

PRIMJENA VIŠEAGENTSКИH SUSTAVA U SIMULATORIMA TRŽIŠTA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM APPLICATION OF MULTI-AGENT SYSTEMS IN ELECTRICITY MARKET SIMULATORS

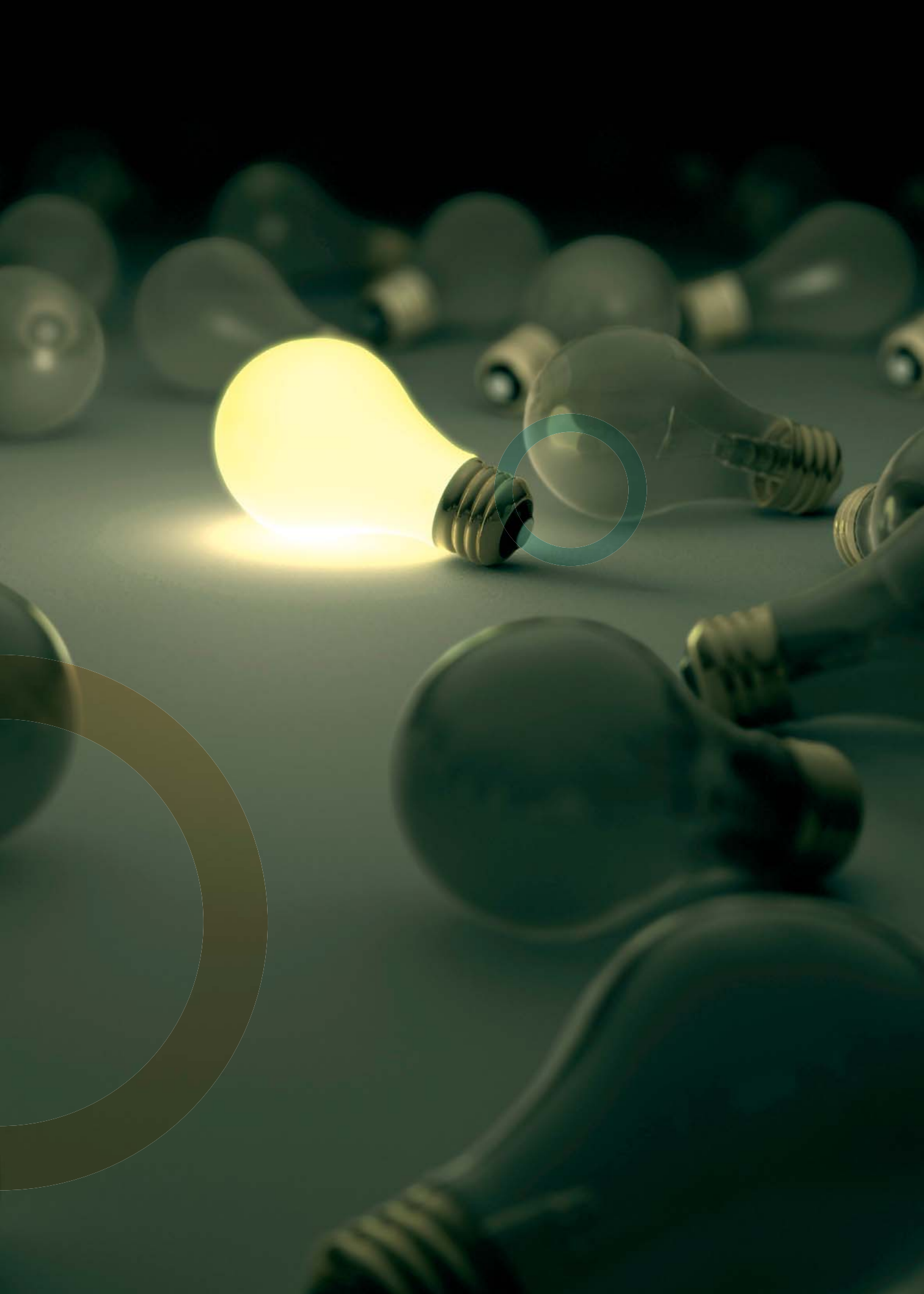
Ivan Rajšl, dipl. ing., Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska
Prof. dr. sc. Slavko Krajcar, Sveučilište u Zagrebu,
Fakultet elektrotehnike i računarstva,
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska
Krešimir Krpan, dipl. ing., Emerson Network Power,
Selska cesta 93, 10000 Zagreb, Hrvatska

Kako procesi liberalizacije i deregulacije tržišta električne energije diljem svijeta uzimaju sve više maha, tako se broj sudionika na tržištu, a ujedno i njihova raznolikost, naglo povećava. U tradicionalnom monopolističkom modelu tržišta svi su procesi, koji se odvijaju u elektroenergetskom sustavu (EES), bili pod nadzorom vertikalno integriranih kompanija. No, kako se tržišna logika mijenja od one usmjerene na što je niže moguće troškove proizvodnje električne energije na težnju k što većem profitu, tako se i rizik raspodjeljuje među svim tržišnim sudionicima podjednako i nije više u potpunosti na leđima krajnjih potrošača. U takvim nesigurnim uvjetima, u kojima se cijena električne energije mijenja iz sata u sat, svaki tržišni sudionik želi se osloniti na pomoć pouzdanog alata koji bi mu pomogao pri donošenju optimalnih i kvalitetnih odluka i strateških nastupa.

Since the liberalization and deregulation of the electricity markets throughout the world are in full swing, the number of market participants, as well as their diversity, is sharply increasing. In the traditional monopolistic market model, all the processes that occur in a power system have been supervised by vertically integrated companies. Since market logic is changing from that oriented toward minimizing generation costs for electrical energy to the trend of maximizing profit, the risk is being distributed among all the market participants uniformly and is no longer entirely borne by the final consumers. Under such uncertain conditions, in which the prices of electrical energy change from hour to hour, each market participant wants a reliable tool to facilitate optimal and quality decisions and strategic performance.

Ključne riječi: agenti, EMCAS simulacijski model, simulatori tržišta električne energije, tržište električne energije

Key words: agents, Electricity Market Complex Adaptive System (EMCAS), electricity market simulators, electricity market.



1 UVOD

Kako bi bilo moguće modelirati bilo koji ekonomski sustav nužno je poznavati mikro ponašanja sudionika u njemu, načine komunikacije i interakcije među sudionicima te globalne zakonitosti i pravilnosti promatranog ekonomskog sustava. Ekonomisti već stoljećima pokušavaju što je moguće bolje modelirati ekonomske procese. Takvi modeli trebali bi biti sposobni nositi se sa stvarnim problemima prisutnim u ekonomskim sustavima kao što su nesimetričnost informacija, nesavršena kompetitivnost, strateška interakcija, kolektivno učenje, mogućnost postojanja višestruke ravnoteže sustava i drugima. Naime, ekonomski život sastoji se od mnogo strateških interakcija među tvrtkama, kućanstvima, upravnim tijelima i drugima. Područja analize ponašanja tržišnih sudionika u ekonomiji naziva se teorijom igara (engl. *Game Theory*). Teorija igara analizira načine na koje dva ili više sudionika, odnosno dvije ili više strana, koje sudjeluju u takvoj strukturi kao što je tržište, odabiru poteze ili strategije koje imaju utjecaja na svakog sudionika. Ovu teoriju je razvio John von Neumann (1903.–1957.), mađarski matematički genij.

Za analizu i simulaciju ovakvih tržišnih stanja zasigurno je potrebno koristiti simulacijske alate koji prelaze okvire optimizacijskih modela koji su se koristili u većoj mjeri u monopolističkom okruženju, ali se i danas još uvijek koriste. Dosadašnji napredak u razvoju analitičkih i proračunskih alata omogućuje nove i naprednije pristupe kvantitativnim studijama ekonomskih sustava. Jedan od takvih pristupa je računski model ekonomskog sustava zasnovan na agentima (engl. *Agent-based Computational Economics*, ACE).

2 OPĆENITO O TRŽIŠTU

Tržište je ustrojstvo kojim kupci i prodavači međusobno djeluju da bi odredili ravnotežnu cijenu i količinu dobara ili usluga [1]. U tržišnoj ekonomiji niti jedan pojedinac ili organizacija nije odgovoran za proizvodnju, potrošnju, razdiobu i određivanje cijena. U tržišnom sustavu sve ima cijenu koja predstavlja vrijednost nekog dobra. Upravo te cijene usklađuju odluke proizvođača i potrošača na tržištu. Više cijene ohrabruju proizvodnju, ali dovode do smanjenja kupovine potrošača. Istodobno niže cijene ohrabruju potrošnju, ali obeshrabruju proizvodnju. Cijene su dakle kotač ravnoteže u tržišnom ustrojstvu.

1 INTRODUCTION

In order to model any economic system whatsoever, it is necessary to be acquainted with the micro behavior of the participants, the manner of communication and interaction among the participants and the global regularity of the economic system being studied. Economists have been trying to model economic processes accurately for centuries. Such models should be capable of confronting the actual problems present in economic systems such as information asymmetry, imperfect competition, strategic interaction, collective learning, the possibility of the existence of multiple-equilibrium systems etc. Economic life consists of many strategic interactions among companies, households, administrative bodies and others. The area of the analysis of the behavior of market participants in the economy is known as the game theory. The game theory analyzes the manner in which two or more participants, i.e. two or more sides who participate in a structure such as a market, choose moves or strategies that have an impact upon each participant. This theory was developed by the Hungarian mathematical genius John von Neumann (1903–1957).

For the analysis and simulation of such market states, it is certainly necessary to use simulation tools that exceed the framework of the optimization models that were used in monopolistic environments to a great extent but are also still in use today. Advances to date in the development of analytical and computational tools permit new and more advanced approaches to quantitative studies of economic systems. One such approach is agent-based computational economics, ACE.

2 GENERAL MARKET INFORMATION

A market is a structure according to which buyers and sellers mutually act in order to establish price equilibrium and the quantity of goods or services [1]. In a market economy, no individual or organization is responsible for the production, consumption, distribution and determination of prices. In a market system, everything has a price that represents the value of the commodity. These prices actually coordinate the decisions of the producers and consumers on the market. Higher prices encourage production but lead to a reduction in consumer purchases. At the same time, lower prices encourage consumption but discourage production. Prices are thus a balance wheel in the market structure.

Odlike tržišnog mehanizma potpuno se ostvaruju samo onda kad su prisutni nadzori i uravnotežena savršene konkurencije, što znači da niti jedno poduzeće ili potrošač nije sposobno utjecati na tržišnu cijenu. Suprotno tome, nesavršena konkurencija dovodi do cijena koje podižu troškove i smanjuju kupovinu potrošača ispod učinkovitih razina. Model sa suviše visokom cijenom i suviše niskom proizvodnjom obilježje je prisutnosti nesavršene konkurencije.

Kroz godine i godine tržište je evoluiralo od jednostavnih mjesta na kojima su se razmjenjivala dobra do virtualnih domena u kojima informacije kruže u elektroničkom obliku, tako da se danas ugovori o kupnji ili prodaji mogu sklopiti tek jednostavnim klikom miša na burzama prisutnim na internetu. No, unatoč svim tim, prvenstveno tehničkim promjenama, osnovni princip i namjena tržišta je ostala ista: tržište je mjesto sastajanja kupaca i prodavača koji pokušavaju ostvariti trgovinu po cijeni koja zadovoljava obadje strane.

3 ELEKTRIČNA ENERGIJA KAO SPECIFIČAN PROIZVOD

Kao i svaki drugi proizvod i električna energija je objekt trgovinske razmjene, no s nekim bitnim posebnostima. Razvoj tržišta električne energije zasniva se na pretpostavci da se električna energija može smatrati običnim proizvodom. Ipak postoje bitne razlike između nje i ostalih proizvoda kao što su na primjer energenti (nafta, plin i dr.). Razlika se prvenstveno očituje u brzini kojom se odvija razmjena električne energije i drugih proizvoda. Električna energija se prenosi brzinom svjetlosti, dakle gotovo trenutačno, dok je za razmjenu svih drugih dobara potrebno puno više vremena. Tako dinamičan sustav kao što je elektroenergetski zahtijeva jednakost proizvodnje i potrošnje u realnom vremenu.

Ukoliko takva jednakost iz bilo kojeg razloga nije prisutna može doći do sloma sustava koji za sobom povlači katastrofalne posljedice. Takvi poremećaji su apsolutno neprihvatljivi, ne samo zato što tržište električne energije prestaje s radom, nego i čitava zahvaćena regija ili država ostaje bez napajanja električnom energijom kroz nekoliko sati ili duže.

Vrijednost neisporučene električne energije (engl. *Value Of Lost Load* - VOLL) procjenjuje sa na iznose i do stotinu puta veće od vrijednosti isporučene električne energije. Zbog svih ovih razloga jasno je da upravljanje neravnotežom između potrošnje i proizvodnje električne energije mora

The characteristics of the market mechanism are only completely fulfilled when supervision and perfect competitive equilibrium are present, which means that no enterprise or consumer is capable of affecting the market price. On the contrary, imperfect competition leads to prices that raise costs and reduce consumer buying to below the effective levels. A model with an excessively high price and excessively low production is characteristic of the presence of imperfect competition.

Through the years, the market has evolved from a simple place where goods are exchanged to virtual domains in which information circulates in electronic form, so that contracts on buying or selling can be entered today with a simple mouse click on Internet markets. However, despite all of this, especially technical changes, the basic principle and purpose of the market have remained the same: the market is a meeting place for buyers and sellers who are attempting to conduct trade at a price that satisfies both sides.

3 ELECTRICITY AS A SPECIFIC PRODUCT

Like every other product, electricity is an object of market exchange but also has some important particularities. The development of the electricity market is based upon the assumption that electricity can be considered to be an ordinary product. Nonetheless, there are significant differences between it and other products such as, for example, energy-generating products (oil, gas etc.). The difference is primarily evident in the speed in which the exchange of electricity occurs, as opposed to other products. Electricity is transmitted at the speed of light, i.e. nearly instantaneously, while the exchange of all other goods requires much more time. A dynamic system such as an electricity system requires equal production (generation) and consumption in real time.

Insofar as such equality is not present for any reason whatsoever, a breakdown in the system may occur, leading to catastrophic consequences. Such disruptions are absolutely unacceptable, not merely because the electricity market ceases operations but because the entire affected region or country remains without its electricity supply for several hours or longer.

The value of lost load (VOLL) is estimated at amounts of up to a hundred times greater than the value of delivered electricity. For all these reasons, it is clear that the management of the imbalance between the consumption and generation of elec-

biti povjereno nezavisnom mehanizmu koji se ne oslanja na tržište i mora se provesti bez obzira na troškove koje iziskuje. No, mehanizam stvaranja cijene ne može djelovati dovoljno brzo da bi uspio uravnotežiti proizvodnju i potrošnju u realnom vremenu. Cijena električne energije se zbog toga kreira ili prije realnog vremena, *ex ante*, ili nakon realnog vremena, *ex post* [2].

Pri kupnji bilo kojeg drugog proizvoda kupac može ući u trag proizvođaču tog proizvoda. S električnom energijom nije takav slučaj. Tako potrošač nije u stanju koristiti energiju isključivo jednog proizvođača električne energije. Sva proizvedena energija se ujedinjuje, a to je moguće, jer ne postoji razlika između jedinica električne energije proizvedenih od različitih generatora. Ovo ujedinjenje je poželjno, jer dovodi do ekonomije razmjera: maksimalni ukupni proizvodni kapaciteti moraju biti razmjerni maksimalnoj agregatnoj (zbirnoj) potražnji. Ipak, mana je u tome što rušenje sustava u kojem se ujedinjuje električna energija utječe na sve sudionike tog sustava (ukoliko ne bi bilo ujedinjavanja tada bi ispad jednog generatora utjecao samo na potrošače koji troše električnu energiju koju on proizvodi).

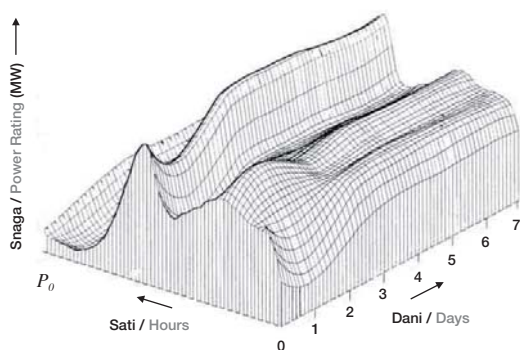
Potrošnja električne energije pokazuje određene pravilnosti u dnevnim i tjednim cikličkim varijacijama. Na slikama 1 i 2 se nalaze prikazi tjednih i mjesečnih dijagrama opterećenja [3].

Electricity must be entrusted to an independent mechanism that does not rely upon the market and must be conducted regardless of the costs that ensue. Nonetheless, the mechanism for creating prices cannot act quickly enough in order to succeed in balancing generation and consumption in real time. Therefore, electricity prices are created either prior to real time, *ex ante*, or after real time, *ex post* [2].

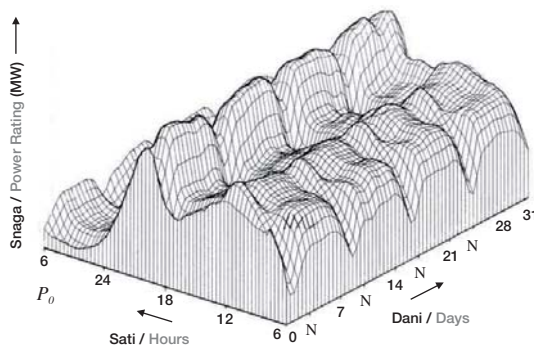
In purchasing any other product, a customer is able to trace the producer of that product. This is not the case with electrical energy. Thus, the consumer is not in a situation to use energy exclusively from one electricity generator enterprise. All the generated energy is pooled, which is possible because there is no difference between units of electrical energy produced by various generators. This pooling is desirable because it leads to an economy of scale the maximum total generation by the facilities must be proportionate to the maximum aggregate demand. Nonetheless, an inherent shortcoming is that a breakdown in a system in which there is pooling of electricity has an impact upon all the participants in that system (if there were no pooling, the breakdown of one generator would only affect the consumers who consume the electricity that it produces).

The consumption of electricity shows certain regularities in the daily and weekly cyclical variations. Figures 1 and 2 present weekly and monthly load diagrams [3].

Slika 1
3D dijagram tjednog opterećenja
Figure 1
3D weekly load diagram



Slika 2
3D dijagram mjesečnog opterećenja
Figure 2
3D monthly load diagram



Za razliku od drugih proizvoda koji se mogu skladištiti, električna energija se troši u trenutku kada se i proizvodi. Kako se potrošnja stalno mijenja potrebni su proizvodni kapaciteti koji mogu pratiti te promjene. Logično je dakle da neće svi proizvodni kapaciteti biti u pogonu tijekom čitavog dana. Za vrijeme niske potražnje u pogonu su samo najučinkovitije proizvodne jedinice, a manje učinkovite jedinice koriste se za pokrivanje vršnih opterećenja.

Karakteristike elektroenergetskog sustava moguće je opisati matematičkim funkcijama, zbog činjenice da je to interkonekcijski fizički sustav. To omogućava detaljnije ekonomsko modeliranje elektroenergetskog sustava nego što je to moguće u drugim područjima gospodarstva.

4 PROFITNA ORIJENTACIJA I PLANIRANJE NA TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Elektroenergetski sektor proživljava burno razdoblje mijena i prestrukturiranja. Premda je velik broj vertikalno organiziranih monopolističkih energetske kompanija i dalje prisutan u svijetu, tržišne prilike i procesi liberalizacije i deregulacije vode k formiranju kakvog takvog tržišnog natjecanja. Naime, zbog posebnosti električne energije gotovo je nemoguće uspostaviti apsolutno kompetitivno tržište u kojem niti jedan tržišni sudionik ne bi mogao utjecati na iznos tržišne cijene električne energije. Pri tome se prijenos i distribucija električne energije podrazumijevaju kao prirodni monopoli u kojima uvođenje konkurencije ne bi bilo ekonomski opravdano.

Između ostalih promjena koje uzrokuje liberalizacija i deregulacija dolazi i do promjena u pristupu planiranja EES-a. Uvođenjem potpuno otvorenog tržišta električne energije nestalo je nekadašnje stabilno monopolističko stanje u kojem se cijena električne energije određuje uglavnom vladinim odlukama. Transformacijom ovih vertikalno integriranih, monopolističkih i uglavnom nacionalnih energetske kompanija uvodi se tržišni mehanizam i natjecanje i u elektroenergetski sektor. U novonastalim prilikama rizik više nije u potpunosti na leđima samih potrošača, nego se raspodjeljuje među svim tržišnim sudionicima. Razlog tomu je prvenstveno nova tržišna filozofija. Naime, umjesto minimiziranja troškova proizvodnje kao glavnog cilja kompanija u nacionalnom vlasništvu, tvrtke sudionici u elektroenergetskom sektoru počinju razmišljati potpuno tržišno u težnji da maksimiziraju svoj profit. Isto tako pojavila se potreba za korištenjem strateških alata u svrhu smanjenja

Unlike other products that can be stored, electrical energy is consumed at the moment that it is produced. Since consumption changes constantly, it is necessary to have generation facilities that can monitor these changes. It is logical that all the generation facilities will not be in operation throughout the entire day. For times of low demand, only the most efficient generating units are in operation, and the less efficient units are only used to cover peak loads.

The characteristics of a power system can be described by mathematical functions because it is an interconnected physical system. This facilitates more detailed economic modeling of the power system than is possible in other areas of the economy.

4 PROFIT ORIENTATION AND PLANNING ON THE ELECTRICITY MARKET

The electrical energy sector is experiencing a turbulent period of change and restructuring. Although a large number of vertically organized monopolistic energy companies still exist in the world, market conditions and the processes of liberalization and deregulation are leading to the formation of some market competition. Due to the specific nature of electrical energy, it is nearly impossible to establish an absolutely competitive market in which a single market participant could not affect the market price of electricity. Moreover, the transmission and distribution of electrical energy are understood as natural monopolies in which the introduction of competition would not be economically justified.

Among the other changes being brought about by liberalization and deregulation are changes in the approach to the planning of the power system. Through the introduction of a completely open electricity market, the formerly stable monopolistic state, in which the price of electricity was determined chiefly by government decisions, has disappeared. Through the transformation of these vertically integrated, monopolistic and generally government-owned energy companies, market mechanisms and competition are being introduced into the electricity sector. Under the new conditions, risk is no longer borne entirely by the consumers but is distributed among all the market participants. The reason for this is primarily the new market philosophy. Instead of minimizing generation costs as the main goal of companies under government ownership, company participants in the electrical energy sector are beginning to think in pure market terms in the pursuit of maximizing their profits. Similarly, the need has arisen for the use of strategic tools for the purpose

rizika nastupanja na tržištu. Cijena električne energije počinje varirati ne samo tijekom dana, nego je ovisna i o godišnjem dobu i atmosferskim prilikama.

Sposobnost što boljeg predviđanja buduće situacije, odnosno stanja na tržištu, od presudne je važnosti za tržišne sudionike u novonastalim prilikama. Uz energetska i tehnička vrlo je važna i ekonomska učinkovitost. Veoma je bitna i strategija za koju se pojedini sudionici odlučuju, jer u ovakvom okruženju postoji rizik raspodijeljen među svim tržišnim sudionicima, pa je naglašena potreba za pomoćnim alatom pri učinkovitom donošenju odluka i upravljanju rizicima. Upravo radi što boljeg predviđanja kretanja na tržištu te određivanja odgovarajućeg nastupa i poteza tržišnih sudionika važnu ulogu imaju simulatori tržišta, a u novije vrijeme i višeagentski sustavi koji se razlikuju od klasičnih simulatora tržišta u samom pogledu na tržište. Dok klasični simulatori gledaju na tržište kao na jednu cjelinu, višeagentski sustavi se koncentriraju na svakog sudionika posebno, a tržište se simulira kao posljedica međusobne interakcije nezavisnih programskih entiteta – agenata. Ipak, ovi agenti nisu potpuno nezavisni, jer njihove reakcije u nekoj mjeri ovise o reakcijama drugih agenata, čime se simulira stvarno stanje na tržištu, što upravo i jest njihov cilj.

Tek bi se nadljudskim sposobnostima mogla točno odrediti neka buduća situacija, no kvalitetno podešeni agenti uvijek će optimalno reagirati na novonastalu situaciju i sasvim je sigurno, da je u većoj prednosti onaj tržišni sudionik koji posjeduje kvalitetniji i inteligentniji programski alat – višeagentski sustav.

5 AGENTSKI MODEL I AGENTI

Agentski model je specifični, individualno bazirani proračunski model koji je u čvrstoj vezi s višeagentskim sustavima. Model se počeo razvijati od jednostavnog koncepta u 1940. godini. Glavna ideja vodilja jest stvoriti proračunski uređaj (najčešće zvan agent) koji bi oponašao stvarne pojave. Povijest agentskog modela seže još od Von Neumann-ovog stroja koji je trebao biti sposoban za reprodukciju.

Agentski model se zasniva na postojanju dinamičke interakcije između više agenata koji imaju svoje zadatke. Takav sustav unutar kojeg se vrši interakcija agenata sposoban je kreirati i oponašati kompleksne procese iz stvarnog života.

of reducing the risk of appearing on the market. The price of electrical energy has begun to vary not only within a week but is also according to the season and atmospheric conditions.

The ability to forecast future situations as accurately as possible, i.e. the market situation, is of crucial importance for market participants under the new conditions. In addition to energy and technical efficiency, economic efficiency is also very important. The strategy that an individual actor decides upon is very important because the risk is distributed among all the market participants under such circumstances. Therefore, there is a marked need for an auxiliary tool for effective decision making and risk management. In order to forecast trends on the market and determine the corresponding appearance and moves by market participants, market simulators have an important role. Recently, these have included multi-agent systems that differ from classical market simulators in their perception of markets. While classical simulators view a market as a whole, multi-agent systems concentrate on each participant separately, and a market is simulated as the consequence of the mutual interaction of independent program entities – agents. Nonetheless, these agents are not completely independent because their reactions to some degree are dependent upon the reactions of other agents, according to which the actual situation on the market is simulated, which is precisely the goal.

Some future situations could only be precisely predicted by superhuman abilities but properly attuned agents will always react in an optimal manner to a newly arisen situation. The market participant who possesses a quality and intelligent program tool – a multi-agent system – is certainly at an advantage.

5 AGENT-BASED MODELS AND AGENTS

An agent-based model is a specific, individually based computational model that is closely connected to multi-agent systems. This type of model developed from a simple concept discovered in 1940. The leading concept is to create a computational device, most frequently called an agent, which emulates actual phenomena. The history of the agent-based model can be traced back to the Von Neumann machine, which was supposed to be capable of reproduction.

An agent-based model is based upon the existence of dynamic interactions among several agents that have their own tasks. Such a system, in which the agents interact, is capable of creating and emulating complex processes from real life.

Agenti su prisutni posvuda i svaki dan ljudi se susreću s velikim brojem agenata (inteligentni agenti, informatički agenti, mobilni agenti i dr.). No, postavljaju se brojna pitanja: Što su to agenti? – Je li zbilja moguće na neki način uvesti red u očevidni nered koji nas okružuje? – Ima li nešto što je zajedničko svim agentima? – Kako organizirati agente da budu sposobni obavljati određene zadatke?

Izraz agent je prilično teško egzaktno definirati. Prema [4] agente se često opisuje kao entitete sa osobinama koje se smatraju korisnima u posebnim područjima. Tako inteligentni agenti mogu oponašati mentalne procese ili simulirati racionalno ponašanje; mobilni agenti su sposobni samostalno putovati kroz međusobno povezana okruženja kako bi ostvarili postavljene ciljeve; informacijski agenti mogu filtrirati i skladno organizirati raspršene podatke i podatke koji nisu srodni; autonomni agenti mogu bez nadzora obaviti neke funkcije.

Prema Russell-u i Norvig-u (2003.), agent je sve ono što senzorima opaža svoje okruženje i utječe na to okruženje pomoću izvršnih uređaja (aktuatora) [5].

Agenti koji se stalno trude optimizirati svoje postupke nazivaju se racionalnim agentima. Tako se među racionalne agente mogu svrstati ljudi (neka su recimo oči senzori, a ruke izvršni uređaji), roboti (imaju kamere kao senzore, a kotače kao izvršne uređaje) ili programski agenti kojima je grafičko sučelje i senzor i izvršni uređaj.

5.1 Svojstva agenata

Cilj brojnih istraživanja bio je upravo pronalazak nekog suvislog skupa osobina ili svojstava koje bi agenti mogli i trebali imati.

Uobičajena svojstva agenata su [4]:

- adaptivnost: sposobnost učenja i unapređivanja na temelju iskustva,
- samostalnost: orijentiranost k cilju, proaktivno i samoinicijativno ponašanje,
- suradničko ponašanje: sposobnost suradnje s drugim agentima sa svrhom ostvarenja zajedničkog cilja,
- sposobnost zaključivanja: sposobnost reagiranja na apstraktne zahtjeve zadatka.
- sposobnost komunikacije: sposobnost komunikacije s drugim agentima na način koji je sličniji ljudskoj komunikaciji nego standardnom simboličkom program-program protokolu,
- mobilnost: sposobnost prelaska u samostalno određenom smjeru s jedne na drugu domaćinsku platformu,

Agents are present everywhere. Every day, people encounter a large number of agents (intelligent agents, information agents, mobile agents etc.) However, numerous questions arise: What are these agents? Is it really possible to introduce some manner of order into the evident disorder that surrounds us? Do all agents share something in common? How can agents be organized in order to become capable of performing certain tasks?

The expression agent is fairly difficult to define exactly. According to [4], agents are often defined as entities with attributes considered useful in a particular domain. Such intelligent agents can emulate mental processes or simulate rational behavior. Mobile agents are capable of roaming networking environments in order to fulfill their goals, information agents can filter and coherently organize scattered and unrelated data, and autonomous agents can accomplish some functions without supervision.

According to Russell and Norvig (2003), an agent is anything that can be viewed as perceiving its environment through sensors and acting upon that environment through actuators [5].

Agents that constantly strive to optimize their behavior are called rational agents. Therefore, it is possible to include people (for some the eyes are sensors and the hands are actuators), robots (they have cameras as sensors and wheels as actuators) or program agents for whom the graphic interface is the sensor and actuator.

5.1 Agent attributes

The goal of numerous investigations has been precisely to find some meaningful set of properties or characteristics that agents could and should have.

The customary properties of agents are as follows [4]:

- adaptivity: the ability to learn and improve with experience,
- autonomy: goal-directedness, proactive and self-starting behavior,
- collaborative behavior: the ability to work with other agents to achieve a common goal,
- inferential capability: the ability to act on abstract task specifications,
- knowledge-level communication ability: the ability to communicate with other agents with language more resembling human-like speech acts than typical symbol-level program-to-program protocols,
- mobility: the ability to migrate in a self-directed way from one host platform to another,

- osobnost: sposobnost oponašanja manira ljudskog ponašanja,
- reaktivnost: sposobnost selektivnog percipiranja i djelovanja,
- vremenska trajnost: prisutnost agentova identiteta i stanja kroz dugi vremenski period.

5.2 Racionalni i reaktivni agenti

Agent se smatra racionalnim ako uvijek odabire reakcije koje optimiziraju mjeru učinkovitosti određenu od strane korisnika (mjera učinkovitosti je stupanj uspješnosti rješavanja zadatka koji je korisnik postavio). Te reakcije temeljene su na trenutačnom znanju i iskustvu agenta. Racionalni agenti nazivaju se još i inteligentnim agentima.

Neka je dan diskretni skup vremenskih intervala $t=1, 2, \dots$, u kojima agent mora izabrati optimalno djelovanje a_t iz konačnog skupa svih djelovanja A koja ima na raspolaganju. Kako bi mogao reagirati racionalno, agent mora uzeti u obzir kako prošlost tako i budućnost pri odabiru prikladnog djelovanja. Pri tome prošlost podrazumijeva dosadašnja agentova opažanja i sva djelovanja koja je primjenjivao do promatranog vremenskog intervala t . Budućnost se odnosi na agentova očekivana opažanja i očekivana djelovanja.

Ukoliko se sa o_t označi agentovo opažanje u vremenu T tada se prošlost uzima u obzira na način da za optimalan odabir djelovanja agent mora koristiti sva prošla opažanja o_t i sva prošla djelovanja a_t pri čemu je $T \leq t$. Funkcija:

$$\pi(o_1, a_1, o_2, a_2, \dots, o_t) = a_t, \quad (1)$$

zahtijeva pohranjivanje svih prošlih opažanja i djelovanja, pridružuje vremenskom intervalu t optimalno djelovanje a_t i naziva se agentovom smjernicom (engl. *policy*). Ovom funkcijom je riješen dio optimalnog donošenja odluka koji se odnosi na prošlost. No, definiranje ovakve funkcije i njezina praktična primjena nisu tako jednostavni kao što naoko izgleda. Parovi prošlih opažanja i djelovanja mogu biti veoma brojni i razlikuju se od zadatka do zadatka. Dakle, sama memorija stvara probleme jer mora biti golema a dodatni veliki problem leži u računskoj složenosti određivanja funkcije π .

Navedene činjenice zahtijevaju jednostavnije smjernice, odnosno jednostavniji princip po kojem agent odabire svoje postupke. Jedna od mogućnosti pojednostavljenja jest ignoriranje svih prošlih opažanja osim zadnjeg o_t , pa djelovanje a_t ovisi samo o tom zadnjem opažanju i određuje se novom funkcijom:

5.2 Rational and reactive agents

An agent is considered to be rational if it always chooses reactions that optimize the measure of efficiency determined by the user (a measure of efficiency is the degree of success in solving a task posed by the user). These reactions are based upon the current knowledge and experience of the agent. Rational agents are also called intelligent agents.

Let us assume a discrete set of time steps $t=1, 2, \dots$, in each of which the agent must choose the optimal action a_t from a finite set of all actions A that it has available. In order to react rationally, an agent must take into account both the past and future when choosing suitable action. The past is understood to mean the agent's perceptions up to the present and all the actions that it has applied up to time t . The future refers to the agent's expected perceptions and expected activities. If o_t represents the agent's perceptions at time T then the past is taken into account in such a manner that all past perceptions o_T and all past a_T actions must be used for the optimal choice of an action by the agent, where $T \leq t$. The function

requires the storage of all past perceptions and actions up to time t and an optimal action a_t and is called the agent's policy. According to this function, part of the optimal decision making is solved regarding the past. Nonetheless, the definition of such a function and its practical application are not as simple as they seem. Pairs of past perceptions and actions can be very numerous and differ from task to task. Thus, memory itself creates problems because it must be vast and additional major problems are inherent in the computational complexity of the determination of function π .

These facts require simpler policies, i.e. a simpler principle according to which the agent chooses its procedures. One of the possibilities for simplification is ignoring all the past perceptions except for the last one, o_t , so that action a_t depends solely upon the last perception and is determined by a new function:

$$\pi(o_t) = a_t. \quad (2)$$

Agent koji koristi ovakvu funkciju ovisnu samo o zadnjem opažanju naziva se reaktivnim agentom, a njegova smjernica naziva se reaktivnom ili bezmemorijskom. Sasvim prirodno se nameće pitanje koliko ovakav agent može biti učinkovit? Njegova neučinkovitost može biti zadovoljavajuća u posebnim vrstama okruženja.

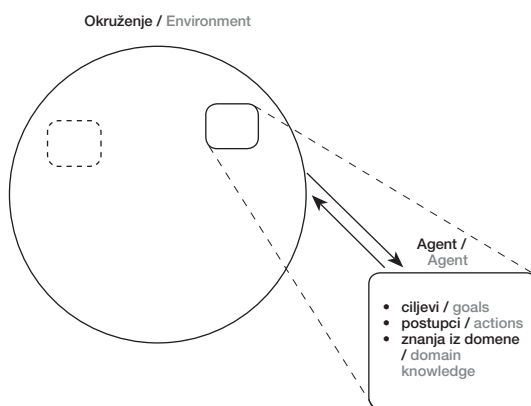
An agent that uses such a function dependent solely upon the last perception is known as a reactive agent, and its policy is called reactive or memoryless. It is quite normal to ask how such an agent can be efficient. Its efficiency can be satisfactory under certain types of environments.

5.3 Agentovo okruženje

Iz dosada navedenog je očigledno da su pojmovi agent i njegovo okruženje međusobno čvrsto povezani i niti jedan od njih ne može biti definiran bez onog drugog. Ponekad je čak teško odrediti razliku između agenta i okoline i promatrati ih odvojeno (slika 3).

5.3 Agent environments

In light of the above, it is evident that the concepts of an agent and its environment are firmly connected and neither of them can be defined without the other. Sometimes it is even difficult to determine the difference between the agent and the environment or to consider them separately (Figure 3).



Slika 3
Agent i njegovo okruženje
Figure 3
An agent and its environment

Može se promotriti okruženje u kojem se nalazi više agenata i unutar kojeg oni opažaju, razmišljaju i djeluju. Kolektivna informacija o okruženju u nekom vremenskom intervalu t a koja se tiče trenutnog zadatka naziva se stanjem okruženja i označava sa s_t . Skup svih mogućih stanja u okruženju tada se označava sa S . Za primjer može poslužiti simulacija nogometne utakmice putem agenata (robota). Tako stanja okruženja mogu biti plan nogometnog igrališta, trenutni položaj, smjer i brzine agenata ili lopte, podaci koje pojedini agenti znaju jedni o drugima i drugi parametri bitni za donošenje odluke kao što je na primjer ukupno vrijeme koje je prošlo od početka utakmice.

It is possible to study an environment in which there are several agents and in which they perceive, consider and act. Collective information on the environment during any time step t regarding the current task is called the state of the environment and is indicated as s_t . The set of all the possible states in the environment is indicated as S . For example, it is possible to use a simulation of a soccer match via agents (robots). Thus, the state of the environment can be the plan of the soccer field, the current position, direction and velocity of the agents or the ball, data which individual agents know about the others and other parameters essential for decision making such as, for example, the total time that has elapsed since the beginning of the match.

Depending upon the nature of the problem, the environment can be discrete (there is a finite number

Ovisno o prirodi problema okruženja mogu biti diskretna (postoji konačan broj stanja) ili kontinuirana (neprekidna s beskonačno mnogo stanja).

Osnovni način kojim se karakterizira okruženje iz agentove perspektive jest njegova percepcija. Okruženje je potpuno mjerljivo pojedinom agentu ako trenutačno opažanje tog agenta (o_t) potpuno otkriva trenutačno stanje okruženja (s_t), tj. ukoliko je:

$$O_t = S_t. \tag{3}$$

S druge strane, u djelomično mjerljivom okruženju trenutačno opažanje agenta pruža samo djelomičnu sliku trenutačnog stanja okruženja i to u formi uvjetne distribucije vjerojatnosti $P(s_t|o_t)$. To znači da trenutačno opažanje agenta ne otkriva potpuno stanje okruženja, ali istodobno agent svakom stanju s_t pridružuje vjerojatnost $P(s_t|o_t)$ koja kazuje koliko je vjerojatno da je baš s_t pravo stanje okruženja. Pri tome vrijedi:

$$0 \leq P(s_t|o_t) \leq 1 \tag{4}$$

i and

$$\sum_{s_t \in S} P(s_t|o_t) = 1. \tag{5}$$

Ovdje je dakle varijabla s_t slučajna varijabla koja može poprimiti sve vrijednosti iz skupa S sa određenom vjerojatnošću $P(s_t|o_t)$.

Postoje dva glavna razloga koja mogu dovesti do djelomične mjerljivosti okruženja. Prvi razlog je šum ili smetnje u sensorima putem kojih agent opaža i mjeri okolinu, a drugi je percepcijsko preklapanje, tj. dva različita stanja agentu mogu biti jednaka.

U potpuno mjerljivom okruženju funkcija po kojoj agent odlučuje o načinu djelovanja je pridruživanje pojedinih djelovanja pojedinim stanjima okruženja. Veoma je korisna činjenica da u većini slučajeva stanje okruženja u nekom vremenskom intervalu omogućuje potpuni opis prošlosti. Takvo okruženje koje ima sposobnost sakupljanja svih prošlih informacija u svojem stanju naziva se Markovim

of states) or continuous (there is an infinite number of states).

The basic manner in which an environment is characterized from the agent's perspective is the agent's perception. The environment is completely measurable by an individual agent if the current perception of that agent (o_t) fully reveals the current state of the environment (s_t), i.e. insofar as

From the other side, in a partially measurable environment, the current perception of an agent only provides a partial picture of the current state of the environment and this in a form of a conditional probability distribution $P(s_t|o_t)$. This means that the current perception of an agent does not reveal the complete state of the environment but at the same time the agent simultaneously assigns probability $P(s_t|o_t)$ to each state s_t which indicates the probability that precisely s_t is the true state of the environment. The following expressions apply:

Here variable s_t is a random variable that can assume all the values from set S with a specified probability $P(s_t|o_t)$.

There are two main reasons that can lead to the partial measurability of an environment. The first reason is the noise or interference in the sensors via which the agent perceives and measures the environment, and the second is perceptual aliasing, i.e. two different states may seem to be the same to the agent.

In a fully measurable environment, the function according to which the agent decides upon the manner of action is the mapping of the individual parts of an environmental state. It is a very useful fact that in the majority of cases the state of the environment at some time step permits the complete description of the past. Such an environment that has the ability of gathering all the past information in its state

okruženjem ili se kaže da ima Markovo svojstvo (Andrei Andreyevich Markov (1856. – 1922.) ruski matematičar). Tako u Markovom okruženju agent može koristiti bezmemorijske postupke donošenja odluka o djelovanju.

5.4 Prijelazni model

Dosada je opisan utjecaj prošlih iskustava agenta i njegovog okruženja na njegovo odlučivanje. No, kao što je već rečeno za donošenje optimalnih odluka potrebno je uzeti u obzir i budućnost.

U svakom vremenskom intervalu t agenta dakle odabire djelovanje a_t iz konačnog skupa djelovanja A . Naravno da se pod utjecajem tog agentovog djelovanja mijenja i okruženje agenta. Prijelazni model precizira način na koji se okruženje mijenja pod utjecajem djelovanja agenta.

Ako je trenutačno stanje okruženja s_t , a agent se odluči za djelovanje a_t , tada se mogu razlikovati sljedeća dva slučaja okruženja:

- determinističko okruženje u kojem prijelazni model pridružuje paru (s_t, a_t) jedinstveno novo stanje s_{t+1} . Tako u šahu na primjer svaki potez mijenja postavu na polju na deterministički način. Poznavajući dakle stanje okruženja i budući potez agenta u determinističkom okruženju jednoznačno je određeno buduće stanje okruženja.
- stohastičko okruženje u kojem prijelazni model pridružuje paru (s_t, a_t) određenu distribuciju vjerojatnosti $P(s_{t+1}|s_t, a_t)$. Pri tome je s_{t+1} slučajna varijabla koja može poprimiti sve vrijednosti iz skupa određenih stanja S i to sa pripadajućom vjerojatnošću $P(s_{t+1}|s_t, a_t)$. Uz poznato stanje okruženja i budući potez agenta u stohastičkom okruženju nije jednoznačno određeno buduće stanje okruženja, nego su poznate vjerojatnosti pojavljivanja određenih stanja okruženja.

Većina aplikacija koje oponašaju stvarni svijet zahtijevaju stohastički prijelazni model koji unosi dodatne poteškoće i još više kompliciraju proces optimalnog odlučivanja agenta.

Većinom je krajnji cilj kojem agent teži neko željeno stanje okruženja. Tako je planiranje zapravo definiranje optimalnog puta kroz sva moguća stanja prema željenom stanju. U determinističkom se okruženju podrazumijeva da agent daje prednost stanjima koja su bliža željenim. Mnogo općenitije, agent može imati različite sklonosti prema različitim stanjima.

is called a Markov environment or it is said to have the Markov property (Andrei Andreyevich Markov, 1856–1922, a Russian mathematician). Thus, an agent can use memoryless procedures in deciding upon an action in a Markov environment.

5.4 Transition model

Thus far, the impact of the agent's past experiences and the environment upon the agent's decision making has been described. However, as previously mentioned, it is also necessary to take the future into account in order to make optimal decisions.

In every time step t the agent chooses an action a_t from a finite set of activities A . Naturally, under the influence of that agent's action, the agent environment changes. A transition model specifies the manner in which the environment changes under the impact of the action of an agent.

If the current state of the environment is s_t and the agent decides upon action a_t , it is then possible to distinguish the following two environmental cases:

- a deterministic environment in which the transition model maps a state-action pair (s_t, a_t) to a single new state s_{t+1} . Thus in chess, for example, every move changes the configuration on the board in a deterministic manner. Being acquainted with the state of the environment and the future move of an agent in a deterministic environment unambiguously determines the future state of the environment,
- a stochastic environment in which the transition model maps a state-action pair (s_t, a_t) to a specific probability distribution $P(s_{t+1}|s_t, a_t)$. Here s_{t+1} is a random variable that can assume all the values from the set specific states S and this with the corresponding probability $P(s_{t+1}|s_t, a_t)$. In addition to the known state of the environment and the future move of the agent in a stochastic environment, the future state of the environment is not unambiguously determined but the probabilities of the occurrence of certain states of the environment are known.

The majority of the applications that emulate the real world require a stochastic transition model that introduces additional difficulties and further complicates the process of optimal decision making by the agent.

For the majority, the final goal to which the agent aspires is some desired state of the environment. Thus, planning is actually defining the optimal path through all the possible states toward the desired state. In a deterministic environment, it is understood that an agent affords preference to states that are close to the desired one. Much more generally, an agent may have various preferences toward various states.

5.5 Sklonosti agenata

Kako bi se formulirao ovaj pojam sklonosti agenata po jedinim stanjima, svakom stanju s se pridodaje realan broj $U(s)$ koji predstavlja sklonost agenta tom specifičnom stanju okruženja. Tako je $U(s) > U(s')$ ako i samo ako je agent skloniji stanju s od stanja s' i $U(s) = U(s')$ ako i samo ako je agent jednako sklon prema oba stanja.

Ako se pretpostavi da agent ima ugrađene sklonosti prema po jedinim stanjima, postavlja se pitanje kako agent može te sklonosti učinkovito iskoristiti pri donošenju odluka. Dakle, pretpostavljeno okruženje je stohastičko kao i prijelazni model, $P(s_{t+1}|s_t, a_t)$, a agent se nalazi u stanju s_t i pokušava odrediti djelovanje a_t . Neka je $U(s)$ sklonost ovog agenta (koji je jedini u promatranom okruženju) prema stanju s .

Donošenje odluka bazirano na sklonostima temelji se na pretpostavci da optimalno djelovanje agenta a_t^* treba maksimizirati očekivanu sklonost:

$$a_t^* = \arg \max_{a_t \in A} \sum_{s_{t+1}} P(s_{t+1}|s_t, a_t) \cdot U(s_{t+1}). \quad (6)$$

Kako bi se ocijenilo koliko je pojedino djelovanje dobro, potrebno je pomnožiti sklonost ka postizanju nekog stanja sa vjerojatnošću postizanja tog stanja i sumirati sve dobivene vrijednosti za to djelovanje. Postupak se obavlja za sva moguća djelovanja i potom se optimalno djelovanje a_t^* određuje na temelju najveće dobivene sume.

Ako svako stanje ima pridodanu vrijednost sklonosti agenta za postizanje tog stanja, agent može na naveden način odrediti optimalna djelovanja za sva moguća stanja. Tako agent posjeduje funkciju po kojoj svakom stanju pridružuje odgovarajuće djelovanje na optimalan način. Optimalna smjernica (funkcija) djelovanja agenta može se zapisati na sljedeći način:

$$\pi^*(s) = \arg \max_a \sum_{s'} P(s'|s, a) U^*(s'), \quad (7)$$

gdje je $U^*(s)$ skup najviših ostvarivih sklonosti (optimalnih sklonosti).

5.5 Agent preference

In order to formulate this concept of agent preference toward individual states, to each state s a real number $U(s)$ is added that represents the preference of the agent toward a specific environmental state. Thus, $U(s) > U(s')$ if and only if the agent has a greater preference toward state s than toward state s' and $U(s) = U(s')$ if and only if the agent has an equal preference toward both states.

If it is assumed that the agent has intrinsic preferences toward individual states, the question is posed how the agent can use these preferences effectively in making decisions. The assumed environment is stochastic, as is the transition model $P(s_{t+1}|s_t, a_t)$. The agent is situated in state s_t and attempts to determine action a_t . Let $U(s)$ represent the preference of this agent (who is the only one in the environment being studied) toward state s .

Decision making is based upon preferences based upon the assumption that the optimal action of the agent a_t^* should maximize the anticipated preference:

In order to assess the goodness of an individual action, it is necessary to multiply the preference toward the achievement of some state by the probability of achieving this state and add together all the values obtained for this action. This procedure is performed for all possible actions and optimal action a_t^* is determined on the basis of the highest sum obtained.

If every state has the added value of the preference of the agent for achieving this state, the agent can determine the optimal action for all possible states in the previously described manner. Thus, an agent possesses a function according to which the corresponding action is added to each state in the optimal manner. The optimal policy (function) of the agent's action can be expressed as follows:

where $U^*(s)$ is the set of the greatest feasible preferences (optimal preferences).

5.6 Neke moguće podjele agenata

Agenti se mogu podijeliti na jake i slabe agente [6]. Slabi agenti koriste se pri rješavanju nekih inženjerskih tipova problema gdje je potrebno nešto malo inteligencije (niža razina složenosti problema). Jaki agenti su sposobni oponašati neke ili sve osobine ljudskog uma (vrlo visoka razina složenosti problema).

Slabi agenti većinom posjeduju autonomnost (nema potrebe za ljudskim nadzorom), socijalne sposobnosti (mogućnost komunikacije s drugim agentima), reaktivnost (reagiraju na promjene u okruženju) i proaktivnost (sposobnost poduzimanja inicijative). Jaki agenti posjeduju više svojstava, kao što su znanje, usađena uvjerenja, namjere ili želje.

Sljedeća razlika može se podvući između agenata šireg djelokruga (engl. *broad*) i onih fokusiranih ili specijaliziranih agenata. Specijalizirani agenti su posvećeni posebnom zadatku ili okruženju i zahtijevaju razvijanje algoritma prilagođenog tom specijalnom zadatku. Oni nemaju sposobnost prilagođavanja i učinkovito rješavaju samo one probleme za koje su predviđeni.

Agenti šireg djelokruga su općenitiji i posjeduju širok raspon različitih sposobnosti. Njihovo djelovanje je prilično plitko jer nisu posebno specijalizirani niti za jedan zadatak.

Neki agenti su stvarno fizički prisutni, tj. utjelovljeni su (to su uglavnom roboti koji imaju kamere i druge vrste senzora i motore kao aktuatora). Drugi pak agenti nisu utjelovljeni i nisu prisutni u stvarnom svijetu. To su programski agenti koji djeluju unutar svijeta simulacije i nemaju fizičkih dijelova. Programski se agenti susreću s manje problema, jer se njihovi senzori i aktuatori mogu podesiti po volji učinkovitima.

5.7 Arhitektura agenata

Arhitektura agenta je zapravo struktura njegova programa (slika 4).

Model samostalnog (u smislu ostvarenja cilja) agenta sastoji se iz osam jedinica i uključuje [7]:

- jedinicu za opažanje (engl. *perception unit*),
- jedinicu za obradu (engl. *process unit*),
- kontrolnu jedinicu (engl. *control unit*),
- djelatnu jedinicu (engl. *action unit*),
- jedinicu za komunikaciju (engl. *communication unit*),
- jedinicu za razumijevanje (engl. *knowledge unit*),
- računsku jedinicu (engl. *compute unit*),
- jedinicu s podacima (engl. *data unit*).

5.6 Some possible agent classifications

Agents can be classified as strong or weak [6]. Weak agents are used in solving some engineering types of problems where some intelligence is required (a lower level of problem complexity). Strong agents are capable of emulating some or all of the characteristics of the human mind (a very high level of problem complexity).

The majority of weak agents possess autonomy (do not require human supervision), social abilities (the ability to communicate with other agents), reactivity (react to changes in the environment) and proactivity (the ability to take initiatives).

Strong agents possess more attributes, such as knowledge, belief, intention or desires.

The following distinction can also be made between broad agents and focused or specialized agents. Specialized agents are devoted to a particular task or environment and require the development of an algorithm adapted to the special task. They lack the ability to adapt and can only solve those problems efficiently for which they are intended.

Broad agents are more generalized and have a broad range of various abilities. Their action is fairly shallow because they are not specialized for a specific task.

Some agents are actually physically present, i.e. they are embodied (mainly robots that have cameras and other types of sensors and motors as actuators). Other agents are not embodied and are not present in the real world. These are program agents that act within the world of simulation and lack physical parts. Program agents encounter fewer problems because their sensors and actuators can be adjusted to the desired efficiencies.

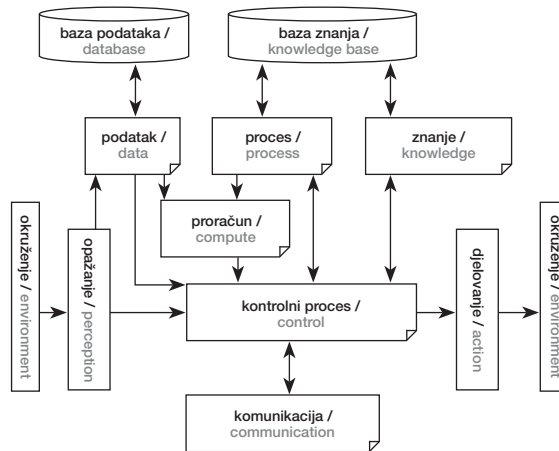
5.7 Agent Architecture

Agent architecture is actually the structure of its agent program (Figure 4).

A model of an independent (in the sense of achieving goals) agent consists of eight units, as follows [7]:

- perception unit,
- process unit,
- control unit,
- action unit,
- communication unit,
- knowledge unit,
- compute unit,
- data unit.

Slika 4
Arhitektura
samostalnog agenta
Figure 4
Goal autonomous
agent architecture



Jedinica za opažanje očitava podatke iz agentovog okruženja. Ona sadrži listu pojedinačnih stanja koja definiraju ukupno stanje okruženja. Ukoliko se neko od pojedinih stanja promijeni, lista podataka se ažurira te se obavještava kontrolnu jedinicu o promjenama kako bi poduzela odgovarajuće mjere.

Jedinica za obradu sadrži cilj ili više ciljeva te njihove međusobne odnose.

Djelatna jedinica sadrži sve djelatnosti koje je agent sposoban obaviti.

Kontrolna jedinica odlučuje koje će se djelatnosti obaviti radi ostvarenja cilja kojeg također ona odabire. Ukoliko jedinica za opažanje uoči promjene u okruženju, tada kontrolna jedinica aktivira reakcijska djelovanja na te promjene.

U računskoj jedinici su definirane funkcije kojima se odabiru ciljevi i optimalna djelovanja. Također sadrži algoritme i mehanizme odabiranja optimalnih djelovanja.

Kontrolna jedinica poziva funkcije iz računске jedinice kako bi se odredio slijedeći cilj i prikladna djelovanja.

Jedinica za razumijevanje nadgleda dio odgovoran za znanje agenta koje se primjenjuje pri rješavanju stvarnih problema.

Jedinica s podacima omogućava pristup svim mehanizmima u bazu podataka.

Komunikacijska jedinica definira načine komunikacije između agenata.

The perception unit reads data from the agent's environment. It contains a list of individual states that define the overall state of the environment. If some of the individual states change, the data list is updated and the control unit is informed of the changes in order to undertake the suitable measures.

The process unit consists of a goal or several goals and their mutual relationships.

The action unit contains all the actions that the agent is capable of performing.

The control unit decides which actions will be performed in order to achieve the goal that it also chooses. If the perception unit detects changes in the environment, the control unit activates a reactive action against the changes.

In the compute unit, functions are defined by which goals and optimal action are selected. It also contains algorithms and mechanisms for selecting optimal actions.

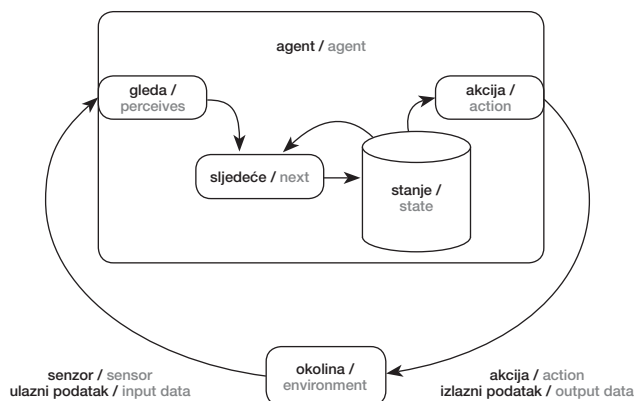
The control unit will call the functions in the compute unit according to a signal from the process unit.

The knowledge unit monitors the part responsible for the knowledge of the agent which is applied to solving actual problems.

The data unit facilitates access to all the mechanisms in the data base.

The communication unit defines the manner of communication among agents.

Slika 5
Arhitektura samostalnog agenta orijentiranog k cilju
Figure 5
Goal autonomous agent architecture



Kao što slika 5 [8] još jedanput naglašava, osnovni dijelovi agenta prema funkcijama koje obavljaju su:

- dio za opažanje (senzori),
- akcijski dio.

Prema arhitekturi agenti se mogu podijeliti na sljedeće vrste [9]:

- promišljajući agenti,
- reaktivni agenti,
- uvjerenje-želja-namjera arhitekture (BDI, engl. *Beliefs, Desires, Intentions*),
- slojeviti agenti.

Promišljajući agenti koriste, kao što im samo ime i govori, svjesno odlučivanje, odnosno logičku dedukciju i matematičku logiku pa se mogu koristiti pri dokazivanju teorema. Kako ne mogu proučavati promjene okruženja koje nastaju njihovim djelovanjem, nisu sposobni za simulaciju događaja u stvarnom vremenu.

Reaktivni agenti reagiraju na poticaje iz okoline u koju su smješteni. Jednostavni su i moguće je pratiti računanje, ali nemaju sposobnost učenja tako da se pri odlučivanju o djelovanju koriste samo podaci dobiveni opažanjem agentova okruženja.

As Figure 5 [8] reemphasizes, the basic parts of the agent according to the functions they perform are as follows:

- sensor,
- action part.

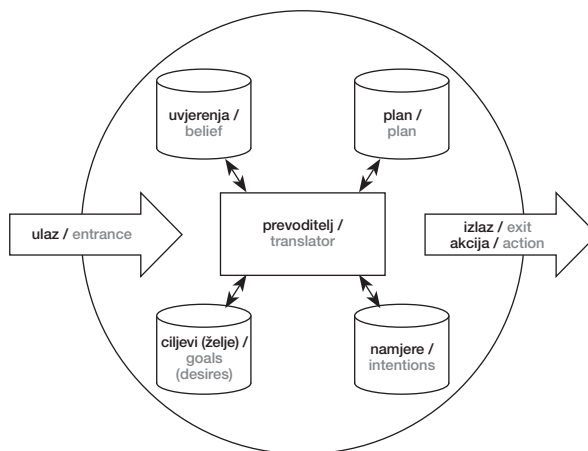
According to the architecture, agents can be classified into the following types [9]:

- deliberative agents,
- reactive agents,
- beliefs, desires and intentions (BDI),
- layered agents.

Deliberative agents, as their name implies, use deliberative decision making, i.e. logical deduction and mathematical logic, and can be used in proving theories. Since they cannot take into account changes in the environment that occur due to their action, they are incapable of simulating events in real time.

Reactive agents react to stimuli from the environment in which they are located. They are simple and the computation process can be monitored but they do not have the ability to learn. In decision making regarding action, they only use data obtained from the perception of the agent's environment.

Slika 6
Agent temeljen na
BDI arhitekturi
Figure 6
Agent based upon
BDI architecture



Na slici 6 se nalazi forma agenta temeljenog na BDI arhitekturi. BDI arhitektura agenta zasniva se na praktičnom zaključivanju. Odlučuje se o ciljevima koje treba postići i na koji način će biti postignuti. Agenti su ustrajni u svojim namjerama i one ograničavaju buduće promišljanje. Iz namjera također proizlazi svrhovito promišljanje.

Slojevite arhitekture koriste se dekompozicijom problema na dijelove, a svakom od njih se dodjeljuje određeno ponašanje. Topologija slojeva podijeljena je s obzirom na razmjenu kontrolnih podataka. Postoji horizontalna i vertikalna topologija.

Figure 6 presents the form of an agent based upon BDI architecture. BDI agent architecture is based upon practical conclusion making. Decisions are made on goals that must be achieved and in what manner they will be achieved. Agents are consistent in their intentions and they limit future deliberations. Goal based deliberation also issues from the intentions.

Layered architecture is used for the decomposition of problems into parts, and each of them is assigned certain behavior. The topology of the layers is divided according to the exchange of control data. There are horizontal and vertical topologies.

6 VIŠEAGENTSKI SUSTAVI

Višeagentski sustavi, MAS (engl. *Multiagent Systems*) spadaju u područje proučavanja umjetne inteligencije, AI (engl. *Artificial Intelligence*) koje se bavi načinima konstrukcije složenih sustava koji koriste veći broj agenata te usklađivanjem ponašanja tih agenata [9]. To je područje proučavanja raspodijeljene umjetne inteligencije (engl. *Distributed Artificial Intelligence DAI*).

Postoje brojna područja koja zahtijevaju uporabu višeagentskih sustava. Tako se ovakvi sustavi koriste u zahtjevnim računalnim igrama, problemima transporta, grafičkim problemima, GIS (Geografski informacijski sustav – *Geographic Information System*) sustavima te u mnogim drugim područjima. Ukoliko se problem svodi na veći broj ljudi ili organizacija s različitim (moguće i proturječnim) ciljevima i zasebnim informacijama, tada je nužna uporaba višeagentskih sustava kako bi se upravljalo njihovom međudjelovanjem. Takvo područje je zasigurno i tržište električne energije.

6 MULTI-AGENT SYSTEMS

Multi-agent systems (MAS) are part of the field of computational artificial intelligence, AI, which is engaged in the manner of the construction of complex systems that use a large number of agents and coordinate the behavior of these agents [9]. This is the area of the study of distributed artificial intelligence, DAI.

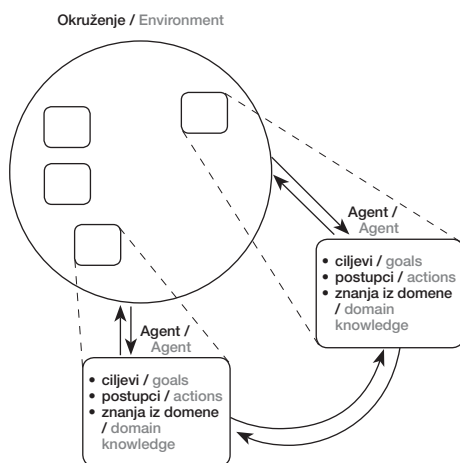
There are numerous areas that require the use of multi-agent systems. These systems are used in demanding computer games, transport problems, graphic problems, GIS (Geographic Information System) systems and many other areas. If a problem involves a large number of persons or organizations with various (possibly also contradictory) goals and separate information, it is then necessary to use multi-agent systems in order to manage their interactions. The electricity market is certainly such an area.

Višeagentski sustav se razlikuje od onog u kojem je samo jedan agent u postojanju većeg broja agenata od kojih svaki utječe na ciljeve i djelovanja svih drugih (promatrano iz perspektive jednog agenta ostali su njegovo okruženje). Također postoji mogućnost direktne interakcije (komunikacije) između dva ili više agenata. Ta interakcija agenata može biti promatrana kao dio okruženja ili potpuno odvojeno od okruženja agenata.

Iz perspektive jednog agenta stvari se dramatično kompliciraju ulaskom u višeagentski sustav s obzirom na situaciju kada je potpuno sam u svom okruženju. Naime ovdje svi ostali agenti svojim djelovanjima utječu na promjenu okruženja. Na slici 7 nalazi se prikaz dva agenta koji se nalaze u istom okruženju i pri čemu svaki ima svoje ciljeve (međusobno različite), postupke djelovanja i znanja iz određene domene. Na istoj slici prikazana je i mogućnost direktne komunikacije između ova dva agenta.

A multi-agent system differs from a system in which there is only one agent due to the presence large number of agents, each of which influences the goals and actions of all the others (from the perspective of one agent the other constitute its environment). There is also the possibility of direct interaction (communication) among two or more agents. This agent interaction can be studied as a part of the environment or completely separated from the agent environment.

From the perspective of an agent, matters become dramatically more complicated by entering a multi-agent system due to the situation when it is completely alone in its environment. All the other agents here influence change in the environment with their actions. In Figure 7, two agents are presented that are in the same environment and each has its own goals (mutually different), action procedure and knowledge of a certain domain. In the same figure, possibilities are presented for direct communication between these two agents.



Slika 7
Dva agenta u istom okruženju
Figure 7
Two agents in the same environment

Sasvim općenito, moguće je postojanje po volji velikog broja agenata koji se međusobno više ili manje razlikuju i mogu, ali i ne moraju, imati mogućnost komunikacije s ostalim agentima.

Čest je slučaj da se agenti, koji sačinjavaju isti višeagentski sustav, bitno razlikuju jedni od drugih. Tipičan primjer su programski agenti (engl. *softbot*) koji se razlikuju u realizaciji od strane različitih dizajnera. Općenito, razlike mogu biti bilo hardverske bilo softverske. Ovakvi agenti nazivaju se heterogenima za razliku od homogenih koji su dizajnirani na identičan način.

U višeagentskom sustavu prisustvo većeg broja agenata uzrokuje veću dinamičnost okoline, a time i složenost promatranog problema.

Quite generally, it is possible for a large number of agents to exist, as desired, who mutually more or less differ and can, but not necessarily, have the possibility of communicating with the other agents.

It is frequently the case that agents comprising the same multi-agent system differ from each other significantly. Typical examples are program agents (software robots or softbots), which differ according to the designers. Generally, differences can exist in hardware or software. Such agents are called heterogeneous, in contrast to homogeneous agents that are designed in the identical manner.

In a multi-agent system, the presence of a large number of agents makes the environment more dynamic and thereby increases the complexity of the problem studied.

Ukupna informacija koju primaju svi agenti višeagentskog sustava je raspodijeljena kako agenti opažaju stanja koja se razlikuju prostorno, vremenski ili čak u načinu interpretacije. Zbog svega toga stanja okruženja automatski postaju djelomično mjerljiva iz perspektive svakog pojedinačnog agenta što na različite načine utječe na odlučivanje pojedinih agenata.

Dodatni problem predstavlja miješanje podataka primljenih putem senzora te se nameće pitanje kako optimalno kombinirati percepcije pojedinih agenata s ciljem postizanja, što potpunije kolektivne slike okruženja.

Još jedna razlika višeagentskog sustava s obzirom na slučaj sustava sa samo jednim agentom jest decentralizacija upravljanja. To znači da ne postoji centralni proces koji skuplja podatke od svih agenata i na temelju tih podataka odlučuje što će svaki agent raditi. Tako odlučivanje svakog agenta u najvećoj mjeri ovisi o njemu samome.

U višeagentskim sustavima svaki pojedinačni agent treba uzeti u obzir znanja koja posjeduju drugi agenti pri donošenju vlastitih odluka. Zbog toga je posebno važan koncept javnog znanja prema kojem svaki agent zna neku činjenicu, isto tako svaki agent zna da svaki drugi agent zna tu činjenicu, i tako dalje.

Komunikacija u višeagentskim sustavima podrazumijeva dvosmjerni proces gdje su svi agenti potencijalni pošiljatelji ili primatelji neke informacije. No, postavljaju se pitanja kojim se protokolima služiti kako bi razmijenjene informacije sigurno i na vrijeme stigle na odredište. Bitan je i jezik putem kojeg se agenti sporazumijevaju i razmjenjuju informacije, pogotovo ako je riječ o heterogenim agentima.

U višeagentskom sustavu gdje velik broj agenata donosi odluke u isto vrijeme, veliku nepoznicu svakom od agenata predstavlja pretpostavljanje odluka drugih agenata. Tako djelovanje jednog agenta ovisi o akcijama svih drugih agenata.

Donošenje odluke agenata u višeagentskom sustavu također je predmet već spomenute teorije igara. Teorija pokušava razumjeti i objasniti ponašanje agenata koji su u međusobnoj interakciji i suočeni su s brojnim nesigurnostima. Teorija se zasniva na dvjema pretpostavkama, a to su da su agenti racionalni i da se ponašaju strateški što znači da uzimaju u obzir moguće odluke drugih agenata pri vlastitom odlučivanju.

S obzirom na načine na koje agenti odlučuju o svojim akcijama mogu se razlučiti dvije vrste igara:

The total information received by all the agents of a multi-agent system is distributed according to how the agents perceive the states which differ spatially, temporally or even in the manner of interpretation. Therefore, the state of the environment automatically becomes incompletely measurable from the perspective of each individual agent, which in various ways influences the decision making of the individual agents.

An additional problem is represented by the mixing of data received via sensors. The question arises how to combine the perceptions of individual agents in an optimal manner with the goal of achieving the most complete possible collective perception of the environment.

One more difference between a multi-agent system and a system with only one agent is the decentralization of control. This means that there is no central process that collects data from all the agents and on the basis of these data decides what each agent will do. Such decision making by each agent primarily depends upon the agent alone.

In multi-agent systems, each individual agent should take into consideration the knowledge possessed by other agents when making its own decisions. Therefore, the concept of public knowledge is particularly important, according to which each agent knows some fact and, similarly, each agent knows that every other agent knows that fact etc.

Communication in multi-agent systems is understood to mean a two-directional process where all the agents are potential senders or receivers of some information. However, the question is posed which protocol will be used so that the exchanged information reaches its destination securely and on time. The language with which the agents communicate and exchange information is of importance, particularly concerning heterogeneous agents.

In a multi-agent system where a large number of agents make decisions at the same time, a great unknown for each agent is represented by the assumed decisions made by other agents. Such action by one agent depends upon the actions of all the other agents.

Decision making by an agent in a multi-agent system is also a subject of the previously mentioned game theory. The theory attempts to understand and explain the behavior of agents who are confronted with numerous uncertainties in mutual interaction. The theory is founded upon two assumptions, that the agents are rational and that they behave strategically, which means that they take possible decisions by other agents into account when making their own decisions.

Regarding the ways in which agents decide on their actions, two types of games can be differentiated:

U **strateškim igrama** svaki se agent odlučuje za svoju strategiju na početku igre i potom svi agenti poduzimaju akcije simultano. Ako je pak riječ o **ekstenzivnim igrama** agenti su u mogućnosti ponovno razmisliti o svojim planovima tijekom same igre. Bitno je također kakve su spoznaje pojedinog agenta o aspektima koji uključuju druge agente. Takve spoznaje mogu biti savršene ili nesavršene.

Agenti se odlučuju za pojedine akcije koje formiraju jednu zajedničku akciju na temelju koje svaki agent biva obaviješten o svojoj uspješnosti (ishodu). Ta zajednička akcija se naziva ishodom igre. Iako su funkcije uspješnosti agenata javno poznate, svaki agent nije upoznat s odabirom akcija ostalih agenata. Najviše što može učiniti je pokušati predvidjeti te akcije. Najbolje rješenje za igru je predviđanje ishoda igre temeljeno na pretpostavci da su svi agenti racionalni i razmišljaju strateški.

7 SIMULATORI TRŽIŠTA

Ekonomisti već jako dugo proučavaju strukturu, učinkovitost i razvoj tržišta općenito. Tradicionalni pristupi koriste se matematičkim modelima kao što je teorija igara kako bi odredili ravnotežno stanje dinamičkih ekonomskih sustava. Pri tome se koriste različite vrste simulatora. No, ovakvi pristupi nisu u mogućnosti analizirati mikro interakcije među sudionicima tržišta pogotovo u novonastalim uvjetima kada se mijenja i pristup planiranju EES-a.

Simulatori tržišta, na temelju velikog broja podataka o elektroenergetskom sustavu, troškovima proizvodnje, prijenosnim ograničenjima, tržišnom modelu, stupnju koncentracije i drugim karakteristikama predviđaju stanje na tržištu u određenom vremenskom razdoblju. Ipak simulator nije alat koji je sposoban u potpunosti zamijeniti planera i ne može bez čovjekove intervencije proizvesti tržišnu strategiju. Simulacijom se prvenstveno predviđa ravnotežna cijena na tržištu, no korištenjem prikladnog simulatora mogu se razmatrati i složenija pitanja, primjerice utjecaj restrukturiranja ili širenja tržišta, strateški ciljevi u srednjem i dužem vremenskom razdoblju, ulaz novih proizvodnih kapaciteta na tržište, ograničenja u resursima, problemi vezani uz pouzdanost proizvodnih i prijenosnih kapaciteta, utjecaj bilateralnih ugovora na tržište i slično. Takvi postupci zahtijevaju intenzivnu interakciju čovjeka-planera i simulatora.

Većina simulatora tržišta u osnovi primjenjuje neki od scenarijskih modela u simulaciji tržišta i klasične ekonomske teorije ravnoteže. Pristupi

In **strategic games**, each agent decides upon its strategy at the beginning of the game and then all the agents undertake actions simultaneously. In the case of **extensive games**, agents are able to rethink their plans during the game itself. The kind of knowledge of an individual agent regarding aspects that include other agents is also important. Such knowledge can be perfect or imperfect.

Agents decide on individual actions that form a cooperative action, on the basis of which each agent is informed of its success (result). This cooperative action is called the game result. Although the functions of the success of the agents are publicly known, each agent is not acquainted with the choices of the actions of the other agents. The most it can do is to attempt to predict these actions. The best game solution is to predict the game result based upon the assumption that all the agents are rational and think strategically.

7 MARKET SIMULATORS

Economists have long studied market structure, efficiency and development in general. Traditional approaches use mathematical models such as game theory in order to determine the equilibrium of the dynamics of economic systems. Various types of simulators are used. Nonetheless, such approaches cannot be used to analyze micro interactions among market participants, particularly under the new circumstances when the approach to the planning of power systems is changing.

Market simulators, based upon extensive data on the power system, production costs, transmission limitations, market model, degree of concentration and other characteristics predict the state of the market at a defined time period. Nevertheless, a simulator is not a tool that can replace a planner completely. Without human intervention, it cannot implement market strategy. Simulation primarily permits the prediction of the price equilibrium on the market. However, by using a suitable simulator it is also possible to address more complex questions, such as the influence of market restructuring or expansion, strategic goals in a medium-range and long-range time period, the entry of new production facilities on the market, limitations in resources, problems in connection with the reliability of the capacities of generation and transmission facilities, the impact of bilateral contracts on the market etc. Such approaches require intensive interaction between the human planner and the simulator.

The majority of market simulators basically apply some of the scenario models in the simulation of mar-

su pritom različiti, no prevladava probabilistički model i Monte Carlo simulacija. Takvi ekonomski modeli ipak nisu sposobni stvoriti uvid u strateško ponašanje tržišnih sudionika. Iako jedinstveno po prirodi dobara kojim se trguje, tržište električne energije tu ne odskaače od ostalih tržišta. Konvencionalne metode imaju ograničene sposobnosti uvida u strateško ponašanje tvrtki i imaju tendenciju prevelikog pojednostavlivanja prilika na tržištu i tehničkih karakteristika elektroenergetskog sustava.

Među najuspješnijim simulacijskim metodama danas je korištenje programskih agenata. U simulaciji zasnovanoj na agentima elementi stvarnog tržišta modeliraju se agentima. Dvije su osnovne značajke ovakvih modela – s jedne strane agenti se ponašaju autonomno i pokušavaju ostvariti cilj, a s druge strane agenti mogu međusobno komunicirati. Svaki agent pritom ima vlastite, specifične, strateške i operativne ciljeve.

Kako bi višeagentski simulacijski sustav prikladan za ekonomsko modeliranje bio uspješan, mora podržavati sljedeće [10]:

- komunikaciju među agentima, na način da agenti zadrže svoju autonomiju, informacije mogu biti dostupne samo ciljanim skupinama agenata, u skladu s tržišnim pravilima,
- upravljanje konfiguracijom i izvođenjem agenata,
- praćenje aktivnosti agenta,
- upravljanje modelom i konzistentnost podataka,
- podršku za različite vremenske korake u simulacijama,
- zajedničke servise za agente (pojedini aspekti simuliranog svijeta pojavljuju se u više agenata istodobno i na neki su način dijeljeni, pa zato mogu biti dostupni kao usluge sustava. Ovo nije nužan uvjet, no doprinosi softverskoj učinkovitosti ovakvih modela).

Kod primjene na simulaciju tržišta električne energije redovito se koriste okruženja za razvoj višeagentskih sustava, ali agenti i njihova unutrašnja arhitektura razvijaju se posebno za tu primjenu. Posebno su zanimljivi adaptivni agenti.

Adaptivni agenti sposobni su za inovaciju, razvoj uzoraka ponašanja koji nisu unaprijed programirani, nasuprot učenju samo na iskustvenoj bazi gdje se isključivo na osnovi doživljenih iskustava odabire postupak koji daje optimalan rezultat. Adaptivni agenti svojim postupcima mogu utjecati na okolinu, i time praktički provoditi eksperimente i zaključivati iz njih. S obzirom na prilično zahtjevne zadane uloge modeliranja ljudskog ponašanja,

kets and the classical theory of economic equilibrium. The approaches differ but the probability model and Monte Carlo simulation predominate. Such economic models are nevertheless incapable of providing insight into the strategic behavior of market participants. Although unique in terms of the nature of the goods that are traded, electrical energy markets do not differ from other markets in this respect. Conventional methods have limited capabilities of insight into the strategic behavior of companies and have a tendency to oversimplify the conditions on the market and the technical characteristics of a power system.

Among the most successful simulation methods used today are program agents. In agent-based simulation, elements of the real market are modeled with agents. There are two fundamental characteristics of such models: from the one side, the agents act autonomously and attempt to achieve the goal and from the other side, the agents can communicate among themselves. Each agent has its own specific, strategic and operative goals.

In order for a multi-agent simulation system suitable for economic modeling to be successful, it must support the following [10]:

- communication among the agents, in such a manner that the agents retain their autonomy; information is only available to target groups of agents, according to market rules,
- configuration control and agent performance,
- monitoring agent actions,
- model control and data consistency,
- support for various time steps in simulations,
- ancillary services for agents (individual aspects of the simulated world occur in several agents simultaneously and are distributed in some manner, and therefore can be available as system services. This is not an essential condition but contributes to the software performance of such models).

In an application for the simulation of electrical energy markets, environments for the development of multi-agent systems are regularly used but the agents and their internal architecture are developed especially for this application. Adaptive agents are particularly interesting.

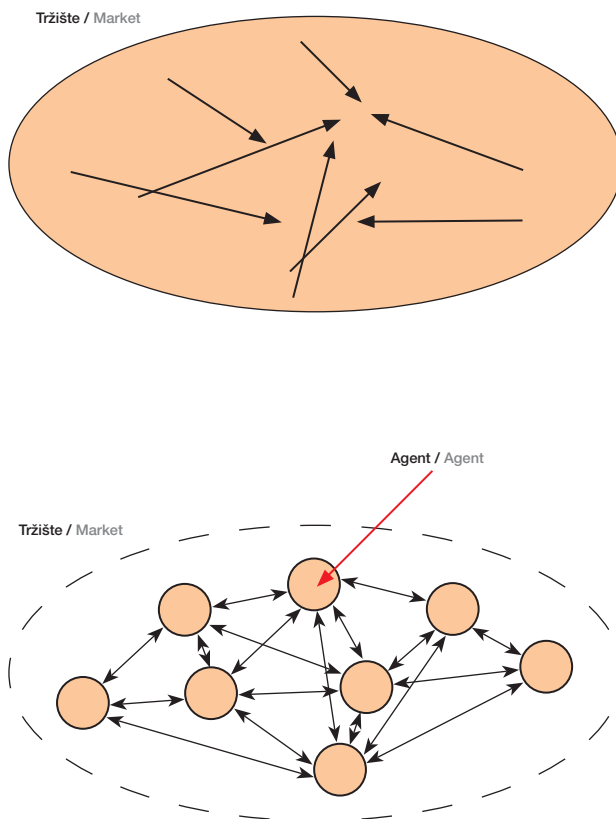
Adaptive agents are capable of innovation, the development of behavior models that are not programmed in advance, as opposed to learning solely on the basis of experience where an approach is chosen exclusively based upon experiences that provide an optimal result. Adaptive agents can influence the environment with their behavior and thereby practically conduct experiments and draw conclusions from them. Taking into account the fairly demanding given roles for the modeling of hu-

očito je da agenti uključuju algoritamske tehnike poznate iz strojnog učenja, robotike i pretraživanja informacija.

Kako se jasnije vidi sa slika 8 i 9, bitna je razlika između klasičnih simulatorskih modela i simulacijskih modela temeljenih na višeagentskim sustavima u njihovom pogledu na tržište, odnosno u njihovom shvaćanju pojma tržišta.

man behavior, it is evident that the agents include algorithm techniques known from machine learning, robotics and information searches.

As seen more clearly from Figures 8 and 9, there is a significant difference between classical simulator models and simulator models based upon multi-agent systems in their view of the markets, i.e. in their understanding of the concept of a market.



Slika 8
Tržište električne energije iz perspektive klasičnih simulatorskih sustava baziranih na matematičkim modelima tržišta
Figure 8
Electrical energy market from the perspective of classical simulator systems based on mathematical market models

Slika 9
Tržište električne energije iz perspektive višeagentskog sustava
Figure 9
Electrical energy market from the perspective of a multi-agent system

Klasični simulatorski modeli zasnovani na matematičkom modelu promatraju tržište kao cjelinu unutar koje se svi procesi odvijaju po nekom određenom zakonu. No, korištenje višeagentskih sustava omogućilo je usmjeravanje pažnje i fokusiranje na same sudionike tržišta. Tako je svaki sudionik predstavljen jednim agentom, a interakcijom među agentima posredno se simuliraju tržišne aktivnosti (kao u stvarnom životu).

Classical simulator models based on a mathematical model perceive the market as a whole, within which all the processes take place according to a determined law. However, the use of multi-agent systems makes it possible to focus attention on the market participants themselves. Thus, each participant is represented by an agent and the interaction among the agents indirectly simulates market activities (as in real life).

8 PRIMJENA VIŠEAGENTSКИH SUSTAVA ZA POTREBE SIMULIRANJA TRŽIŠTA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Zbog trenutačno intenzivnih procesa liberalizacije i deregulacije, sasvim je neizvjesna buduća poslovna struktura industrije električne energije i tržišta električnom energijom. Stoga se na brojne načine pokušava što točnije predvidjeti buduće stanje na elektroenergetskom sektoru kako bi bilo moguće na vrijeme donijeti neke važne strateške odluke.

Trenutačna predviđanja mogućih novih poslovnih struktura uglavnom se zasnivaju na predviđanju određenih budućih scenarija. Proučavanje takvih scenarija, odnosno različitih ustrojstava tržišta električne energije, pruža zauzvrat mogućnost utvrđivanja ispravnih strateških kapitalnih investicija u određena tržišne sektore.

Velika mana ovakvog pristupa kojim se proučavaju različiti scenariji pri donošenju optimalnih odluka jeste potpuna ovisnost o stvarnoj vjerojatnosti pojavljivanja baš tog određenog promatranog scenarija ili neke promatrane familije pretpostavljenih scenarija.

Dakle, donošenje ispravnih strateških odluka temelji se na točnosti predviđanja budućih poslovnih struktura na kojima će se zasnivati model tržišta električne energije. Upravo zbog takvog načina donošenja odluka ovaj se pristup može nazvati pristupom od gore prema dolje (engl. *top-down approach*).

Za razliku od pristupa od gore prema dolje, postoji i razvija se alternativni pristup od dolje prema gore (engl. *bottom-up approach*). Ovakav pristup proučavanja tržišnih strategija nije utemeljen na predviđanjima raznih scenarija. Naprotiv, glavni temelji bottom-up pristupa su fizikalni zakoni koji vrijede za tok električne energije te cijena i dostupnost raznih mogućih tehnoloških ili ekonomskih rješenja.

Upravo u ovakvom načinu određivanja ispravnih strateških poteza veliku pomoć predstavljaju agenti i višeagentski sustavi. Naime, autonomni i adaptivni agenti mogu na vrlo učinkovit način predstaviti različite sudionike tržišta električne energije, ali isto tako i načine na koje ti sudionici međusobno djeluju (kooperacija, konkurencija, nadređenost, podređenost, nezavisnost itd.).

Evolucijom agenata kroz izvršavanje brojnih eksperimenata u simulacijama trebale bi se pokazati moguće konfiguracije tržišta i industrije električne

8 THE APPLICATION OF MULTI-AGENT SYSTEMS FOR THE PURPOSES OF SIMULATING THE ELECTRICAL ENERGY MARKET

Due to the current intensive processes of liberalization and deregulation, the future business structure of the electricity industry and the electricity market is completely uncertain. Therefore, numerous varied attempts are made to forecast the future state of the electricity sector as precisely as possible in order to make some important strategic decisions in time.

The currently anticipated possible new business structures are generally based upon the forecast of certain future scenarios. Studying these scenarios, i.e. various structures of the electricity markets, makes it possible to determine correct strategic capital investments within specific market sectors.

A major shortcoming of such an approach in which various scenarios are studied in making optimal decisions is the complete dependence upon the actual probability of the occurrence of precisely that specific scenario studied or a family of proposed scenarios.

Therefore, making correct strategic decisions is based upon the precision of the predicted future business structures upon which the model of the electricity market will be established. Due to this manner of decision making, this approach can be called the top-down approach.

Unlike the top-down approach, an alternative approach exists and is being developed, the bottom-up approach. Such an approach to studying market strategies is not based upon various predicted scenarios. On the contrary, the main foundations of the bottom-up approach are physical laws that apply electrical energy flow as well as the cost and availability of various possible technological or economic solutions.

It is precisely in such a manner for determining the correct strategic moves that great assistance is provided by agents and multi-agent systems. Autonomous and adaptive agents can provide highly effective representation for various participants in the electricity market and can also represent the ways in which these participants act together (cooperation, competition, dominance, subordination, independence etc.).

Through the evolution of agents by conducting numerous experiments in simulations, it should be feasible to demonstrate the possible configurations of the electricity market and industry, depending

energije i to u ovisnosti o stupnju kooperacije, kompetitivnosti i regulacije.

Osnovni cilj razvoja ovakvog pristupa i modela jest pomoći pojedinačnim tržišnim sudionicima pri odlučivanju o uvođenju novih poslovnih strategija, a koje se tiču internih reorganizacija samih sudionika kao i njihova mogućeg ulaska u nova partnerstva ili mogućeg prodora u neke nove dijelove tržišta. Isto tako je moguće kroz računalne simulacije ovog modela dobiti uvid u razvoj i evoluciju energetskog sektora kao cjeline.

8.1 Uloge agenata

Agenti dakle trebaju igrati uloge stvarnih tržišnih sudionika pa tako svaki od njih mora imati posebne specifikacije i vlastite ciljeve. Što je preciznije definirana zadaća i metode razmišljanja pojedinog agenta, on je bliži stvarnom sudioniku, ali zato i mnogo kompleksniji. Za potrebe simulacije tržišta električne energije u potpuno liberaliziranim uvjetima sasvim sigurno su potrebni sljedeći agenti [11]:

- ekonomski agent (fiktivni agent),
- agent proizvođač,
- agent potrošač,
- agent za informacije iz okruženja (fiktivni agent),
- agent trgovac,
- agent opskrbljivač,
- agent regulator,
- agent operator tržišta.

8.1.1. Ekonomski agent

Ekonomski agent prevodi različite podatke, poput ekonomskih faktora, godišnjeg doba, vremenskih uvjeta u varijable energetske potražnje. Te se vrijednosti potražnje potom šalju agentu za informacije iz okruženja.

8.1.2 Agent proizvođač

Agenti koji predstavljaju proizvođače električne energije brinu se za proizvodnju dovoljne količine električne energije za potrebe krajnjih potrošača. No, primarni cilj ovakvih agenata je ostvarivanje što većeg profita (tržišno su orijentirani). Ovisno o kojoj vrsti proizvođača je riječ, (nuklearna, hidro, termo ili neka druga elektrana), tj. ovisno o marginalnim troškovima proizvodnje i samim uvjetima vezanim uz proizvodnju električne energije, agenti proizvođači pokušavaju na optimalan način plasirati svoju proizvodnju na tržište. Pri tome svaki agent mora dobro predvidjeti poteze drugog agenta proizvođača. Ovim načinom je ostvarena konkurencija i kompetitivnost u proizvodnom sektoru.

upon the degree of cooperation, competition and regulation.

The basic goal of the development of such an approach and model is to help individual market players decide on the introduction of new business strategies, regarding internal reorganization of the participants themselves as well as their eventual entry into new partnerships or penetration into some new parts of the market. Similarly, through the computer simulation of this model, it is possible to obtain insight into the development and evolution of the energy sector as a whole.

8.1 The roles of agents

Thus, agents must play the roles of actual market participants and each of them must have particular specifications and its own goals. The more precisely defined the task and methods of thinking of an individual agent, the closer the agent is to an actual participant but also much more complex. For the purposes of simulating the electrical energy market under completely liberalized conditions, the following agents are certainly necessary [11]:

- economy agent (fictive agent),
- generator agent,
- consumer agent,
- information environment agent (fictive agent),
- retailer agent,
- delivery agent,
- regulator agent,
- market operator agent.

8.1.1. Economy agent

The economy agent translates various data, such as economic factors, season of the year and weather conditions into energy demand variables. These demand values are then sent to the information environment agent.

8.1.2 Generator agent

Agents that represent generators (producers) of electrical energy are concerned that sufficient energy is produced for the needs of the final consumers. However, the primary goal of such agents is to achieve maximum profits, since they are market oriented. Depending on the type of generator (nuclear, hydro, thermo or some other type of power plant), i.e. depending on the marginal production costs and the conditions connected with the generation of electrical energy, generator agents attempt to place their production on the market in an optimal manner. Each agent must anticipate the moves of the other generator agents well. In this manner, competition and competitiveness are achieved in the generation sector.

8.1.3 Agent potrošač

Agenti potrošači ne predstavljaju svakog pojedinačnog potrošača već određene grupe ili klase potrošača poput kućanstava, industrije ili privatnog sektora. Svaki agent kupuje određenu količinu energije i mijenja udio energije na tržištu ovisno o cijeni, potrebi, elastičnosti potražnje i osjetljivosti cijena. Energetska učinkovitost također se uzima u obzir.

8.1.4 Agent za informacije iz okruženja

Ovakav agent predstavlja neku vrstu oglasne ploče, jer sadrži sve dostupne informacije o svim sudionicima tržišta. Može se predočiti kao posrednik kojem tržišni sudionici daju informacije u vezi sa svojim trenutnim radnjama i traže informacije kako bi procijenili svoje buduće poteze. Osim komunikacijske važnosti vrši i sakupljanje podataka od tržišnih sudionika pružajući tako jasne i transparentne podatke.

8.1.5 Agent trgovac

Glavne unutarnje funkcije agenata trgovaca su:

- nadziranje vlastitog djelovanja u smislu profitabilnosti, kao i kretanja udjela na tržištu,
- traženje optimalne kombinacije odluka kako bi postigao bolje rezultate,
- unaprjeđenje učinkovitosti vođenja posla.

Glavni cilj ovakvog agenta jest postizanje maksimalnog profita ne ugrožavajući pri tome sigurnost opskrbe potrošača. Izrazito važna funkcija koju posjeduje agent trgovac je strateško planiranje. Kako bi to ostvarili, ovi agenti posjeduju unutarnje funkcije za simuliranje tržišta i predviđanje poteza drugih sudionika na tržištu. To je postupak simulacije unutar simulacije, te se temelji na svom znanju o ponašanju ostalih sudionika koje agent posjeduje. Kako bi predvidio buduću potrošnju, a samim time i cijenu (što je još važnije) agent ovog tipa ponekad koristi neuronske mreže. Isto tako koristi evolucijsku računsku simulaciju kako bi planirao budućnost i izveo optimalnu strategiju za širenje posla i određivanje cijena.

8.1.6 Agent opskrbljivač

Njihove su zadaće širenje mreže kroz područje kako bi omogućili opskrbu novih potrošača, na zahtjev agenata trgovaca. Širenje mreže vrši se pomoću funkcija kojima se optimizira put i profit, što je također moguće u GIS platformama. Agent ovog tipa ima vlastitu logiku i poput agenta trgovca, teži k maksimizaciji profita (sigurnost opskrbe potrošača električne energije nije pri tome upitna). Svojim akcijama agenti opskrbljivači potiču

8.1.3 Consumer agent

Consumer agents do not represent each individual consumer but rather groups or classes of consumers such as residential, commercial or the private sector. Each agent purchases a specific quantity of energy, which changes the market share of energy according to prices, requirements, elasticity of demand and price sensitivity. Energy efficiency is also taken into account.

8.1.4 Information environment agent

This agent represents a type of bulletin board because it contains all the available information on all the market participants. It can be seen as an intermediary via which the market participants provide information in connection with their current actions and request information in order for them to evaluate their future moves. In addition to communication importance, it also compiles data from market participants and thus provides clear and transparent information.

8.1.5 Retailer agent

The chief internal functions of a retailer agent are as follows:

- monitoring its own performance in the sense of profitability, as well as market share movement,
- finding optimal decision combinations in order to improve performance,
- improving management efficiency.

The main goal of such an agent is to achieve maximum profit without endangering the reliability of the consumer supply. A particularly important function of the retailer agent is strategic planning. In order to achieve this, these agents possess an internal function for market simulation and predicting the moves of other market participants. This is a simulation inside the simulation process, based upon the agent's knowledge of the behavior of the other participants. In order to predict future consumption, and thereby the price (which is more important), this type of agent sometimes uses neural networks. Similarly, the agent also uses evolutionary computer simulation in order to plan the future and derive an optimal strategy for the expansion of business and determination of prices.

8.1.6 Delivery agent

The task of a delivery agent is to extend the networks over the territory in order to facilitate supply to new consumers, at the request of retail agents. Expansion of the network is performed using functions that optimize paths and profits, which is also possible in GIS platforms. An agent of this type has a logic of its own and like a retailer agent seeks to maximize profits (the reliability of the supply to electricity consum-

natjecateljsko ponašanje na tržištu budući da omogućavaju širok izbor različitih ponuda krajnjim potrošačima za čiju se naklonost bore.

8.1.7 Agent regulator

Agent regulator postavlja različita ograničenja za vrijeme odvijanja simulacije poput ograničavanja vremena između uzastopnog mijenjanja cijena energije ili postavljanja vršne cijene za energiju čime štiti krajnje potrošače od neopravdano visokih cijena.

8.1.8 Agent operator tržišta

Agent operator tržišta određuje cijene na tržištu, ovisno o kojoj je organizaciji tržišta riječ (tržište za dan unaprijed, spot tržište i dr.). On zapravo preuzima ulogu burze električne energije jer pokušava predvidjeti potrošnju, traži ponude i ima mogućnost prihvatiti te ponude.

8.2 Osnovni i sintetski agenti

Ovisno o području djelovanja mogu se razlikovati dvije vrste agenata potrebne za opis elektroenergetskog sektora a to su [12]:

- osnovni agenti,
- sintetski agenti.

Osnovni agenti su elementarni agenti opisani skupom statičkih i dinamičkih parametara kao i s nekim posebnim sposobnostima vezanim uz proračune, komunikaciju i razumijevanje na temelju svog znanja.

Sintetski agent je agent nastao kombinacijom nekih osnovnih agenata koji djeluju pod njegovom kontrolom i to prema specificiranim strategijama.

Skup osnovnih agenata uključuje:

- potrošača, *C*,
- proizvođača, *G*,
- operatora prijenosnog sustava, *O*,
- operatora distribucijskog sustava, *D*,
- operatora tržišta, *M*,
- veletrgovca električne energije, *W*,
- trgovca, *R*,
- regulatorno tijelo, *T*.

Kako bi se mogle opisati i uzeti u obzir situacije kada jedan te isti tržišni sudionik ima više funkcija (npr. ako je jedan tržišni subjekt istodobno i operator distribucijskog sustava i trgovac električnom energijom) koriste se sintetski agenti. Sintetski agenti se sastoje od osnovnih agenata i koordiniraju akcijama svojih komponenti koje su usmjerene

ers is not in question). The action of these agents stimulates competitive behavior on the market since it makes a wide choice of various offers available to the final customers, for whose favor they compete.

8.1.7 Regulatory agent

The regulatory agent imposes various restrictions during the simulation such as restrictions on the duration between successive movements in energy prices or imposing price-caps for energy, thereby protecting the final consumers from unjustifiably high prices.

8.1.8 Market operator agent

The market operator agent determines the prices on the market, depending on the type of market organization (day-ahead market, spot market etc.). It actually assumes the role of a wholesale electricity market because it attempts to predict consumption, find offers and has the capability of accepting these offers.

8.2 Basic and synthetic agents

Depending on the area of action, it is possible to distinguish two types of agents needed for the description of the energy sector, as follows [12]:

- basic agents,
- synthetic agents.

Basic agents are elementary agents described by a set of static and dynamic parameters, with some special abilities connected with computation, communication and reasoning on the basis of their knowledge.

A synthetic agent is formed from a combination of several basic agents that act under its control according to specified strategies.

The set of basic agents includes the following:

- consumer, *C*,
- generator, *G*,
- transmission system operator, *O*,
- distribution system operator, *D*,
- market operator, *M*,
- trader/broker or wholesaler, *W*,
- retailer, *R*,
- regulatory body, *T*.

In order to be able to describe and take into consideration a situation when one of these market subjects has several functions (e.g., if one market subject is simultaneously the distribution system operator and the electricity retailer), synthetic agents are used. Synthetic agents consist of basic agents and coordinate the actions of all their com-

k nekom specifičnom cilju, a odvijaju se u skladu s nekom strategijom. Ipak interni, osnovni agenti ostaju samostalni u pogledu vlastitih posebnosti i sposobnosti.

Sintetski agenti samo vrše interakciju sa svojim sastavnim osnovnim agentima ili s drugim kombiniranim agentima, ali ne i sa svim drugim osnovnim agentima. Ukoliko se udružuje više agenata iste klase nastaje posebna vrsta sintetskog agenta koja se predočava kao jedan član.

Postoji, dakle, skup od osam osnovnih agenata:

$$A^b = \{C, O, D, M, W, R, T\}. \quad (8)$$

Uzimajući u obzir da je uloga regulatora isključiva, tj. da jedan agent može predstavljati regulatorno tijelo i ništa drugo, preostaje sedam ostalih osnovnih agenata pomoću kojih se mogu tvoriti sintetski agenti. Taj skup je sljedeći:

$$A^{bs} = \{C, G, O, D, M, W, R\}. \quad (9)$$

Tako je ukupan broj različitih sintetskih agenata jednak:

$$2^{|A^{bs}|} - 1 - |A^{bs}| = 2^7 - 8 = 120. \quad (10)$$

Takvi sintetski agenti su sintetski agenti prvog stupnja. Međusobnom sintezom sintetskih agenata prvog stupnja nastaju sintetski agenti drugog stupnja. Hibridni sintetski agenti nastaju sintezom sintetskih agenata prvog i drugog stupnja.

Tradicionalno, struktura EES-a bila je vertikalno integrirana tako da su se svi procesi od proizvodnje, prijenosa i distribucije električne energije odvijali unutar iste kompanije. Mana ovakvog sustava je mogućnost prebacivanja čitavog rizika (npr. rizik od preinvestiranosti u kapacitete EES-a) na potrošače.

Na slici 10 nalazi se osnovni model EES-a koji se sastoji od agenata i njihove međusobne interakcije prikazane njihovim shemama i komunikacijom.

ponents that are oriented toward a specified goal and according to specific strategies. Nonetheless, internal basic agents remain independent in respect to their own attributes and abilities.

Synthetic agents only interact with their component basic agents or other synthetic agents but not with all other basic agents. If several agents of the same class become associated, a special type of synthetic agent occurs that is represented by a singleton.

Therefore, the set of eight basic agents is as follows:

Taking into account that the role of the regulator is exclusive, i.e. that an agent can represent a regulatory body and nothing else, seven basic agents remain, with which it is possible to create synthetic agents. This set is as follows:

Thus, the total number of various synthetic agents equals the following:

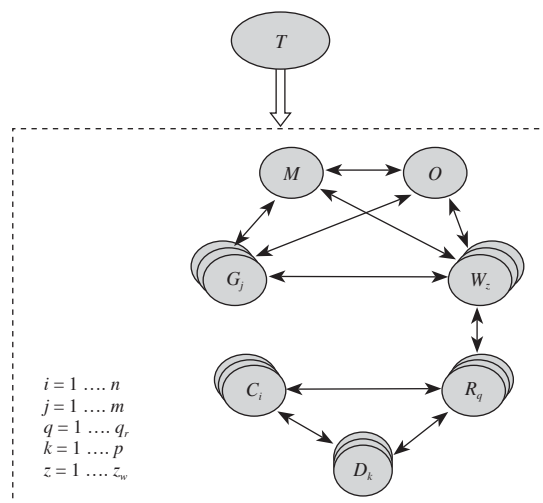
Such combined agents are degree 1 synthetic agents. Through mutual synthesis of degree 1 synthetic agents, degree 2 agents are formed. Hybrid synthetic agents are formed through the synthesis of degree 1 and degree 2 synthetic agents.

Traditionally, the power system structure was vertically integrated so that all the processes of the generation, transmission and distribution of electricity occurred within the same company. A shortcoming of this system is the possibility of passing on the entire risk (e.g., the risk of overinvestment in power system capacities) to the consumers.

Figure 10 is a basic model of a power system that consists of agents and their mutual interactions, represented by their schemes and communication.

Osnovni model postavlja okvire za izgradnju specifičnih modela elektroenergetskog sustava. Tržišni model je podmodel elektroenergetskog modela i odnosi se na transakcije vezane uz električnu energiju kao i na komercijalne aktivnosti na tržištu. Model uključuje agente i njihovu međusobnu interakciju. Glavni elementi tržišta su sudionici tržišta, teritorij, tržišna pravila, transakcije, proizvodi/usluge te fizičko ili virtualno okruženje.

The basic model establishes frameworks for the construction of specific energy system models. The market model is a sub-model of the electricity model and refers to transactions in connection with electricity such as commercial activities on the market. The model includes agents and their mutual interaction. The main market elements are market participants, territory, market rules, transactions, products/services, and physical or virtual environment.



Slika 10
Osnovni model EES-a prikazan agentima i njihovom međusobnom interakcijom
Figure 10
Basic model of a power system presented via agents and their mutual interaction

U okviru modela, operator sustava, operator tržišta, proizvođači i veletrgovci međusobno vrše interakciju kao osnovni agenti na razini trgovine električnom energijom na veliko (od srednjeg k višem naponu). Istodobno su operatori distribucijskih sustava, trgovci i potrošači u sličnoj interakciji, ali na razinama napona od nižeg prema srednjem. Trgovci kupuju električnu energiju od veletrgovaca, a krajnji potrošači kupuju pak energiju od trgovaca.

Within the framework of the model, the system operator, market operator, generators and wholesalers engage in mutual interactions as basic agents on the wholesale level of electricity commerce (medium to high voltage). At the same time, the distribution system operators, retailers and consumers are engaged in similar interaction but at the level of low to medium voltage. The retailers purchase electricity from the wholesalers, and the final consumers purchase energy from the retailers.

Sintetski agent se stvara recimo u trenutku kada krajnji potrošač želi kupiti električnu energiju na tržištu, tj. od veletrgovca i riječ je o $\{C,R\}$ sintetskom agentu (potrošač i trgovac).

A synthetic agent is created, let us say, at the moment when the final consumer wants to buy electricity on the market, i.e. directly from the wholesaler, a $\{C,R\}$ synthetic agent (consumer and retailer).

Moguća je i situacija da potrošač (ukoliko mu je dovoljno velika potrošnja) kupuje električnu energiju direktno od proizvođača. Tada je riječ o $\{C,R,W\}$ sintetskom agentu. Na analogan način se modeliraju svi drugi multi-funkcionalni agenti unutar zadane arhitekture.

A possible situation is that the consumer (if the consumer has sufficiently high consumption) purchases electricity directly from the generator. This is a $\{C,R,W\}$ synthetic agent. All the other multi-functional agents within a given architecture are modeled in an analogous manner.

9 TRENUTAČNO DOSTUPNI ALATI

Budući da proučavanje agenata spada u relativno mladu znanstvenu disciplinu, na tržištu nije prisutan velik broj agentski zasnovanih aplikacija kojima bi se moglo simulirati tržište električne energije. Ali to područje je interesna zona brojnih istraživanja i učinjeni su značajni pomaci. Cilj ovakvih alata jest opremiti sudionike tržišta moćnim pomoćnim sredstvom pri donošenju važnih, strateških odluka.

Između svih simulatora tržišta električne energije zasnovanih na višeagentskom sustavu, daleko je najnapredniji i najrazvijeniji EMCAS.

9.1 EMCAS simulacijski model

Za razliku od konvencionalnih metoda i alata za analizu elektroenergetskog sektora, EMCAS (engl. *Electricity Market Complex Adaptive System*) sustav ne zasniva se na modelu unutar kojeg samo jedan subjekt donosi odluke i u kojem postoje jedinstveni ciljevi za čitav sustav. Naprotiv, agenti, koje ovaj sustav podržava, imaju svoje vlastite ciljeve i vlastite načine donošenja odluka (decentralizirano razmišljanje) [13]. Koristi se dakle modeliranje i simulacija na razini agenta (sudionika) (ABMS, *Agent Based Modeling and Simulation*).

EMCAS je razvijen od strane CEEESA (engl. *Argonne's Center for Energy, Environmental and Economic, & Systems Analysis*) [14]. Unutar složenog adaptivnog sustava (CAS, *Complex Adaptive System*), simuliraju se agenti koji uče na temelju njihovih prošlih iskustava (znanje) i sposobni su promijeniti vlastito ponašanje ovisno o novonastalim prilikama (inteligencija).

Tako agenti mogu stalno prilagođavati svoje strategije ovisno o uspjehu prošlih napora i pokušaja. Inteligencija, odnosno sposobnost učenja dostupna je svakom agentu putem metode genetskih algoritama (engl. *Genetic Algorithms*, GA). Svi agenti imaju vlastite skupove zadataka, načine donošenja odluka i obilježja ponašanja. U samom procesu odlučivanja agenti se mogu osloniti na niz prošlih informacija (prošle cijene električne energije npr.) ali i na neke predviđene podatke (potrošnja za dan unaprijed npr.) (slika 11).

9 CURRENTLY AVAILABLE TOOLS

Since the study of agents belongs to a relatively young scientific discipline, there are not many agent-based applications on the market that can be used to simulate electricity markets. However, this area is an interesting zone for numerous investigations and significant strides have been made. The goal of these tools is to equip market participants with powerful means to help them make important strategic decisions.

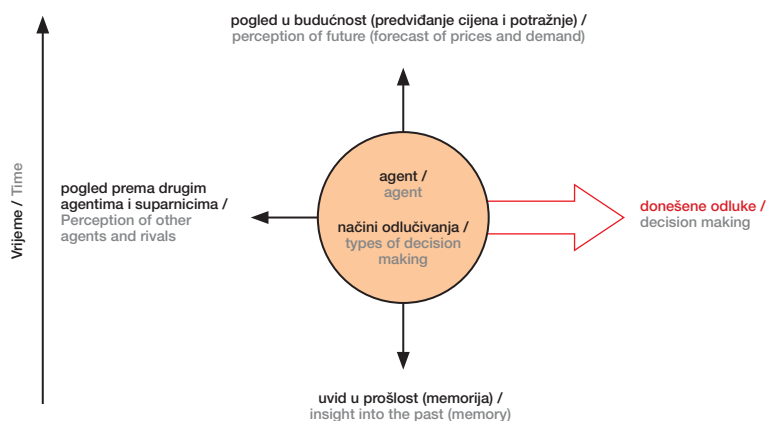
Among all the electricity market simulators based upon the multi-agent system, the most advanced and developed is the EMCAS.

9.1 EMCAS simulation model

Unlike conventional methods and tools for analyzing the electricity sector, the Electricity Market Complex Adaptive System (EMCAS) is not based upon a model in which only one subject makes decisions and in which there is a single goal for the entire system. On the contrary, the agents that this system supports have their own goals and their own ways of making decisions (decentralized decision structures) [13]. Agent-Based Modeling and Simulation (ABMS) are used.

EMCAS was developed by Argonne's Center for Energy, Environmental and Economic Systems Analysis (CEEESA) [14]. Within the Complex Adaptive System (CAS), agents are simulated that learn on the basis of their past experience (knowledge) and are capable of altering their own behavior, depending upon new situations (intelligence).

Thus, agents can constantly adapt their strategies, depending on the success of past efforts and attempts. Intelligence, i.e. the ability to learn, is available to every agent via the method of Genetic Algorithms (GA). All agents have their own sets of tasks, manner of decision making and characteristic behavior. In the decision making process, agents can rely on a series of past data (e.g., past electricity prices) but also on some predicted data, e.g., next-day consumption (Figure 11).



Slika 11
Način donošenja odluka
agenta u EMCAS sustavu
Figure 11
Decision making by an
agent in the EMCAS

S ovakvim pristupom orijentiranim na agente, EMCAS je posebno dizajniran za simulaciju višeaentskih tržišta te omogućuje korištenje i analizu regulatornih struktura prije no što se krenu koristiti u stvarnom okruženju.

EMCAS provodi simulacije kroz šest slojeva odlučivanja prema vremenskim razdobljima koja idu od jednog sata do dugoročnog planiranja. Na svakom sloju planiranja agenti donose skup odluka kao npr. određivanje potrošnje (agenti koji predstavljaju potrošače), vozni red elektrana (proizvođači), bilateralni ugovori (proizvođači i opskrbljivači) i raspored rada (vozni red) elektrana (operator sustava). Agenti zatim primjenjuju vlastita pravila odlučivanja te ocjenjuju koliko dobro ta pravila ispunjavaju njihove ciljeve.

Model uključuje velik broj različitih agenata s različitim zadaćama (različitih sudionika tržišta električne energije) kako bi se što bolje prikazala i dočarala kompleksnost i heterogenost sudionika tržišta. Dostupni su agenti koji predstavljaju proizvodne tvrtke (GenCos), prijenosne tvrtke (TransCos), distribucijske tvrtke (DistCos), nezavisni operatori sustava (ISOs) ili organizatori regionalnog prijenosa (RTOs), tvrtke opskrbljivači (DemCos), potrošači i regulatori. Ovi agenti su visoko specijalizirani kako bi obavljali različite zadatke, a kako bi se omogućila takva specijalizacija agenti posjeduju detaljizirana pravila. Isto tako korisnik (analizator) može definirati nova pravila i strategije te promotriti posljedice tih novih strategija na tržišne prilike.

Svaki agent ima svoju djelatnu strategiju putem koje odlučuje o tome kada i kako djelovati te na koje načine odrediti iznos cijene. Ove strategije se mogu mijenjati, dakle nisu statične. Naprotiv,

With such an agent-oriented approach, EMCAS is especially designed for the simulation of multi-agent markets and facilitates the use and analysis of regulatory structures before they are applied in the real environment.

EMCAS performs simulation through six layers of decision making according to time periods that range from one hour to long-term planning. In every planning layer, agents make a set of decisions such as, for example, determining consumption (agents who represent consumers), power plant schedules (generators), bilateral contracts (generators and retailers) and the power plant schedule (system operator). Agents apply their own decision-making rules and assess how well these rules meet their goals.

The model includes a large number of various agents with various tasks (electricity market participants) in order to present and conjure the complexity and heterogeneity of the market participants as well as possible. Agents are available that represent generation companies (GenCos), transmission companies (TransCos), distribution companies (DistCos), independent system operators (ISOs) or regional transmission operators (RTOs), demand companies (DemCos), consumers and regulators. These agents are highly specialized in order to perform various tasks and have detailed rules in order to facilitate such specialization. Similarly the user (analyst) can define new rules and strategies and observe the consequences of these new strategies under market conditions.

Each agent has its own strategy, according to which it decides when and how to act and how to set prices. These strategies can change and are not static. On the contrary, it is desirable for agents to change

želja i jest da agenti mijenjaju svoje strategije na osnovi stečenog znanja i adaptivnih sposobnosti.

U EMCAS simulacijskom modelu, agenti uče o vlastitom tržišnom ponašanju kao i o ponašanjima i akcijama drugih agenata putem dva zasebna načina učenja:

- učenje zasnovano na promatranju,
- učenje zasnovano na istraživanju.

Pod učenjem zasnovanim na promatranju, podrazumijeva se da agenti razmatraju svoja prošla djelovanja i na osnovi uspješnosti tih djelovanja odlučuju o promjeni strategije, njenom zadržavanju ili samo nekim preinakama u strategiji. Učenje temeljeno na istraživanju omogućuje agentima da istražuju i analiziraju moguće tržišne strategije te strategije ponude. Ukoliko agent pronade zadovoljavajuću strategiju on ju počinje primjenjivati te fino podešavati ovisno o novim tržišnim prilikama.

9.2 Interakcijske razine EMCAS modela

Interakcijske razine predstavljaju zapravo multidimenzionalno okruženje unutar kojeg agenti obavljaju svoje djelatnosti. Agenti djeluju unutar nekoliko međusobno povezanih razina, a to su fizikalna razina, nekoliko poslovnih razina te najviša, regulatorna razina (slika 12).

their strategies on the basis of knowledge acquired and adaptive abilities.

In the EMCAS simulation model, the agents learn about their own market behavior as well as the behavior and actions of other agents in two separate types of learning:

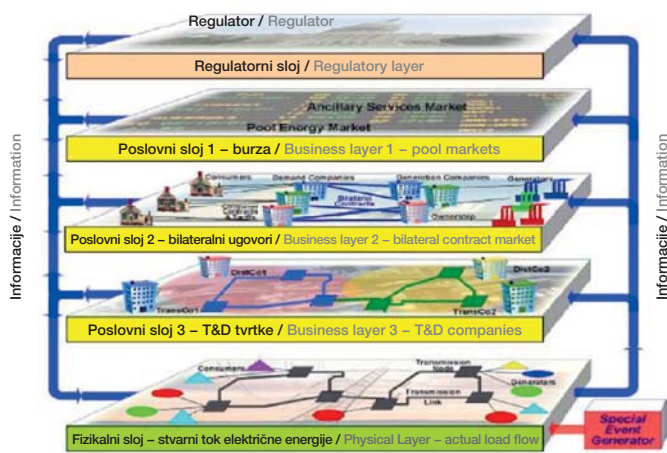
- observation-based learning,
- exploration-based learning.

Under observation-based learning, it is understood that the agents consider their past actions and on the basis of the success of these actions decide upon changing the strategy, retaining it or only making some adjustments. Exploration-based learning allows agents to explore and analyze possible market strategies and supply strategies. If an agent finds a satisfactory strategy, it begins to apply and refine it, depending on the new market conditions.

9.2 Interaction layers of the EMCAS model

Interaction layers actually represent a multidimensional environment within which agents operate. Agents operate within several interconnected layers and these are the physical layer, several business layers and the highest layer, the regulatory layer (Figure 12).

Slika 12
Interakcijske razine u EMCAS sustavu
Figure 12
Interaction layers in the EMCAS



Fizikalna razina sastoji se od agenata koji obuhvaćaju fizičku proizvodnju, prijenos, distribuciju i potrošnju električne energije. Potrošači i proizvođači međusobno povezani prijenosnim vodovima čine fizikalni dio tržišta električnom energijom. Agent koji predstavlja ISO, odnosno RTO u fizikalnoj razini odgovoran je za povezivanje proizvodnje i potrošnje te za prilagođavanje promjena u potrošnji ili proizvodnji.

Physical layers consist of agents, which include the physical generation, transmission, distribution and consumption of electrical energy. Consumers and generators interconnected by transmission lines comprise the physical part of the electricity market. An agent that represents an ISO or RTO in a physical layer is responsible for linking generation and consumption and for adjusting to changes in consumption or generation.

Na slici 12 mogu se vidjeti i tri poslovne razine koji zajedno predstavljaju poslovnu stranu tržišta. Na ovoj razini agenti proizvođači promišljaju o uporabi svojih resursa, agenti opskrbljivači kupuju električnu energiju od agenata proizvođača i prodaju je krajnjim potrošačima.

Agenti opskrbljivači mogu kupovati energiju od proizvođača bilo na burzi, kojom upravlja ISO/RTO, bilo putem bilateralnih ugovora koji se dogovaraju privatno između dva agenta. Razina prijenosnih i distribucijskih tvrtki je dizajnirana kako bi se uzelo u obzir vlasništvo nad tim sustavima kao i potraživanja ovih tvrtki za korištenje njihovih postrojenja.

Regulator je agent koji se nalazi u regulatornoj razini. On postavlja tržišna pravila i nadgleda tržišna zbivanja.

9.3 Mogućnosti simulacijskog modela EMCAS

Sustav je u stanju simulirati tri vrste tržišta, a tu spadaju bilateralni ugovori, burza električne energije i tržište pomoćnih usluga. U globalu bilateralni ugovori se sklapaju između jednog agenta proizvođača i jednog agenta opskrbljivača i mogu biti na bazi jednog sata ili nekoliko godina.

U slučaju trgovine električne energije na burzi, agenti prilažu svoje ponude i potražnje ISO agentu. Postoje dvije vrste formiranja cijene na burzi. U prvom načinu svim se agentima plaća jednaka cijena koja se dobiva iz ukupne potražnje i ponude električne energije. U drugom načinu agentima proizvođačima isporučena energija biva plaćena po ponuđenoj cijeni (engl. *pay as bid*).

U modelu se simuliraju tri tipa pomoćnih tržišta: regulacija, rotirajuća rezerva i dodatna rezerva.

EMCAS omogućava predviđanje cijena električne energije i to počevši od satne pa sve do vremenske razine od nekoliko godina [15]. Na taj način može se analizirati bilo kratkoročna bilo dugoročna pozicija sudionika na tržištu. Tako je EMCAS alat koji pomaže pri upravljanju rizicima i određivanju optimalne strategije tržišnog nastupa. Pri tome je posebna pažnja posvećena proizvođačima električne energije kao sudionicima koji svojim strateškim odlukama i potezima mogu ispitivati vlastitu tržišnu moć (fizičko i ekonomsko suzdržavanje).

Dodatna mogućnost EMCAS-a jest dugoročno planiranje za nekoliko godina. Decentraliziranim odlukama pojedinačni agenti na temelju svojih internih ciljeva planiraju izgradnju novih proizvodnih kapaciteta. Proizvođač električne energije na temelju svoje trenutne tržišne pozicije, sklonosti riziku i poslovnih ciljeva može ispitati i rangirati

Figure 12 shows three business layers that together represent the business side of the market. At this level, generator company agents decide upon the use of their resources and demand company agents purchase electricity from generator company agents and sell it to the final consumers.

Demand company agents can purchase energy from generators either on a market administered by an ISO/RTO or via bilateral contracts that are entered privately between two agents. The layer of the transmission and distribution companies is designed to take the ownership of these systems into account as well as the demand for the use of their facilities.

The regulator is the agent in the regulatory layer. It sets the market rules and monitors market events.

9.3 EMCAS Model Simulation

The system can simulate three types of markets, including bilateral contract, pool energy and ancillary services. Generally, bilateral contracts are entered between a single generator company agent and a single demand company agent, and can be based upon one hour or several years.

In the case of the pool energy market, agents submit their buy and sell bids to the ISO agent. There are two types of price formation on the pool energy market. In the first type, all the agents are paid the same price, which is obtained from the total electricity supply and demand. In the second type, generator company agents delivers energy at the price that it bids, known as Pay-as-Bid.

In the model, three ancillary services markets are simulated: regulation, spinning reserve and replacement reserve markets.

EMCAS facilitates the forecasting of electricity prices, ranging from hours to several years [15]. In this manner, it is possible to analyze both short-term and long-term participant positions on the market. Thus, EMCAS is a useful tool in risk management and determining optimal strategies for market performance. Particular attention is devoted to generators of electricity as participants who with their strategic decisions and moves can explore their own market power (physical and economic withholding).

An additional possibility of the EMCAS is long-term planning for several years. Through decentralized decisions, individual agents plan the construction of new production facilities based upon their internal goals. An electricity generator company can review and rank the available production options based upon its current market position, risk profile

dostupne opcije proizvodnje kojim bi eventualno proširio svoje proizvodne kapacitete.

10 ZAKLJUČAK

Nakon svega navedenog, može se gotovo sa sigurnošću ustvrditi da su klasični simulacijski modeli tržišta električne energije, temeljeni na matematičkim modelima, našli i više nego dostojnu zamjenu i da moraju svoje mjesto prepustiti novoj snažnoj i obećavajućoj metodi temeljenoj na višeagentskom modelu tržišta. Takvim pristupom moguće je u simulaciji predstavljati i promatrati svakog tržišnog pojedinca i za svakog od njih pronaći optimalnu tržišnu strategiju.

Kao i svaki drugi simulacijski model i ovaj zasnovan na agentima donosit će to bolje rezultate što je detaljnije i preciznije prikazano stanje realnog promatranog tržišta. Naime svako tržište ima svoje specifičnosti po kojima se razlikuje od drugih, bilo da je riječ o veličini tržišta, udjelu električne energije dobivene iz različitih izvora ili pak zakonskim regulativima. Onaj tržišni sudionik koji bude posjedovao kvalitetniji simulacijski model koji je primjereno prilagođen spomenutim specifičnostima, sasvim sigurno će biti u velikoj prednosti pred ostalom tržišnom konkurencijom.

and business goals, according to which it could eventually expand its generating capacities.

10 CONCLUSION

In light of that which has been presented, it can be said that classical simulation models for electricity markets, based upon mathematical models, now have a more than suitable replacement and they must relinquish their place to the new, powerful and promising methods based upon the multi-agent market model. With this approach, it is possible to present and review every individual market participant in simulation and find the optimal market strategy for each one.

As with every other simulation model, the quality of the results provided by this agent-based model will depend upon the degree of detail and precision of the presentation of the real state of the investigated market. Each market has its own specific characteristics that differentiate it from others, whether concerning the market size, percentage of electricity obtained from various sources or legal regulations. The market player in possession of a quality simulation model adapted to these specificities will certainly have an advantage over market competition.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] SAMUELSON, P. A., NORDHAUS, W.D., Economics, 15. izdanje, McGraw-Hill, Inc., hrvatski prijevod, izdavač MATE, Zagreb, 2000.
- [2] WANGESTEEN, I., Power Markets, Predavanja iz kolegija Uvod u tržište energentima, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2006.
- [3] STEFANOV, P. Č., Eksploatacija elektroenergetskih sistema, (Power point prezentacija), Beograd, 2004.
- [4] FLORES-MENDEZ, R. A., Towards a Standardization of Multi-Agent System Frameworks, 1999., <http://www.acm.org>
- [5] VLASSIS, V., A Concise Introduction to Multiagent Systems and Distributed AI, University of Amsterdam, Amsterdam, 2003
- [6] BOURGNE, G., Affect-based Multi-Agent Architecture, the University of Hull, Hull, September 2003
- [7] SHEN, Z. ET AL, Goal Autonomous Agent Architecture, Nanyang Technological University, Singapore, 2004
- [8] KUŠEK, M., Agentski orijentirano programsko inženjerstvo, (Power point prezentacija), Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za telekomunikacije, Zagreb, ožujak 2006.
- [9] STONE, P., VELOSO, M., Multiagent Systems: A Survey from a Machine Learning Perspective, Autonomous Robotics, vol. 8, No. 3, July 2000
- [10] KEKO, H., Inteligentni višeagentski sustavi u simulaciji tržišta električne energije, kvalifikacijski doktorski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za visoki napon i energetiku (ZVNE), Zagreb, 2006.
- [11] NAING WIN OO, N., MIRANDA, V., Multi-energy Retail Market Simulation with Intelligent Agents, Faculty of Engineering of the University of Porto, Portugal, 2005
- [12] GNANSOUNOU, E. et al, A multi-agent approach for planning activities in decentralized electricity markets, Knowledge – Based Systems, 2006.
- [13] GUENTER, E. et al, Multi-Agent Power Market Simulation using EMCAS, Argonne National Laboratory, Argonne, 2004
- [14] Argonne National Laboratory, Center for Energy, Environmental, and Economic Systems Analysis, <http://www.dis.anl.gov>
- [15] ANDROČEC, I., PUZAK, D., KRAJCAR, S., Modeliranje elektroenergetskog sustava bazirano na multiagentskim algoritmima, 8. savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, 2007.

Uredništvo primilo rukopis:
2007-11-29

Manuscript received:
2007-11-29

Prihvaćeno:
2007-12-07

Accepted:
2007-12-07