenju
$R$	Nagrade agenta pri SA-Q-učenju
$s$	Stanja agenta pri SA-Q-učenju
$sp$	Indeks, ki označuje spodnjo mejo določenega stanja agenta pri SA-Q-učenju
$t$	Epizoda obiska stanja pri učenju
$Temp$	Faktor temperature v kriteriju Metropolis pri SA-Q-učenju
$u$	Konstanta, ki v enačbi SA-Q-učenja vpliva na faktor $\alpha$
$zg$	Indeks, ki označuje zgornjo mejo določenega stanja agenta pri SA-Q-učenju
$\alpha$	Faktor v enačbi SA-Q-učenja
$\beta_G$	Prihodki proizvodne enote od prodaje električne energije
$\Theta$	Stroškovna proizvodna krivulja proizvodne enote
$\lambda_e$	Tržna cena električne energije
$\lambda_G$	Mejni strošek proizvedene megvatne ure za proizvodno enoto
$\lambda_{ref}$	Referenčna cena agenta odjemalca
$\pi_D$	Stroški odjemalca na trgu električne energije
$\pi_G$	Stroški proizvedene električne energije proizvodne enote
$\varphi$	Konstanta, ki v kriteriju Metropolis pri SA-Q-učenju vpliva na faktor $Temp$
$\Psi_D$	Kriterij za agenta odjemalca
$\Psi_G$	Dobiček proizvajalca na trgu električne energije

## ZAHVALA

Raziskava je nastala v okviru raziskovalne skupine Elektroenergetski sistemi, P2-0356, ki jo financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS). Avtorji se zahvaljujejo tudi Tehnološki agenciji Slovenije (TIA) in EU, ki je raziskavo podprla s sredstvi iz Evropskega socialnega sklada.

## LITERATURA

- [1] B. Kladnik, G. Artač, M. Hajdinjak, and A. F. Gubina, "Večagentni model za agente odjemalce in agente proizvajalce na trgu električne energije, 1. del - model," *Elektrtehniški vestnik*.
- [2] R. Billinton and W. Li, *Reliability Assessment of Electrical Power Systems Using Monte Carlo Methods*. New York: Plenum Press, 1994.
- [3] C. Grigg, P. Wong, P. Albrecht, R. Allan, M. Bhavaraju, R. Billinton, Q. Chen, C. Fong, S. Haddad, S. Kuruganty, W. Li, R. Mukerji, D. Patton, N. Rau, D. Reppen, A. Schneider, M. Shahidehpour, and C. Singh, "The IEEE Reliability Test System-1996. A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1010–1020, 1999.
- [4] Q. Binh Dam, A. P. Sakis Meliopoulos, G. T. Heydt, and A. Bose, "A Breaker-Oriented, Three-Phase IEEE 24-Substation Test System," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp. 59–67, Feb. 2010.
- [5] D. Kirschen and G. Strbac, *Fundamentals of Power System Economics*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2004, p. 296.
- [6] "IEEE Reliability Test System: A report prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, No. 6, pp. 2047–2054, 1979.
- [7] B. Kladnik, A. Gubina, G. Artac, K. Nagode, and I. Kockar, "Agent-Based Modeling of the Demand-Side Flexibility," in *Power Engineering Society General Meeting, 2011. IEEE*, 2011, pp. 1–8.

**Blaž Kladnik** je doktoriral 2013 na Fakulteti za elektrotehniko, Univerze v Ljubljani. V letih 2008 in 2009 je bil kot raziskovalec in asistent zaposlen v Laboratoriju za energetske strategije na Fakulteti za elektrotehniko. Med leti 2010 in 2013 je bil mladi raziskovalec iz gospodarstva v podjetju HSE, d.o.o. in v Laboratoriju za energetske strategije. Njegovo področje raziskovanja je obsegalo modeliranje odzivnosti in upravljanje odjema, agentnega modeliranja trga električne energije, učinkovito rabo energije, obnovljive vire energije in ekonomiko v elektroenergetiki. Kot trgovec s plinom in analitik upravljanja s portfelji je zaposlen v HSE, d.o.o..

**Gašper Artač** je doktoriral leta 2013 na Fakulteti za elektrotehniko, Univerze v Ljubljani. Med leti 2008 in 2013 je bil mladi raziskovalec iz gospodarstva pri podjetju GEN-I, d.o.o., in v Laboratoriju za energetske strategije na Fakulteti za elektrotehniko. Njegovo področje raziskovanja je obsegalo področje odzivnosti in upravljanje odjema električne energije, stohastično modeliranje trga z električno energijo, učinkovito rabo energije, obnovljive vire energije in ekonomiko v elektroenergetiki. Sedaj je kot tržni analitik zaposlen v podjetju GEN-I, d.o.o..

**Melita Hajdinjak** je leta 2006 doktorirala s področja elektrotehnike, leta 2012 pa s področja matematike, oboje na Univerzi v Ljubljani. Zaposlena je kot docentka s področja matematike na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njeno raziskovalno delo sega na področja analize in modeliranja podatkov, matematične logike, inteligentnih informacijskih sistemov in uporabne statistike.

**Andrej Gubina** je doktoriral l. 2002 na Univerzi v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, kjer je od l.2011 tudi izredni profesor. Leto 2000 je kot Fulbrightov štipendist in gostujoči raziskovalec prebil na MIT, Cambridge, ZDA. Med leti 2002 in 2005 je osnoval in vodil Oddelek upravljanja s tveganji v Sektorju trženja na HSE d.o.o. v Ljubljani. Od marca 2007 je predstojnik Laboratorija za energetske strategije, UL FE. Leta 2008 in 2009 je kot Research Lecturer deloval tudi v Electricity Research Centru, University College Dublin, Irska. Njegovo raziskovalno področje obsega deregulacijo in ekonomiko EES, načrtovanje proizvodnje v pogojih trga z električno energijo, obvladovanje tveganj, gospodarjenje s sredstvi EES-a, ter obnovljive vire električne energije - trženje in regulativo.