

TECHNE¹⁷

PULA
STUDENI
2019

ČASOPIS ZA POLITEHNIČKU OBRAZOVNU TEORIJU I PRAKSU



SADRŽAJ

Davor Mišković	Uvodna riječ	3
Radovan Jokić	Riječ glavnog urednika	4
	In memoriam	5
Alida Perković	Inovacije u istarskom gospodarstvu	5
Kristina Blasković	Nova formula za određivanje determinante a specijalni slučaj blok dijagonalne matrice	6
Kristina Blasković	Povratno iženjerstvo u održavanju softvera	19
Anton Perković	Holonomija u fizici	23
Sandi Buletić	Neuronske mreže	33
Milenko Jokić, Radovan Jokić	Projektiranje sinkronog generatora s cilindričnim rotorom za malu hidroelektranu	39
Milenko Jokić, Filip Jurman	Primjena aditivne proizvodnje u procesu razvoja novih proizvoda	47
Nikola Baćac, Ervin Kamenar	Basic and advanced DC motor positioning applications	53
Saša Radetić, Danijela Cetina, Miško Macolić Tomić	Implementacija ERP informacijskog sustava u poduzeću	61
Saša Petar, Dino Valeš	Razumijevanje konteksta logističko –distributivnih centara	70

Osnivač i nakladnik | Founder and Publisher
TECHNE Udruženje inženjera Pula
52100 Pula, Josipa Voltića 14
Tel. +385 98 213 931
www.techne.hr

Za nakladnika | For Publisher
mr.sc. Davor Mišković

Uredništvo | Editorial Board
mr.sc. Davor Mišković, mr.sc. Radovan Jokić,
Kristijan Matas, Milenko Jokić

Glavni urednik | Editor
mr.sc. Radovan Jokić

Grafički urednik | Editor
Dražen Tomić

Naslovnica | Cover
Igor Zirojević

Časopis izlazi najmanje jedan puta godišnje.

UDK 33
51/53
62

ISSN 1333-2643

UVODNA RIJEČ

Časopis TECHNE izlazi već dvadeset i jednu godinu, a upravo ste otvorili njegov 17. broj. Činjenica je to koja nam sugerira da tu možda nešto i nije baš najbolje posloženo, jednostavna matematika kaže – manje od jednog broja godišnje. Međutim za one koji vide polupunu čašu, a njima je TECHNE namijenjen, jasno je da je već veliki uspjeh opstati toliko godina – pogotovo bez pravog financiranja, na ustvari čistom entuzijazmu. Zbog toga molimo vas da nam pomognete da sve ovo i nastavimo, sa većom ambicijom, prema višim ciljevima, kvalitetnije.

Zbog trenutka u kojem izlazi ovaj broj 17, ipak moramo reći nešto o prošlosti. Četiri godine nakon osnivanja Udruženja inženjera TECHNE, 1998. počeo je pod istim nazivom izlaziti i časopis. Od petog broja, dakle od svibnja 2001. godine, izlazi kao zajednički časopis Udruženja inženjera i Visoke tehničke škole – Politehnike Pula. Svakim brojem nastojala se podići kvaliteta, kako sadržaja tako i opreme, odnosno vizualnog identiteta. Za to svakako najviše dugujemo onima koji su odrađivali najviše posla – glavnim urednicima, prvi je bio Nenad Rudan, a naslijedio ga je Luciano Kuhar, koji nas je nažalost ovog ljeta napustio. Neki brojevi su se pripremali i dulje od godinu dana, pa je kontinuitet izlaska ono što sada predstavlja jedan od glavnih ciljeva, što će biti težak zadatak Uredništva na čelu sa Radovanom Jokićem, novim glavnim urednikom.

Kako je ideja o osnivanju Politehnike u Puli, potekla od Udruženja inženjera, Politehnika se promovirala kroz ovaj list i skupa s njime razvijala, logično je bilo da nestankom Politehnike dođe i do promjene u koncepciji lista, tako da je na Skupštini udruge, održanoj u rujnu

2019., donijeta odluka da TECHNE opet postane časopis Udruženja inženjera – kao na početku. Naravno da mi je izrazito teško bilo u prethodnoj rečenici upotrijebiti riječ nestanak, iako se upravo to i dogodilo, jer vizija je bila drukčija. Plod dvadeset godišnjeg rada na stručnoj visokoj školi, koja je predstavljala apsolutno novu i progresivnu ideju u hrvatskom školstvu, trebao je biti sazrijevanje i konačno prerastanje na višu organizacijsku razinu – veleučilište, uz zadržavanje svih stečenih vrijednosti Politehnike. Međutim želja je vlasnika, a danas je jedino vlasnik taj koji odlučuje, da se krene u drugom smjeru. Ne slažemo se, ali poštujemo. Smatramo da poštovanje zaslužuje i tih 20 godina Politehnike, koja je na tržište rada poslala gotovo 600 svojih bivših studenata, na zadovoljstvo njihovih poslodavaca i korist kompletnog društva, a posebno nam je zadovoljstvo da se i veliki broj „svršenih politehničara“ jako dobro snašao na drugim Sveučilištima u Hrvatskoj i Svijetu, što je najbolja potvrda da je Politehnika i te kako imala smisla.

Dakle, upravo listate TECHNE, časopis Udruženja inženjera, u elektronskom obliku, jer mislimo da je takav oblik sasvim primjeren trenutku, pročitajte ono što vas zanima i vratite nam se, kao čitatelj ili još bolje kao autor. TECHNE ima ambiciozne planove, okupljamo inženjere i ne samo njih, sa različitim iskustvima i različitim struka, pa smo zato i u nazivu zadržali pridjev *politehnički*, jer smatramo da je buduće vrijeme upravo takvo, dakle nema projekata koje može riješiti samo jedna struka, nema privilegiranih, i samo se suradnjom i međusobnim poštivanjem mogu postići rezultati.

Pokušajmo zajedno učiniti nešto korisno!

Predsjednik Udruženja:
mr.sc. Davor Mišković

UVODNA RIJEČ GLAVNOG UREDNIKA

Turbulentna događanja u prethodnom periodu dovela su do potrebe prilagodbe i promjena koje je u uvodnoj riječi sažeto opisao predsjednik udruženja. Jedan od glavnih ciljeva definiran na Skupštini udruge je bio kontinuitet izlaska časopisa TECHNE. Kao novom glavnom uredniku pripala mi je čast i vrlo velika odgovornost da doprinesem tom cilju. Izuzetnim zalaganjem i nesebičnim radom cijelog tima suradnika, cilj je ostvaren, te je pred vama – TECHNE br.17.

U prvom dijelu Alida Perkov u članku „Inovacije u istarskom gospodarstvu“, opisuje utjecaj inovacija kao svojevrsnog dobra na povećanje proizvodnosti, poboljšanje standarda življenja, utjecaj na gospodarstvo Istre, te razvoj zemlje u cjelini.

Drugi dio obuhvaća teme iz matematike, povratnog inženjerstva, fizike i neuronskih mreža. U prvom članku Kristina Blašković je predstavila novu formulu za određivanje vrijednosti determinante u specijalnom slučaju blok dijagonalne matrice parnog reda, koja omogućava brži izračun. U drugom članku ista autorica tretira povratno inženjerstvo u održavanju softvera. Opisane su metode povratnog inženjerstva za softverske artefakte za koje ne postoji ili je nedostupna dokumentacija, a postoji potreba za generiranjem novog koda.

Anton Perkov u svom članku „Primjeri holonomije u fizici“ izlaže novi pogled na nekoliko tema iz fizike i to na Foucaultovo njihalo i Thomasovu precesiju. Opisana je i Berryjeva faza u kvantnoj mehanici.

Sandi Buletić je u članku „Neuronske mreže“ ukazao na neminovnost primjene neuronskih mreža u današnjem svijetu tehnologije. Prikazana je povijest i razvoj neuronskih mreža, usporedba biološke i umjetne neuronske mreže, te karakteristični primjeri primjene.

Treći dio časopisa posvećen je temi projektiranja, aditivne proizvodnje, te strategije upravljanja električnim motorima. U prvom članku autori M. Jokić i R. Jokić prikazuju izbor i primjenu najnovijih postupaka projektiranja sinkronih generatora s cilindričnim rotorom, s posebnim osvrtom na generatore primjenjene u malim hidroelektranama. Prikazani su rezultati jednog izve-

denog projekta. Drugi članak autora M.Jokić i F.Jurman analizira primjenu aditivne proizvodnje u procesu razvoja novih proizvoda. Posljednji članak autora Nikola Baćac i Ervin Kamenar, daje pregled različitih strategija upravljanja električnim motorima u smislu regulacije konvencionalnim regulatorima, te pozicioniranjem implementacijom različitih kontrolera.

U posljednjem dijelu časopisa su dva članka i to: članak grupe autora „Implementacija ERP informacijskog sustava u poduzeću“ i članak autora Saša Petar i Dino Valeš: „Razumijevanje konteksta logističko-distributivnih centara“.

Pored nabavke odgovarajućeg ERP sustava primjerenog djelatnosti proizvodnog poduzeća, ključni je korak uspješna implementacija odnosno integracija u cijeli poslovni proces. U članku je prikazano učešće komercijalnih ERP (Enterprise Resource Planning) sustava na tržištu, te ključne strategije implementacije.

Autori Saša Petar i Dino Valeš u članku detaljno su ukazali na značaj logističko-distributivnih centara. Istaknut je strateški značaj za postizanje konkurentске prednosti u tržišnoj utakmici svakog poduzeća. Sustavno su objašnjeni svi elementi logističko distributivnog centra, počevši od definicije, koncepta zao kruženih cijelina, strukture, te vrsta i podjela po kategorijama.

Nadam se da je ovaj broj časopisa TECHNE bez obzira na sve teškoće u realizaciji ispunio svoj cilj širenja novih politehničkih ideja i visoke kvalitete rezultata. U ovoj se fazi rada pitam što bi još mogli učiniti kako bi poboljšali časopis. Stoga smo ovdje da služimo autorima kako bi oni mogli dati svoj najbolji dio kreativnog rada, te doprinjeti kvaliteti časopisa. Na kraju još jednom hvala svima koji su svojim entuzijazmom, radom i aktivnošću doprinjeli izlasku ovog broja, te vas pozivam na daljnju suradnju i unaprjeđenje časopisa.

Glavni urednik:
mr.sc. Radovan Jokić

IN MEMORIAM

prof. Luciano Kuhar (1943. – 2019.)



Profesor Luciano Kuhar rođen je 07.08.1943. u Puli, na Busoleru, od oca Josipa i majke Franice. U Puli je proveo cijeli život s izuzetkom razdoblja studiranja u Rijeci i Ljubljani. Radio je u brodogradilištu Uljanik dvije godine, osam godina u zračnoj luci Pula, ali je najviše vremena proveo radeći ono što je i najviše volio, educirajući mlade iz područja fizike i tehničkih znanosti, i to u Gimnaziji „Branko Semelić“, pa u CUO Vladimir Božac, Tehničkoj školi, gdje je od 1993. do 1996. bio i ravnatelj. Od 1996. je u Talijanskoj srednjoj školi. Na Politehnici Pula predaje Fiziku od osnutka, u radni odnos prelazi 2005. i ostaje sve do umirovljenja 2010.

Mi koji smo okupljeni oko TECHNE-a, reći ćemo da se vrlo rano oduševio idejom Politehnike, te je u njezinom razvoju uvijek bio spreman dati vlastiti, veliki doprinos. Dao ga je tako da se uključio u rad Politehnike već na samom početku, te je sudjelovao u osmišljavanju programa, posebno pripremnih seminara, koje je iz Fizike osobno i provodio, te na taj način najbolje pripremao buduće studente na novi način učenja i rada. Bio je sinonim za Fiziku na Politehnici, a možda ga najbolje karakterizira to što je bio presretan, kada

je pronašao nasljednika u liku dr.sc. Gorana Zgrablića, kojem je mirno mogao prepustiti svoje kolegije. I nakon toga, još je dugo pomagao Goranu, ali prestankom rada u nastavi željeli smo što više iskoristiti njegovu volju i potencijal, pa je s veseljem prihvatio da bude glavni urednik našeg časopisa što je uspješno i radio do doslovno zadnjih trenutaka, jer je ovaj broj u kojem nažalost pišemo i ove retke, izašao većim dijelom iz njegovog kompjutera. Planirajući sadržaj baš ovog časopisa, popili smo zadnju kavu – svega desetak dana prije smrti.

Napustio nas je dobri čovjek, profesor Kuhar.

INOVACIJE U ISTARSKOM GOSPODARSTVU

Inovations in istrian economy

dr.sc. Alida Perkov
perkov.alida@gmail.com

Sažetak

Tehnološki napredak pojedine države ili nacije, ostvaruje se razvijanjem ili difuzijom novih tehnologija. One industrijske grane ili sektori, koji počivaju na visokim tehnologijama, ostvaruju danas i visoke profite, odnosno visoke iznose povrata novca u odnosu na investicije. Na razini poduzeća inovacije se mogu izraziti u obliku prihoda od novih proizvoda, razine izdataka za istraživanje i razvoj, broja patenata, zadovoljstva kupaca i zaposlenika, rezultata prodaje od prošlih inovacija (novih proizvoda). Na razini nacionalnog gospodarstva najčešće se kao mjera uzima razina ulaganja u istraživanje i razvoj zemlje (R&D) u cjelini ili kao postotak u BDP-u.

Cljučne riječi: Inovatori, poduzetništvo, industrijsko vlasništvo, Istarsko gospodarstvo.

Abstract

The technological advancement of a particular country or nation is achieved through the development or diffusion of new technologies. Those industries or sectors that rely on high technology, that are also making high profits today, and have a relatively high return on investment. At the enterprise level, innovation can be expressed in the form of revenue from new products, the level of R&D expenditure, the number of patents, customer and employee satisfaction, sales results from past innovations (new products). At the national economy level, the most commonly used measure is the level of investment in country R&D as a whole or as a percentage of GDP. of course, different non-credit instruments: crowdfunding, business angels, grants.

Keywords: Innovators, entrepreneurship, industrial property, Istrian economy.

1. UVOD

Moderna definicija poduzetništva ističe snažnu vezu između poduzetništva i inovacija. Poduzetništvo se prepoznaje kao kritična veza između novih znanja i gospodarskog rasta. Poduzetnik je inovator koji provodi promjene na tržištu kroz provedbu novih aktivnosti kao što su uvođenje novih i kvalitetnijih proizvoda, uvođenje novih načina proizvodnje, otvaranje novih tržišta, pronalaženje novih izvora opskrbe novim materijalima ili dijelovima i slično. Poduzetništvo je identificirano od strane mnogih istraživača kao glavna pokretačka snaga slobodnog tržišnog gospodarstva. Međutim, tek nedavno ekonomisti su počeli sintetizirati znanja o poduzetništvu i analizirati njegov utjecaj na ekonomski rast.¹ Nije, dakle, jedino važno kako smanjiti i rasporediti državni proračun, nego je značajno kako povećati nacionalni dohodak, koji će onda omogućiti i veća proračunska sredstva. Glavni ciljevi gospodarskog razvitka odnose se na povećanje dobra i blagodati u društvu: porast proizvodnosti, rast životnog standarda, bolja socijalna i zdravstvena skrb, visoka zaposlenost, veći izvoz i konkurentnost ekonomije². Inovacije su, pak, ovisne o znanju koje je također svojevrsno dobro i koje se proizvodi. Kako to ističu neki autori povećanje proizvod-

nosti i poboljšanje standarda življenja uvijek dovodi od prednosti u znanju i do poboljšanja u primjeni znanja.³

2. INOVACIJE I GOSPODARSKI RAST

Tehnološki napredak pojedine države ili nacije, ostvaruje se razvijanjem ili difuzijom novih tehnologija. One industrijske grane ili sektori, koji počivaju na visokim tehnologijama, ostvaruju danas i visoke profite, odnosno visoke iznose povrata novca u odnosu na investicije. Dakle proizvodi, konkurentni na međunarodnom tržištu, nude njem tzv. dodane vrijednosti potrošačima, trebaju donositi prihode svojstvene razvijenim gospodarstvima.⁴

Prema pojmovnom određenju OECD-a⁵: „Inovacija je implementacija novih ili znatno unaprijeđenih proizvoda (dobra ili usluga) ili procesa, nova metoda marketinga ili nova organizacijska metoda u poslovanju, nova organizacija na radnom mjestu ili u vanjskim odnosima.“ Na teoriju inovacija značajno je utjecao Joseph Schumpeter⁶ prema kojem inovacije predstavljaju dinamični pro-

1 LEVAR Martina, NIKOLIĆ Marina, Inovacije i razvoj kao uzrok i posljedica poduzetništva, Učenje za Poduzetništvo / Entrepreneurial Learning 1, Inovacijsko razvojni centar Zrinski, Zagreb: 2012.

2 ČOSIĆ Krešimir, FABAC Robert, Gospodarski rast, tehnološki razvitak i suvremeno obrazovanje, Ekonomski pregled, 52 (5-6) 516-544 (2001)

3 DELONG, J. Bradford. : "What Do We Really Know About Economic Growth?" in Michael Boskin, ed., *Economic Growth*, Hoover Institution conference on economic growth, Stanford, CA, October 9-10, 1997. Stanford, CA: Hoover Institution, 1998.

4 ČOSIĆ Krešimir, FABAC Robert, isto.

5 OECD (2005): Oslo Manual 3 Guidelines for collecting and interpreting innovation data (Paris, OECD; 2005.), str. 46, <http://www.oecd-ilibrary.org/docserver/download/>

6 SCHUMPETER Joseph Alois: The Theory of Economic Development: An Inquiry Into Profits, Capital, Credit, Interest, and the Business Cycle, Transaction Publish-

ces u kojem nove tehnologije zamjenjuju stare, odnosno proces kojeg naziva „kreativna destrukcija“ i koji postaje važan pokretač gospodarskog rasta i razvoja. Gospodarski sustav, naime, obilježavaju stalne promjene, a oni koji se ne prilagođavaju ne mogu opstati.

Inovacija je proces koji započinje kreativnom idejom i inicijativom koja potiče osnovna, primijenjena i razvojna istraživanja, a konačan rezultat je novi proizvod, novi način proizvodnje i nove metode upravljanja. Greenhalgh i Rogers⁷ navode tri osnovna stupnja inovacijskog procesa: istraživanje i razvoj, komercijalizaciju i difuziju. S obzirom na složenost inovacijskog procesa, inovacije je u praksi teško vrijednosno izraziti, te način mjerenja ovisi o tome je li riječ o mikroekonomskoj ili makroekonomskoj razini. Na razini poduzeća inovacije se mogu izraziti u obliku prihoda od novih proizvoda, razine izdataka za istraživanje i razvoj, broja patenata, zadovoljstva kupaca i zaposlenika, rezultata prodaje od prošlih inovacija (novih proizvoda).⁸ Na razini nacionalnog gospodarstva najčešće se kao mjera uzima razina ulaganja u istraživanje i razvoj zemlje (R&D) u cjelini ili kao postotak u BDP-u. Prema istraživanjima autorice P. Pavličić na primjeru njemačkog gospodarstva,⁹ postoji pozitivna korelacija između inovacija i gospodarskog rasta, koja je na razini značajnosti od 5 % statistički značajna, što znači da porast ulaganja u istraživanje i razvoj za 1 milijun eura, dovodi do porasta BDP-a za 21,6 milijuna eura.¹⁰ Inovacije, odnosno proces stvaranja i korištenja kreativnosti kao glavnog alata, osiguravaju preduvjet za nastanak i funkcioniranje poduzetništva uopće, te na taj način generiraju i vode razvoju koji proizlazi iz poduzetništva kao jednog od ključnih preduvjeta ne samo za razvoj zemalja, već i održivost razvoja.

3. INSTITUCIJSKA PODRŠKA INOVATORIMA

Državne su institucije prepoznavale značaj otkrića, poboljšanja i inovacija za gospodarski razvoj, te su pronalazke zakonski regulirali. Tradicija zaštite izuma na teritoriju današnje Hrvatske, zahvaljujući njezinoj uključenosti u zajedničke državne zajednice s ekonomski naprednijim zemljama, zemljopisno i kulturno bližim glavnim centrima tadašnjeg političkog, ekonomskog i društvenog života, u znatnoj mjeri prati europsku tradiciju zaštite izuma. Tako je samo u drugoj polovici 19. stoljeća izašlo 8 zakona i podzakon-

skih akata kojim su se poticali i nagrađivali inovatori.¹¹ Najznačajniji je Zakon o zaštiti pronalazaka (zakon o patentima). Pod zaštitom navedenog zakona stoje novi pronalasci, koji se mogu primijeniti kod obrta. Pravo na dijeljenje patenta ima samo začetnik pronalaska ili njegovi pravni nasljednici. Onaj tko prvi prijavi pronalazak smatrat će se njegovim začetnikom. Nadalje je regulirana zaštita pronalazaka na izložbama, upis u patentni registar, trajanje patenta, razvlaštenje, odnosi više posjednika patenta jednog prema drugome itd.¹²

Nakon 2. Svjetskog rata izašli su sljedeći zakoni: Zakon o pronalascima i tehničkim usavršenjima¹³, Zakon o patentima i tehničkim unapređenjima¹⁴, i Zakon o zaštiti izuma, tehničkih unapređenja i znakova razlikovanja¹⁵.

Nakon 1990. usvojen je Zakon o preuzimanju zakona o zaštiti izuma, tehničkih unapređenja i znakova razlikovanja¹⁶, Zakon o izmjenama i dopunama zakona o zaštiti izuma, tehničkih unapređenja i znakova razlikovanja, koji se u RH primjenjuje kao republički zakon¹⁷, Uredba o izmjeni zakona o izmjenama i dopunama zakona o zaštiti izuma, tehničkih unapređenja i znakova razlikovanja, koji se u RH primjenjuje kao republički zakon¹⁸, Uredba o podnošenju prijava po zakonu o industrijskom vlasništvu¹⁹, te Uredba o podnošenju prijava po zakonu o industrijskom vlasništvu.²⁰

U suvremenom okruženju, kod razvoja se novog proizvoda, novog dizajna proizvoda ili redizajna postojećeg, tada je riječ o industrijskom vlasništvu. Institucionalno se time bavi Državni zavod za intelektualno vlasništvo Republike Hrvatske, kao tijelo državne uprave koje obavlja poslove iz područja zaštite prava intelektualnog vlasništva. Zavod provodi postupke za priznanje prava industrijskog vlasništva (patenti, žigovi / zaštitni znakovi, industrijski dizajn, oznake zemljopisnog podrijetla i oznake izvornosti, topografije poluvodičkih proizvoda), te se bavi pratećom stručnom i zakonodav-

ers, New Brunswick (USA) and London (UK), 1934.

7 GREENHALGH, C., ROGERS, M., (2010.): Innovation, Intellectual Property, and Economic Growth. Princeton and Oxford: Princeton University Press.

8 PAVLIČIĆ Patricija Inovacije i gospodarski rast: koliko je jaka povezanost? Primjer njemačkog gospodarstva, Ekonomski pregled, 67 (5) 440-461 (2016) .

9 Prema istraživanjima autorice P. Pavličić, u Njemačkom gospodarstvu, postoji pozitivna korelacija između inovacija i gospodarskog rasta, koja je na razini značajnosti od 5 % statistički značajna, što znači da porast ulaganja u istraživanje i razvoj za 1 milijun eura dovodi do porasta BDP-a za 21,6 milijuna eura.

10 Navedena spoznaja zahtijeva dodatna empirijska istraživanja kako bi se utvrdilo postoji li slična povezanost i u drugim zemljama, i kako bi se odredio stvaran utjecaj inovacija na gospodarski rast.

11 To su sljedeći akti: Kaiserliches Patent wirksam für den ganzen Umfang des Reiches, wodurch an die Stelle des früheren Gesetzes vom 31. März 1832, über Privilegien zum Schutze neuer Entdeckungen, Erfindungen und Verbesserungen im Gebiete der Industrie ein neues Privilegiengesetz erlassen wird, RGBI 184/1852, Übereinkommen zum gegenseitigen Schutze der Erfindungen, Marken und Muster zwischen Österreich-Ungarn und dem Deutschen Reiche RGBI 23/1892, Verordnung des Handelsministeriums, betreffend die Durchführung der Artikel 3 und 4 des Übereinkommens vom 6. December 1891 (R. G. Bl. Nr. 23 ex 1892) mit dem Deutschen Reiche zum gegenseitigen Schutze der Erfindungen, Marken und Muster, RGBI 214/1892, Gesetz, betreffend den Schutz von Erfindungen (Patentgesetz) RGBI 30/1897, Verordnung der Ministerien des Handels und der Justiz, womit das Gesetz vom 11. Jänner 1897 betreffend den Schutz von Erfindungen (Patentgesetz) in Wirksamkeit gesetzt wird, RGBI 156/1898, Verordnung der Ministerien des Handels und des Innern, betreffend die gewerbemäßige Ausübung RGBI 162/1898, Verordnung des Handelsministeriums, betreffend den Schutz von Erfindungen auf inländischen Ausstellungen RGBI 164/1898, Übereinkommen zwischen Österreich-Ungarn und Spanien zum gegenseitigen Schutze von Erfindungen, Marken und Mustern, RGBI 117/1900.

12 Gesetz, betreffend den Schutz von Erfindungen (Patentgesetz) RGBI 30/1897. <http://alex.onb.ac.at/cgi-content/alex?aid=rgb&datum=18970004&seite=00000035> (pristupljeno 8.3.2018).

13 Službeni list FNRJ, br. 108/1948 (1960, 1962, 1964).

14 Službeni list FNRJ, br. 44/1960, 28/1962, 24/1974.

15 Službeni list SFRJ, br. 34/1981, 3/1990 i 20/1990.

16 Narodne novine br. 53/1991.

17 Narodne novine br. 19/1992 .

18 Narodne novine br. 61/1992.

19 Narodne novine br. 29/1993.

20 Narodne novine br. 100/1993.

nom djelatnošću. Djelatnost zavoda u zakonodavnom i stručnom dijelu uključuje i područje autorskog prava i srodnih prava.²¹

Zemlje EU-a potiče se da ulažu 3 % BDP-a u istraživanja i inovacije do 2020. godine (1 % javnog financiranja, 2 % ulaganja iz privatnog sektora), a očekuje se da će se time otvoriti 3,7 milijuna radnih mjesta i povisiti godišnji BDP EU-a za gotovo 800 milijardi eura.²² Od 2014. godine EU je pokrenuo svoj najnoviji **sedmogođišnji istraživački program – OBZOR 2020**. Gotovo **80 milijardi eura sredstava** EU-a dostupno je do 2020. – uz privatna i nacionalna javna ulaganja koja će ta sredstva privući. U taj program uključena su sva sredstva za istraživanja i inovacije. Ciljevi programa su ojačati položaj EU-a u znanosti, osobito kroz industrijske inovacije i baviti se **važnim socijalnim pitanjima** povezanim s klimatskim promjenama, održivim prometom, obnovljivom energijom, sigurnošću hrane i zaštitom, starenjem stanovništva.

Ministarstvo gospodarstva RH je definiralo strateški plan za razdoblje 2017. – 2019. godine, usmjeren jednostavnijim i slobodnijim uvjetima poslovanja, digitalizaciji gospodarstva, otvorenosti inovacijama i slobodnom pristupu unutarnjem tržištu EU.²³ Pritom, kao najvažniji ciljevi su određeni: 1) rasterećenje poslovnog sektora od prekomjernih troškova regulative i nameta, 2) povećanje konkurentnosti gospodarstva poticanjem investicijskog i inovacijskog okruženja i 3) jačanje konkurentnosti trgovine na unutarnjem tržištu europske unije. Za potrebe digitalizacije industrije, te izazova pred kojima se hrvatska industrija nalazi u razdoblju do 2020. godine, Ministarstvo gospodarstva, poduzetništva i obrta je tijekom 2016. godine izradilo nacionalnu platformu Republike Hrvatske – Industrije 4.0. U svijetu Industrije 4.0 ljudi, strojevi, oprema, logistički sustavi i proizvodi izravno komuniciraju kroz ugrađenu im razinu inteligencije. Pokretačka snaga koja stoji iza industrije 4.0 je digitalizacija gospodarstva i društva kako bi se osnažili inovacijski potencijali, povećala produktivnost rada, optimiziralo donošenje odluka, individualizirala proizvodnja, povećala energetska učinkovitost i bolje iskoristili resursi poduzeća.²⁴ Za razvoj i transfer tehnologije kroz izradu strategije Industrije 4.0, predviđen je u 2017. godini 0,93%, 2018. godini 0,97% i u 2019. godini 1,2% izdvajanja za istraživanje i razvoj iz mase BDP. Pri tome je za posebni cilj 2.2. Poticanje ulaganja u istraživanje i inovacije, te razvoj poduzetništva putem EU programa i ostalih javnih sredstava, predviđeno je da do 2019. godine iskorištenost ugovorenih sredstava naraste od današnjih 10 % na 50 % 2019. godine. U strateškom planu Ministarstva gos-

podarstva, poduzetništva i obrta navodi se „da je plan u narednom razdoblju izrada strategije Industrije 4.0. sa ciljem izrade regionalne prilagodbe modela. U tom smislu nužno je poticati provedbu Industrije 4.0 kako bi počeli stizati Europske pokazatelje (u EU broj robota na 10.000 zaposlenih je 150, u Njemačkoj preko 300, u Hrvatskoj 8).²⁵ Pri tome je jedan od osnovnih ciljeva strateškoga plana 2019.–2021. povećanje konkurentnosti gospodarstva poticanjem investicijskog i inovacijskog okruženja, i to digitalizacijom gospodarstva i industrije, poticanjem ulaganja i razvojem poduzetničke infrastrukture te unaprjeđenjem inovacijskog okruženja.²⁶ Pri tom se Iskorištena sredstva u odnosu na dodijeljena EU sredstva za Prioritetnu os 1b i Prioritetnu os 3, sa 27% iskoristivosti želi povećati na 49%.²⁷

Inovativna aktivnost hrvatskih poduzeća se prema dosad provedenim istraživanjima, ali i prema očekivanjima pokazala kao prilično slaba. Na temelju prakse uspješnih poduzeća predložene su preporuke za povećanje inovativne aktivnosti hrvatskog gospodarstva.²⁸ Na razini Istarske županije valja napomenuti da se ključna područja Županijske razvojne strategije Istarske županije do 2020. godine odnose na: ulaganje u ljudske resurse (obrazovanje) u skladu s trendovima i potrebama tržišta rada; ulaganje u gospodarstvo s naglaskom na digitalizaciju, inovacije i primjenu novih tehnologija te jačanje širokopojasne infrastrukture; održivi razvoj turizma; Istru kao „zelenu regiju“; Istru kao stabilnu i sigurnu regiju te na očuvanje i razvoj istarskog identiteta.²⁹

4. KLASIFIKACIJA IZUMA

Patenti potiču ulaganja u istraživanje i razvoj novih tehnologija u tvrtkama i istraživačkim organizacijama, osiguravajući njihov povoljniji položaj na relevantnim tržištima, te povratak ulaganja u istraživanje i razvoj.³⁰ Patent je isključivo pravo priznato za izum koji nudi novo rješenje nekoga tehničkog problema. Ako se promatraju prijave patenata prema tehničkom području, u 2018. najveći udio prijava bio je u području općeg strojarstva (32,0%), slijedi područje kemije (24,4%), dok je najmanji broj prijava bio u području mjeriteljstva (9,6%).³¹

Žig je razlikovni (distinktivni) znak koji služi za identifikaciju određenih proizvoda i usluga kao onih koji potječu od određenog poduzetnika (fizičke ili pravne osobe). Žig pruža zaštitu nositelja tog prava intelektualnog vlasništva, osiguravajući mu isključivo pravo uporabe

21 <http://www.dziv.hr/hr/o-zavodu/dziv/> (pristupljeno 11.3.2018.).

22 https://europa.eu/european-union/topics/research-innovation_hr

23 Strateški plan Ministarstva gospodarstva, poduzetništva i obrta za razdoblje 2017.–2019. godine, https://www.mingo.hr/public/documents/MINGPO_STRATESKI_PLAN_2017_2019.pdf (pristupljeno 9.3.2018.).

24 Strateški plan, isto.

25 Strateški plan Ministarstva gospodarstva, poduzetništva i obrta 2019.–2021., 16. https://www.mingo.hr/public/STRATE%C5%A0KI%20PLAN%202019_2021%20MGPO.pdf (pristupljeno 26.11. 2019.).

26 Strateški plan 2019.–2021., 25.

27 Strateški plan 2019.–2021., 26.

28 <http://www.step.uniri.hr/inovacije/>

29 Županijska razvojna strategija Istarske županije do 2010. godine, www.istra-istria.hr.

30 www.dziv.hr

31 www.dzs.hr

žiga za proizvode i usluge za koje je registriran. Registracija se podnosi državnom zavodu za intelektualno vlasništvo.³²

Dizajn je pojavnost (vanjski izgled nekog proizvoda), a u Hrvatskoj se industrijski dizajn kao intelektualno vlasništvo štiti prema odredbama Zakona o industrijskom dizajnu³³. Kad je industrijski dizajn zaštićen kao intelektualno vlasništvo, njegov nositelj-fizička ili pravna osoba, ima isključivo pravo korištenja zaštićenog dizajna proizvoda i sprječavanja njegovog neovlaštenog korištenja prema trećim osobama.

Oznakama koje upućuju na zemljopisno podrijetlo proizvoda ili usluga štite se pretežito nazivi područja ili određenog mjesta koji se koriste za označavanje proizvoda ili usluga koji potječu iz tih mjesta ili područja kada se njihova određena svojstva mogu pripisati njegovom podrijetlu. Time se doprinosi komercijalnoj vrijednosti proizvoda ili usluga i povećava mogućnost prodaje po višim cijenama koje odgovaraju njihovim posebnim svojstvima i ugledu na tržištu.³⁴

Intelektualno vlasništvo uređeno je Pariškom konvencijom o zaštiti industrijskog vlasništva iz 1883. g. i Bernskom konvencijom o zaštiti književnih i umjetničkih djela iz 1886. godine. Autorska su djela u Zakonu o autorskom i srodnim pravima nabrojana na sljedeći način: jezična djela (pisana i govorna djela kao i računalni programi); glazbena djela s riječima ili bez njih; dramska i dramsko-glazbena djela; koreografska i pantomimska djela; djela likovne umjetnosti; djela arhitekture; djela primijenjenih umjetnosti i industrijskog dizajna; fotografska djela; audiovizualna djela; kartografska djela; prikazi znanstvene ili tehničke prirode kao što su crteži, planovi, skice, tablice i dr.

Prema podacima DZS inovacija proizvoda jest uvođenje na tržište novoga ili znatno poboljšanog proizvoda ili usluge u smislu karakteristika kao što su mogućnosti proizvoda ili usluge, njihova prilagođenost korisniku, sastavni dijelovi ili podsustavi. Inovacija proizvoda (novoga ili poboljšanoga) mora biti nova za poduzeće, ali ne nužno za tržište. Nije presudno je li inovaciju izvorno razvilo samo poduzeće ili neko drugo poduzeće. Inovacija procesa jest primjena tog novoga ili znatno poboljšanoga proizvodnog postupka³⁵ u poslovnom smislu intelektualno vlasništvo predstavlja nematerijalnu imovinu čije uspješno iskorištavanje može biti vrijedan temelj ili doprinos poslovanju. Inovacija nije prototip nastao u odjelu razvoja, sposobnost poduzeća da nešto napravi ili osvojeno priznanje na sajmu inovacija. Ideja, otkriće, prototip ili proizvod postaju inovacija tek kada dođu do kupaca i kada ih dovoljan broj kupaca prihvati.³⁶ Kako bi se zaštitila ova vr-

sta dobara, te na taj način potakla ljudska kreativnost koja doprinosi općem društvenom razvitku, razvijen je odgovarajući sustav pravne zaštite intelektualnog vlasništva. Pravo intelektualnog vlasništva obuhvaća sustav pravnih instrumenata kojima se uređuje način stjecanja intelektualnog vlasništva i način zaštite od njegovog neovlaštenog korištenja. Intelektualno vlasništvo obuhvaća dvije podgrupe prava - autorsko i srodna prava, te prava industrijskog vlasništva.

5. STATISTIKA INDUSTRIJSKOG VLASNIŠTVA

Zahtjevi za stjecanje industrijskog vlasništva pri državnom zavodu za intelektualno vlasništvo RH Stanje 02. ožujka 2018. god.			
	1.1.1992.- 31.12.2017.	1.1.2018.- 28.2.2018.	1.1.1992.- 28.2.2018.
Žigovi			
Domaći	29.372	171	29.543
Strani	24.832	34	24.866
Ukupno	54.204	205	54.409
Patenti			
Domaći	7.881	15	7.896
Strani	8.847	1	8.848
Ukupno	16.728	16	16.744
Industrijski dizajn			
Domaći	5.158	23	5.181
Strani	1.062	0	1.062
Ukupno	6.220	23	6.243
Sveukupno	77.152	244	77.396

Slika 1. Statistika industrijskog vlasništva³⁷

Prava slika usporedbe dobije se promatranjem dinamike analitičkih kategorija kroz godine.

Broj prijave	2011.	2012.	2013.	2014.	2015.
Patenti	776	748	535	334	186
Žigovi	7832	7268	6527	3708	3284
Industrijski dizajn	686	690	555	294	291
Ukupno	9294	8706	7617	4336	3761

Slika 2. Prijave za industrijsko vlasništvo prema vrsti zaštite 2011.–2015.³⁸

Uočljiv je negativni trend prijave industrijskog vlasništva (žigovi, patenti, industrijski dizajn) kojim proizvođači štite od konkurenata svoje poslovne interese. Ukupne prijave za industrijsko vlasništvo prema vrsti zaštite od 2011. do 2015. godine ukazuju na pad, što je indikator da je potrebno uvesti institucijske mjere za poticanje inovativnosti.

32 Što je žig? www.dziv.hr

33 Što je industrijski dizajn? www.dziv.hr

34 Što je oznaka zemljopisnog podrijetla odnosno oznaka izvornosti? www.dziv.hr

35 Inovacije u hrvatskim poduzećima u razdoblju 2012. – 2014., Priopćenje DZSRH br. 8.2.5. od 21.6.2016. https://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2016/08-02-05_01_2016.htm

36 <http://www.step.uniri.hr/innovacije/>

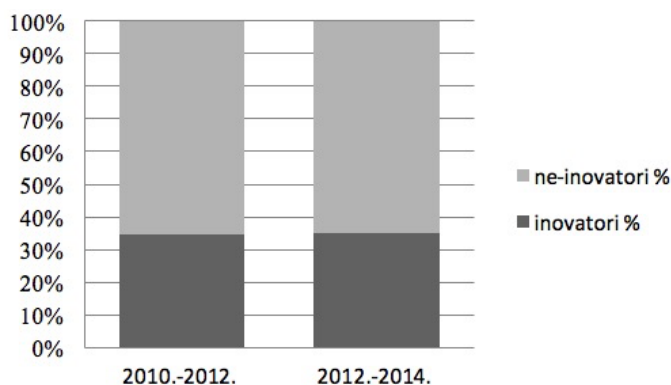
37 Državni zavod za intelektualno vlasništvo Republike Hrvatske, <http://www.dziv.hr/hr/o-zavodu/statistika-ind-vlasnistva> (pristupljeno 25.3.2018.)

38 Državni zavod za intelektualno vlasništvo Republike Hrvatske, Godišnje izvješće 2015. http://www.dziv.hr/files/File/go-izvjesca/godisnje_izvjesce_2015.pdf

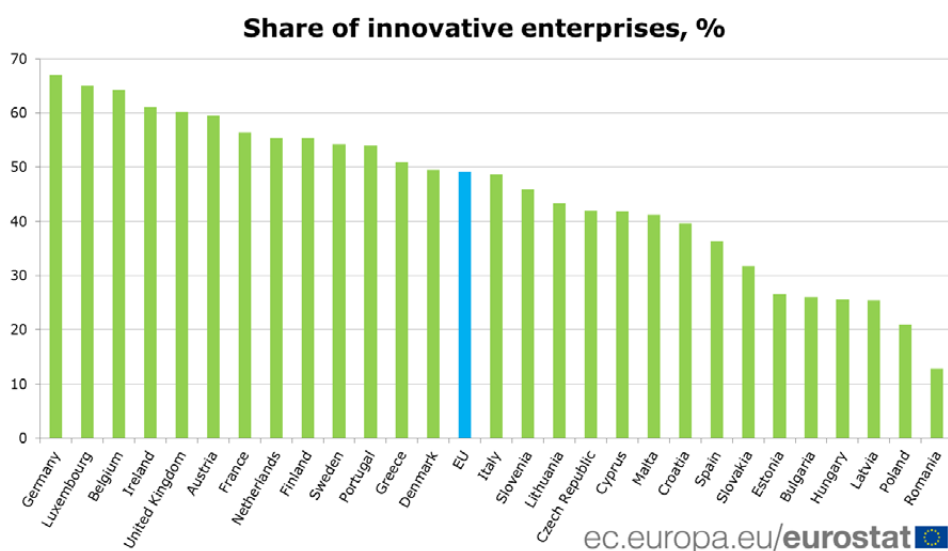
6. INOVACIJE U HRVATSKIM PODUZEĆIMA OD 2014. DO 2016. GODINE

Prema podacima Državnog zavoda za statistiku RH u razdoblju 2014. – 2016. u Republici Hrvatskoj bilo je 43,4% inovativnih poduzeća.³⁹ Udio inovativnih poduzeća raste s njihovom veličinom. Inovativno je bilo 40,5% malih, 53,0% srednje velikih i 71,7% velikih poduzeća. Proizvodna poduzeća prednjače u inovacijskim aktivnostima s udjelom od 47,7% inovativnih poduzeća, dok je 40,8% uslužnih poduzeća bilo inovativno. Udio inovatora proizvoda i procesa manji je od udjela inovatora u organizaciji i marketingu. Te dvije skupine inovacija uglavnom se pojavljuju usporedno u poduzeću. U promatranom razdoblju 2014. – 2016. godine 17,9% poduzeća uvelo je barem jednu inovaciju u području logistike, od kojih je najviše njih (54,2%) uvelo e-nabavu (primjerice, nove oblike kupnje i prodaje materijala i robe preko interneta i drugih informacijskih sustava između dobavljača i poduzeća). Najmanji udio poduzeća je u području logistike (12,2%) uveo nove modele isporuke uključujući uporabu vozila na alternativna goriva ili multimodalnu logistiku (npr. kombiniranu upotrebu cestovnog prijevoza i unutarnje plovidbe).⁴⁰ Prema podacima DZSRH ako se promatra struktura izdataka za inovacijske aktivnosti u 2014., uočava se da je najviše potrošeno na nabavu postrojenja, opreme, softvera i zgrada, a nakon toga na vlastite aktivnosti istraživanja i razvoja.⁴¹ Velika poduzeća imaju širu strukturu izdataka za inovacijske aktivnosti u odnosu na mala i srednje velika, dok srednje velika poduzeća imaju veći udio inovacijskih izdataka namijenjen naba-

vi postrojenja, opreme, softvera i zgrada u usporedbi s velikim poduzećima. Sukladno statističkoj analizi, neinovativna poduzeća se primarno mogu podijeliti u dvije skupine prema razlogu neuvođenja inovacijskih aktivnosti – na ona poduzeća koja nisu imala uvjerljivi razlog za uvođenje inovacija i na ona koja su imala namjeru, ali su prepreke bile prevelike. Od poduzeća koja nisu imala motivaciju za uvođenje inovacija, najvažniji čimbenik za neinovativnost je slaba potražnja za inovacijama na tržištu (12,4%), dok s druge strane, najveći udio po važnosti prepreka u uvođenju inovacijskih aktivnosti u poduzećima imaju teškoće u dobivanju državne potpore ili subvencije za inovacije (8,0%). Neinovativna poduzeća su najmanje važnosti pridala neinovativnosti zbog prethodnih inovacija (28,8%), dok je najviše njih kao zanemarivu prepreku navelo nedostatak kreditiranja ili privatnog kapitala (7,0%).⁴²



Slika 4. Kretanje poduzeća prema inovativnosti, djelatnosti i veličini 2010.-2012. i 2012.-2014. godine prema odabranom statističkom uzorku.⁴³



Slika 5.: Usporedba inovacijskih aktivnosti hrvatskih poduzeća sa okruženjem EU⁴⁴

³⁹ Podaci su rezultat su istraživanja o inovacijskim aktivnostima u poduzećima u razdoblju 2014. – 2016. provedenoga na uzorku od 4 500 poduzeća. Istraživanje je provedeno u Državnom zavodu za statistiku i potpuno je usklađeno s istraživanjem koje se u Europskoj uniji provodi svake dvije godine pod naslovom „Community Innovation Survey“.

⁴⁰ https://www.dzs.hr/Hrv_Eng/publication/2018/08-02-05_01_2018.htm

⁴¹ Državni zavod za statistiku RH www.dzs.hr Inovacije u hrvatskim poduzećima u razdoblju 2010. – 2012. i inovacije u hrvatskim poduzećima u razdoblju 2012. – 2014.

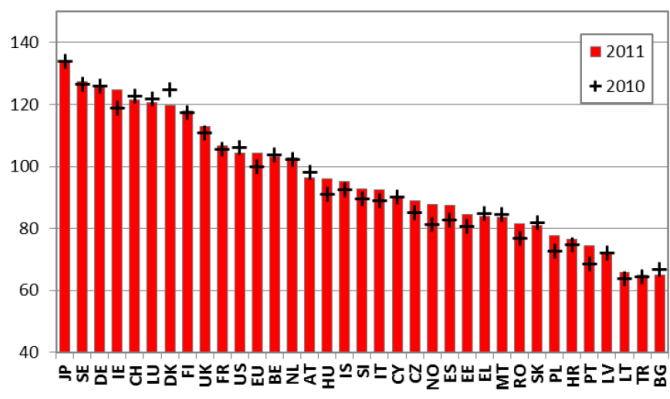
⁴² Isto.

⁴³ Izvor : Državni zavod za statistiku RH www.dzs.hr Inovacije u hrvatskim poduzećima u razdoblju 2010. – 2012. i inovacije u hrvatskim poduzećima u razdoblju 2012. – 2014., obrada A. Perković.

⁴⁴ Izvor: Eurostat, Community Innovation Survey (CIS) <http://ec.europa.eu/eurostat/web/microdata/community-innovation-survey> (pristupljeno 16.03.2018.)

Usporedbom podataka inovativnih poduzeća sa okruženjem, dobijemo realnu sliku o položaju i statusu inovativnih poduzeća u odnosu na EU. Individualni uspjesi koji postižu naše tvrtke (Infobip, Rimac, Rudan) više su rezultat inicijative pojedinca prerasle u respektabilan poslovni subjekt, nego dosadašnjeg sustavnog napretka u odnosu na druge zemlje iz okruženja. To nam pokazuje sljedeća slika.

Prema zadnje dostupnim podacima, u Europskoj Uniji prosječno nešto manje od polovice (49,1%) poduzeća od 10 zaposlenika ili više, imaju prijavljene inovacijske aktivnosti tijekom razdoblja 2012.-2014. Iako je udio inovativnih poduzeća u EU ostao gotovo stabilan u razdoblju 2012.-2014. u usporedbi s 2010.-2012., pao je u usporedbi na razdoblje 2006.-2008. godine (51,5% inovativnih poduzeća), a vrhunac je zabilježen u razdoblju 2008.-2010. (52,8%). Taj je uzorak zabilježen u većini država članica. U razdoblju od 2012. do 2014. najveći su udjeli poduzeća s inovacijskim aktivnostima zabilježeni u Njemačkoj (67,0% poduzeća), Luksemburgu (65,1%) i Belgiji (64,2%), ispred Irske (61,0%), Ujedinjenog Kraljevstva (60,2%) i Austrije (59,5%). Hrvatska se nalazi ispod prosjeka EU sa 39% poduzeća s inovacijskim aktivnostima. U istom razdoblju manje od 30% poduzeća ima inovacijske aktivnosti u Rumunjskoj (12,8%) i Poljskoj (21,0%), zatim Latviji (25,5%), Mađarskoj (25,6%), Bugarskoj (26,1%) i Estoniji (26,5 %).



Slika 6. Rangiranje zemalja članica EU prema kompozitnom indikatoru inovacija 2010. i 2011. godine (CII)⁴⁵

Udio RH poduzeća u inovacijama pokazuje i svježiji inovacijski pokazatelj EU-a tzv. Composite Innovation Indicator (CII) usmjeren isključivo prema mjerenju inovacijskog sveukupnog rezultata kroz 4 komponente: mjerenje tehnoloških inovacija kroz broj patenata, postotak poslova u aktivnostima temeljenima na znanju, mjerenju konkurentnosti industrijskih sektora temeljenih na znanju te razini zapošljivosti u brzo rastućim kompanijama u inovativnim sektorima.⁴⁶ Podaci ukazuju na postupni, ali spori prelazak RH u grupu umjerenno inovativnih (eng. Moderate innovative) zemalja.

⁴⁵ Nacrt prijedloga, isto.

⁴⁶ Nacrt prijedloga inovacijske strategije Republike Hrvatske 2014.-2020., www.europski-fondovi.eu (pristupljeno 16.3.2018.)

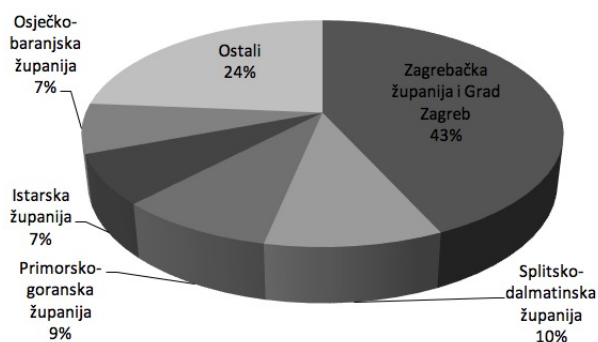
Svrha ovog pokazatelja u osnovi je mjerenje i prikazivanje udjela brzo rastućih i inovativnih kompanija u gospodarstvu.

Prema podacima međunarodnog istraživanja globalni indeks inovativnosti, Hrvatska je u 2015. godini zauzela 40. mjesto od ukupno 141 zemlje u kojima je ovim istraživanjem mjerena razina inovativnosti ekonomije. Rang Hrvatske predstavlja skok za 2 mjesta u odnosu na 2014. godinu, a na vrhu ljestvice je kao i prethodne godine Švicarska. Po Europskoj ljestvici uspjeha u inoviranju za 2018. godinu, Švedska je ponovno predvodnica u području inovacija u EU-u, a slijede je Danska, Finska, Nizozemska, Ujedinjena Kraljevina i Luksemburg.⁴⁷ U prosjeku se od 2010. uspješnost EU-a u području inovacija povećala za 5,8 postotnih bodova. Posljednjih osam godina uspješnost je porasla u 18 zemalja EU-a, a smanjila se u njih 10. Najviše se povećala u Litvi, Malti, Nizozemskoj i Ujedinjenoj Kraljevini, a najviše se smanjila u Cipru i Rumunjskoj.

Općenito, usporedbom s drugim gospodarstvima u Središnjoj i Istočnoj Europi, Hrvatska ostvaruje spori napredak u preobrazbi strukture svoje proizvodnje i izvoza prema proizvodima koji intenzivno koriste tehnologiju i visokoobrazovanu radnu snagu.

7. USPOREDBA ISTRE S DRUGIM ŽUPANIJAMA

U 2015. godini poslano je 169 patentnih prijava u DZIV, od čega je 7% udio Istarske županije. Prvi je grad Zagreb, slijedi Splitsko-dalmatinska županija, a Istarska županija i Osječko-baranjska županija dijele 5. i 6. mjesto.

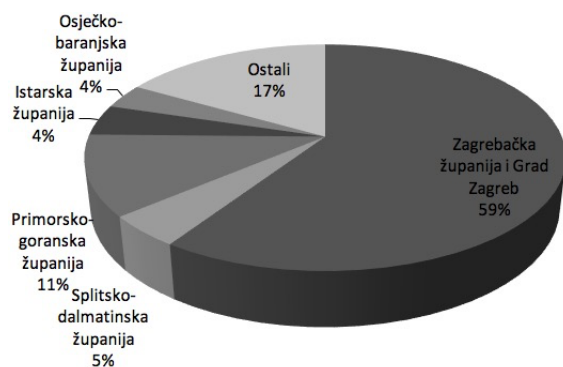


Slika 7. Patentne prijave prema županijama prijavitelja u 2015. godini⁴⁸

Iste je godine Istarska županija po prijavama žiga na 4. mjestu u RH sa 56 prijava od ukupnih 1272 prijave.

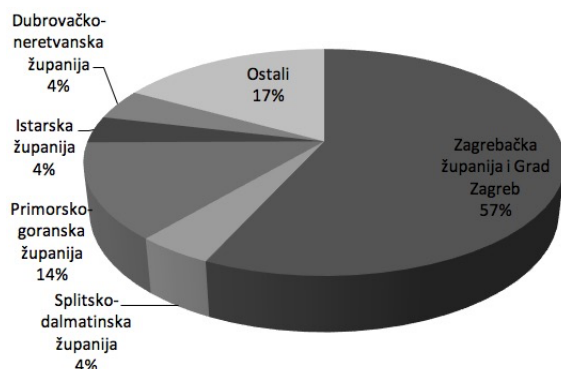
⁴⁷ Europska ljestvica uspjeha u inoviranju 2018.: Europa mora ozbiljnije pristupiti inovacijama, Europska komisija - Priopćenje za tisak, Bruxelles, 22. lipnja 2018. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-4223_hr.pdf

⁴⁸ Izvor http://www.dziv.hr/files/File/go-izvjesca/godisnje_izvjesce_2015.pdf, obrada autorice



Slika 8. Prijave žiga u 2015. godini po županijama⁴⁹

Također po broju prijavljenih dizajna Istra se nalazi na petom mjestu među Hrvatskim županijama sa 7 prijava od ukupnih 183.



Slika 9. Prijave dizajna u 2015. godine po županijama⁵⁰

Ograničena poslovna ulaganja u istraživanja i razvoj, te inovacije pridonijela su tome da se Hrvatska specijalizirala za proizvodnju i izvoz niže dodane vrijednosti, temeljeno na sektorima niske i srednje-niske tehnologije. Glavne razlike između RH i prosjeka EU ukazuju na vidne nesrazmjere. Primjerice ukupni izdaci za istraživanje i razvoj (GERD kao % BDP-a) u 2013. godini iznosili su u RH 0,81 %, a u EU27 prosjeku 1,29%. Patentne aplikacije u 2012. godini iznose u RH 6,77 na milijun stanovnika, dok je na razini EU27 iznosi 108,05. Uspoređujući patentne aplikacije u 2012. godini koje iznose u RH 6,77 na milijun stanovnika, u 2015. godini prema podacima DZIV taj se pokazatelj smanjio na 3,94 na milijun stanovnika, dok ponderirano na Istarsku županiju on iznosi 5,77 na milijun stanovnika.

8. SUVREMENI ISTARSKI INOVATORI

Težište rada u inovacijskoj djelatnosti danas se u Hrvatskoj premjestilo na nezavisne inovatore, s težnjom da se njihova djela po mogućnosti stručno obrade i komercijaliziraju, te da se razvitkom inovacijskih projekata da stimulacija razvitku poduzetništva. Institucionalna suradnja udruge inovatora istaknuta je sa javnim sektorom, osobito Ministarstvima i regionalnim razvojnim agencijama. Stotinjak istarskih inovatora okupljenih oko Saveza udruga inovatora Istarske županije nude brojne inovacije za tržište.⁵¹

Neke su inovacije prepoznate i nagrađene na Međunarodnim sajmovima, primjerice: „Mirisne granule za usisavače“ Špelić Darka iz Pule, „Elektromotor sa smaknutim permanentim magnetima u vanjskom rotoru i magnetskim klinovima u statorskom utoru“ i „Elektromotor sa višeslojnim permanentnim magnetima ugrađenim u rotorski laminat profiliran za veliki doprinos reluktancije ukupnom momentu motora“ dr.sc. Branimira Ružojčića iz Pule, Aparat za visokofrekventnu elektromagnetsku terapiju - „I V E M T 2.“ Marić Marčela i Zorana Črnje iz Kanfanara, „Postupak za proizvodnju mednih pripravaka sa biljem“ Marija Sandrića iz Pule, „Protuklizni uređaj za gume“ Saše Đorđevića iz Pule, „Jedrilica koja jedri bez uzde i škote“, „Veslo membrana“ i „Veslo membrana sa klapnom“ Blaža Pitona iz Fažane, „Automatski protupožarni sustav za motorna vozila i manja plovila“ Mitanić Zorana iz Pule, te „Kolica-dizaličar“ Blaža Ilića iz Fažane,⁵² uređaj za detekciju i dojavu pada motocikla i lokacije vozača, autora Siniše Brođanca iz Pule.

Poseban osvrt zaslužuju poslovni subjekti koji njeguju inovaciju u okviru svoje korporativne kulture, filozofije i politike kvalitete. Još od sredine 19. stoljeća brojne su se inovacije primjenjivale u procesu pulske brodogradnje. Mnogi suvremeni poslovni subjekti prijavljuju inovacije pod svojom tvrtkom: primjerice Svijet biljaka d.o.o. Pula, Labinprogres TPS, Infobip Vodnjan. Inovativne tehnike u proizvodnji roba i usluga nalaze svoju potvrdu u rastu ukupnog prihoda svake tvrtke.

9. ZAKLJUČAK

Uz institucionalnu podršku, intelektualno vlasništvo treba doprinijeti globalnoj konkurentnosti nacionalnog gospodarstva, te društvenom, znanstvenom i kulturnom napretku. Pri tom se trebaju priznavati prava industrijskog vlasništva, te nadzor kolektivnog ostvarivanja autorskih i srodnih prava; razvoj zakonodavstva i nacionalnog sustava intelektualnog vlasništva u suradnji s drugim institucijama.⁵³

49 Izvor http://www.dziv.hr/files/File/go-izvjesca/godisnje_izvjesce_2015.pdf, obrada autorice

50 Izvor http://www.dziv.hr/files/File/go-izvjesca/godisnje_izvjesce_2015.pdf, obrada autorice

51 Udruga inovatora Hrvatske, <http://www.inovatorstvo.com/o-nama/a57> (pristupljeno 25.3.2018.)

52 <http://www.inovatorstvo.com/istarski-inovatori-odusevili-posjetitelje-izlozenim-inovacijama-na-12-obrtnickom-sajmu-istre/a234>

53 <http://www.dziv.hr/hr/o-zavodu/plan-rada/>

Ako je poduzetništvo glavna okosnica tržišnog rasta i razvoja, te ako istraživanja pokazuju da subjekti koji imaju istraživačko razvojni centar bivaju uspješniji i konkurentniji na tržištima, potrebno je vrednovati inovativnost. Rast svakog pa tako i hrvatskog gospodarstva, ovisi o uspješnoj pretvorbi istraživačkih rezultata i znanja u komercijalno iskoristive proizvode i tehnologije. Uspješna integracija na nova tržišta stoga zahtijeva prijelaz na gospodarstvo znanja u kojemu su znanost, tehnologija i inovativno poduzetništvo.

LITERATURA

- [1] ČOSIĆ Krešimir, FABAC Robert, Gospodarski rast, tehnološki razvitak i suvremeno obrazovanje, Ekonomski pregled, 52 (5-6) 516-544 (2001)
- [2] DELONG, J. Bradford. : "What Do We Really Know About Economic Growth?" in Michael Boskin, ed., Economic Growth, Hoover Institution conference on economic growth, Stanford, CA, October 9-10, 1997. Stanford, CA: Hoover Institution, 1998.
- [3] Državni zavod za intelektualno vlasništvo Republike Hrvatske, <http://www.dziv.hr/hr/o-zavodu/statistika-ind-vlasnistva>
- [4] [Državni zavod za statistiku RH www.dzs.hr](http://www.dzs.hr)
- [5] Europska komisija. Kutak za medije .http://europa.eu/rapid/press-release_IP-18-4223_hr.pdf
- [6] Europska Unija. Istraživanje i inovacije. https://europa.eu/european-union/topics/research-innovation_hr
- [7] Eurostat, Community Innovation Survey (CIS) <http://ec.europa.eu/eurostat/web/microdata/community-innovation-survey>
- [8] Gesetz, betreffend den Schutz von Erfindungen (Patentgesetz) RGBl 30/1897. <http://alex.onb.ac.at/cgi-content/alex?aid=rgb&datum=18970004&seite=00000035> (pristupljeno 8.3.2018).
- [9] GREENHALGH, C., ROGERS, M., (2010.): Innovation, Intellectual Property, and Economic Growth. Princeton and Oxford: Princeton University Press.
- [10] <http://www.step.uniri.hr/inovacije/>
- [11] LEVAR Martina, NIKOLIĆ Marina, Inovacije i razvoj kao uzrok i posljedica poduzetništva, Učenje za Poduzetništvo / Entrepreneurial Learning 1, Inovacijsko razvojni centar Zrinski , Zagreb: 2012.
- [12] Nacrt prijedloga inovacijske strategije Republike Hrvatske 2014.-2020., www.europski-fondovi.eu (pristupljeno 16.3.2018.
- [13] Narodne novine www.nn.hr
- [14] OECD (2005.): Oslo Manual 3 Guidelines for collecting and interpreting innovation data (Paris, OECD; 2005.), str. 46, <http://www.oecd-ilibrary.org/docserver/download/>
- [15] PAVLIŠIĆ Patricija Inovacije i gospodarski rast: koliko je jaka povezanost? Primjer njemačkog gospodarstva, Ekonomski pregled, 67 (5) 440-461 (2016) .
- [16] SCHUMPETER Joseph Alois: The Theory of Economic Development: An Inquiry Into Profits, Capital, Credit, Interest, and the Business Cycle, Transaction Publishers, New Brunswick (USA) and London (UK), 1934.
- [17] Službeni list FNRJ <https://demlas.geof.unizg.hr/>
- [18] Strateški plan Ministarstva gospodarstva, poduzetništva i obrta za razdoblje 2017.-2019.godine, https://www.mingo.hr/public/documents/MINGPO_STRATESKI_PLAN_2017_2019.pdf,
- [19] Udruga inovatora Hrvatske , <http://www.inovatorstvo.com/o-nama/a57>
- [20] Županijska razvojna strategija Istarske županije do 2010.godine, www.istra-istria.hr .

NOVA FORMULA ZA ODREĐIVANJE DETERMINANTE ZA SPECIJALNI SLUČAJ BLOK DIJAGONALNE MATRICE

New Formula for Computing Determinant of Special Case of Block Diagonal Matrix

Kristina Blašković, mag. edus. phys. et inf.
TEMA automatizacija u industriji d.o.o., Pula,
kristina@tema.hr

Sažetak

U ovom radu predstaviti će se nova formula za određivanje vrijednosti determinante za specijalni slučaju blok dijagonalne matrice primijenjiva i na matrice višeg reda uz uvjet da matrica ima paran broj redaka i stupaca. Prednost nove formule je brži izračun.

Ključne riječi: Determinanta, blok matrica, nova formula

Abstract

In this paper new formula is proposed intended to determine value of determinant of special case block diagonal matrix. It can be applied to matrices of higher order with even number of rows and columns. The advantage of using proposed formula is faster computation.

Keywords: Determinant, block matrix, new formula

1. UVOD

Prilikom određivanja vrijednosti determinante matrice 4. ili višeg reda nije moguće upotrijebiti Sarrusovo pravilo jer ono vrijedi samo za matrice 3. reda [1]. U tom slučaju moramo upotrijebiti L'aplaceov razvoj po i-tom retku ili stupcu. Obično, prilikom odabira retka ili stupca pogodnog za razvoj, pokušavamo odabrati redak ili stupac s najvećim brojem nula kako bi što je više moguće smanjili broj potrebnih koraka. Ukoliko determinanta nema ili ima mali broj nula elementarnim transformacijama svodimo zadanu matricu na pogodan oblik, što dodatno povećava broj koraka u određivanju vrijednosti determinante zadane matrice.

Konzultiranjem radova orjentiranih na definiranje novih algoritama [2],[3],[4],[5] za određivanje vrijednosti determinante za posebne slučajeve matrica ovdje predlažemo novu formulu za određivanje vrijednosti determinante primijenjivu samo na specijalni slučaj blok dijagonalne matrice koja će doprinijeti ubrzanju određivanja vrijednosti determinante, a samim time i cijeli daljnji izračun.

2. TEORIJSKA PODLOGA

Matrica je pravokutna tablica ili šema brojeva koja ima retke i stupce [1],[6],[7]. Ukoliko je broj redaka i broj stupaca matrice jednak onda govorimo o kvadratnoj matrici. Red kvadratne matrice određen je brojem redaka odnosno stupaca matrice.

Determinanta matrice predstavlja broj koji se može odrediti samo za kvadratne matrice. Za male matrice

dva retka i dva stupca determinanta je jednaka razlici umnoška elemenata na glavnoj dijagonali i elemenata na sporednoj dijagonali. Za veće matrice koristimo:

- a) Sarrusovo pravilo po kojem se prva dva stupca prepisuju iza trećeg te se množe po tri broja na istovrsnim dijagonalama. Pritom padajuće dijagonale imaju pozitivan, a rastuće negativan predznak
- b) Laplaceov razvoj po bilo kojem retku ili stupcu gdje zbrajamo umnoške elemenata izvučenih iz nekog retka ili stupca i determinante koja se dobije uklanjanjem tog retka i stupca (minora)

Elementi koji imaju jednaku vrijednost indeksa retka i stupca, općenito $a_{ii}, \forall i \in N$ nalaze se na glavnoj dijagonali matrice. Ukoliko je vrijednost svih elemenata van glavne dijagonale jednaka nuli, a elementi na glavnoj dijagonali imaju vrijednost različitu od nule, općenito $a_{ij} = 0, i \neq j$ tada govorimo o dijagonalnoj matrici. Upotrebom spomenutih metoda za određivanje determinante za dijagonalnu matricu dobivamo vrijednost koja je jednaka umnošku elemenata na glavnoj dijagonali (1).

$$\begin{vmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & a_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_{nn} \end{vmatrix} = a_{11} a_{22} \dots a_{nn} \quad (1)$$

Blok dijagonalne matrice (Slika 1.) su matrice koje na dijagonali umjesto elemenata imaju manje matrice koje zovemo blokovi [8].

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} * & * \\ * & * \end{bmatrix} & 0 & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} * & * \\ * & * \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & 0 & \begin{bmatrix} * & * \\ * & * \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

Slika 1. Prikaz blok dijagonalne matrice
Izvor: izradio autor

Analogno dijagonalnoj matrici (1) slijedi i formula (Slika 2.) prema kojoj se određuje vrijednost determinante za blok dijagonalnu matricu

$$\begin{vmatrix} \begin{vmatrix} * & * \\ * & * \end{vmatrix} & 0 & 0 \\ 0 & \begin{vmatrix} * & * \\ * & * \end{vmatrix} & 0 \\ 0 & 0 & \begin{vmatrix} * & * \\ * & * \end{vmatrix} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} * & * \\ * & * \end{vmatrix} \begin{vmatrix} * & * \\ * & * \end{vmatrix} \begin{vmatrix} * & * \\ * & * \end{vmatrix}$$

Slika 2. Determinanta blok dijagonalne matrice
Izvor: izradio autor

3. DETERMINANTA ZA SPECIJALNI SLUČAJ BLOK DIJAGONALNE MATRICE

Promotrimo specijalni slučaj kvadratne matrice n -tog reda, gdje je n paran broj ($n=2k$, $k=1,2,3,\dots$), elementi na glavnoj i sporednoj dijagonali su različiti od nule, a svi ostali elementi su jednaki nuli (Slika 3.)

$$\begin{bmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 & a_{1n} \\ 0 & a_{21} & \dots & a_{2(n-1)} & 0 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 0 & a_{(n-1)1} & \dots & a_{(n-1)(n-1)} & 0 \\ a_{n1} & 0 & \dots & 0 & a_{nn} \end{bmatrix}$$

Slika 3. Specijalan slučaj blok dijagonalne matrice
Izvor: izradio autor

Za $k=1$ imamo matricu drugog reda za koju direktno možemo odrediti vrijednost determinante primjenom Butterfly metodom [5]. Za $k=2$ dobivamo matricu 4. reda gdje prvom primjenom L'aplaceovog razvoja dobivamo dvije matrice 3. reda. Za dobivanje konačnog rezultata potrebno je svaku od matrica 3. reda još jednom razviti po odabranom retku ili stupcu te dobivamo za svaku matricu još jednu matricu 2. reda.

U cilju smanjenja broja koraka predložena je slijedeća formula:

$$\det A = \prod_{i=1, j=n}^{i=\frac{n}{2}, j=\frac{n}{2}+1} (a_{ii}a_{jj} - a_{ij}a_{ji}) \quad (2)$$

Specijalno ukoliko postavimo da su svi elementi na glavnoj dijagonali jednaki a i svi elementi na sporednoj dijagonali imaju vrijednost b onda formulu (2) možemo zapisati i u slijedećem obliku:

$$\det A = (a^2 - b^2)^{\frac{n}{2}} \quad (3)$$

3.1 Dokaz

Za dokaz valjanosti predložene formule (3) koristiti ćemo metodu matematičke indukcije.

1. Jedan od postavljenih uvjeta za specijalni slučaj matrice je da njen red mora odgovarati parnom broju $n=2k$; $k=1,2,3,\dots$ Stoga u prvom koraku provjeravamo valjanost formule za $n=2$ prema poznatoj formuli za određivanje vrijednosti determinante 2. reda:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \longrightarrow a_{11}a_{22} - a_{21}a_{12} \quad (4)$$

Ako specijalno vrijedi za $i=j \Rightarrow a_{ij}=a$ a za $i \neq j, i+j=n+1 \Rightarrow a_{ij}=a_{ji}=b$ izraz (4) dalje možemo pisati

$$\Rightarrow a \cdot a - b \cdot b = (a^2 - b^2) \quad (5)$$

2. Napravimo još jedan među korak i pomoću L'aplaceovog razvoja po 1. retku provjerimo da li je formula zadovoljena za $n=4$

$$\begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{44} \end{vmatrix} = (-1)^{1+1}a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & a_{44} \end{vmatrix} + (-1)^{1+4}a_{14} \begin{vmatrix} 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & a_{32} & a_{33} \\ a_{41} & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (6)$$

Dobili smo dvije determinante trećeg reda na koje ponovno primijenjujemo L'aplaceov razvoj po trećem retku. U prvoj determinanti u tom retku svi elementi su jednaki nuli osim elementa na poziciji (3,3), a u drugoj determinanti u tom retku svi elementi su jednaki nuli osim elementa na poziciji (3,1).

$$\Rightarrow (-1)^{1+1}a_{11}(-1)^{3+3}a_{44}\begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} + (-1)^{1+4}a_{14}(-1)^{3+1}a_{41}\begin{vmatrix} a_{22} & a_{23} \\ a_{32} & a_{33} \end{vmatrix} =$$

$$(-1)^{1+1}a_{11}(-1)^{3+3}a_{44}(a_{22}a_{33}-a_{32}a_{23})+(-1)^{1+4}a_{14}(-1)^{3+1}a_{41}(a_{22}a_{33}-a_{32}a_{23}) =$$

$$(a_{22}a_{33}-a_{32}a_{23})(a_{11}a_{44}-a_{14}a_{41})$$
(7)

Općenito rezultat (7) možemo pisati

$$\begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{44} \end{vmatrix} = \prod_{i=1, j=4}^{i=2, j=3} (a_{ii}a_{jj} - a_{ij}a_{ji})$$
(8)

Ponovno uvodimo uvjet za specijalni slučaj za koji (8) poprima slijedeći oblik za $i = j \Rightarrow a_{ij} = a$ i
za $i \neq j, i + j = n + 1 \Rightarrow a_{ij} = a_{ji} = b$

$$\begin{vmatrix} a & 0 & 0 & b \\ 0 & a & b & 0 \\ 0 & b & a & 0 \\ b & 0 & 0 & a \end{vmatrix} = (a \cdot a - b \cdot b)(a \cdot a - b \cdot b) = (a^2 - b^2)^2$$
(9)

3. Pretpostavka: Za determinantu matrice A (Slika 3.) n -tog reda gdje je $n = 2k$; $k = 1, 2, 3, \dots$ i svi elementi matrice koji nisu na glavnoj ili sporednoj dijagonali su jednaki nuli vrijedi slijedeća formula za određivanje vrijednosti determinante:

$$\det A = \prod_{i=1, j=n}^{i=\frac{n}{2}, j=\frac{n}{2}+1} (a_{ii}a_{jj} - a_{ij}a_{ji})$$
(10)

U specijalnom slučaju za $i = j \Rightarrow a_{ij} = a$ i za $i \neq j, i + j = n + 1 \Rightarrow a_{ij} = a_{ji} = b$ za izraz (10) vrijedi:

$$\det A = (a^2 - b^2)^{\frac{n}{2}}$$
(11)

4. Provjerimo da li je formula zadovoljena za $n + 2$

$$\begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & a_{1(n+2)} \\ 0 & a_{22} & 0 & \dots & 0 & a_{2(n+1)} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & \dots & a_{3n} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & a_{n3} & \dots & a_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & a_{(n+1)2} & 0 & \dots & 0 & a_{(n+1)(n+1)} & 0 \\ a_{(n+2)1} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & a_{(n+2)(n+2)} \end{vmatrix}$$
(12)

$$= (-1)^{1+1} a_{11} \begin{vmatrix} a_{22} & 0 & \cdots & 0 & a_{2(n+1)} & 0 \\ 0 & a_{33} & \cdots & a_{3n} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{n3} & \cdots & a_{nn} & 0 & 0 \\ a_{(n+1)2} & 0 & \cdots & 0 & a_{(n+1)(n+1)} & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & a_{(n+2)(n+2)} \end{vmatrix} + (-1)^{1+n+2} a_{1(n+2)} \begin{vmatrix} 0 & a_{22} & 0 & \cdots & 0 & a_{2(n+1)} \\ 0 & 0 & a_{33} & \cdots & a_{3n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & a_{n3} & \cdots & a_{nn} & 0 \\ 0 & a_{(n+1)2} & 0 & \cdots & 0 & a_{(n+1)(n+1)} \\ a_{(n+2)1} & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (13)$$

Dobili smo dvije determinante reda $n+1$ koje ćemo dalje razviti po posljednjem retku gdje imamo najviše nula. U prvoj determinanti jedino element na poziciji $[(n+1), (n+1)]$ je različit od nule, a u drugoj na poziciji $[(n+1), 1]$.

$$= (-1)^{1+1} a_{11} (-1)^{n+1+n+1} a_{(n+2)(n+2)} \begin{vmatrix} a_{22} & 0 & \cdots & 0 & a_{2(n+1)} \\ 0 & a_{33} & \cdots & a_{3n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{n3} & \cdots & a_{nn} & 0 \\ a_{(n+1)2} & 0 & \cdots & 0 & a_{(n+1)(n+1)} \end{vmatrix} +$$

$$(-1)^{1+n+2} a_{1(n+2)} (-1)^{1+n+1} a_{(n+2)1} \begin{vmatrix} a_{22} & 0 & \cdots & 0 & a_{2(n+1)} \\ 0 & a_{33} & \cdots & a_{3n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{n3} & \cdots & a_{nn} & 0 \\ a_{(n+1)2} & 0 & \cdots & 0 & a_{(n+1)(n+1)} \end{vmatrix} \quad (14)$$

Nakon primjene L'aplaceovog razvoja dobili smo dvije determinante n -tog reda za koje prema pretpostavci vrijedi dana formula. Pa za indekse $i, j = 2, \dots, n+1$ možemo pisati:

$$\begin{vmatrix} a_{22} & 0 & \cdots & 0 & a_{2(n+1)} \\ 0 & a_{33} & \cdots & a_{3n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{n3} & \cdots & a_{nn} & 0 \\ a_{(n+1)2} & 0 & \cdots & 0 & a_{(n+1)(n+1)} \end{vmatrix} = \prod_{i=2, j=n+1}^{i=\frac{n+1}{2}, j=\frac{n+1}{2}+1} (a_{ii} a_{jj} - a_{ij} a_{ji}) \quad (15)$$

Iz početne pretpostavke da je n paran broj vrijedi:

$$(-1)^{1+1+n+1+n+1} = (-1)^{2n+4}$$

$$\Rightarrow n \text{ je paran broj pa je i } 2n+4 \text{ paran broj} \Rightarrow (-1)^{\text{paran broj}} = 1$$

$$(-1)^{1+n+2+1+n+1} = (-1)^{2n+5}$$

$$\Rightarrow n \text{ je paran broj pa je i } 2n+5 \text{ neparan broj} \Rightarrow (-1)^{\text{neparan broj}} = -1$$

Pa izraz (15) možemo napisati u slijedećem obliku:

$$\begin{aligned}
 & \Rightarrow \begin{vmatrix} a_{22} & 0 & \cdots & 0 & a_{2(n+1)} \\ 0 & a_{33} & \cdots & a_{3n} & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & a_{n3} & \cdots & a_{nn} & 0 \\ a_{(n+1)2} & 0 & \cdots & 0 & a_{(n+1)(n+1)} \end{vmatrix} \cdot (a_{11} a_{(n+2)(n+2)} - a_{1(n+2)} a_{(n+2)1}) = \\
 & \prod_{i=\frac{n+1}{2}, j=\frac{n+1}{2}+1}^{i=2, j=n+1} (a_{ii} a_{jj} - a_{ij} a_{ji}) (a_{11} a_{(n+2)(n+2)} - a_{1(n+2)} a_{(n+2)1}) \\
 & = \prod_{i=1, j=n+2}^{i=\frac{n+2}{2}, j=\frac{n+2}{2}+1} (a_{ii} a_{jj} - a_{ij} a_{ji})
 \end{aligned} \tag{16}$$

U specijalnom slučaju za $i = j \Rightarrow a_{ij} = a$ i za $i \neq j, i + j = n + 2 + 1 \Rightarrow a_{ij} = a_{ji} = b$ za (16) dodatno vrijedi:

$$\det A = (a^2 - b^2)^{\frac{n+2}{2}} \tag{17}$$

3.2 Veza s blok dijagonalnom matricom

Uzmimo ponovno za primjer matricu 4. reda (Slika 3.) te na njoj primijenimo elementarne transformacije tako da prvo zamijenimo drugi i posljednji redak, a nakon toga zamijenimo drugi i posljednji stupac

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{44} \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & a_{14} \\ a_{41} & 0 & 0 & a_{44} \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{14} & 0 & 0 \\ a_{41} & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & a_{32} \\ 0 & 0 & a_{23} & a_{22} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Slika 4. Primjena elementarnih transformacija na zadanoj matrici
Izvor: izradio autor

Slika 4. prikazuje blok dijagonalna matrica sa slijedećim blokovima

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{14} \\ a_{41} & a_{44} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} a_{33} & a_{32} \\ a_{23} & a_{22} \end{bmatrix} \tag{18}$$

Za isti specijalni slučaj za $i = j \Rightarrow a_{ij} = a$ i za $i \neq j, i + j = n + 2 + 1 \Rightarrow a_{ij} = a_{ji} = b$

$$A = \begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix} \quad (19)$$

Iz poznate formule (Slika 2.) za određivanje determinante blok dijagonalne matrice ponovno slijedi predložena formula (3).

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu predložena je nova formula za određivanje determinante s ograničenjem da je primjenjiva jedino na blok dijagonalne matrice parnog reda. U specijalnom slučaju kada takva blok dijagonalna matrica na glavnoj dijagonali ima elemente koji su međusobno jednaki te isto vrijedi i za sporednu dijagonalu tada se formula dodatno pojednostavljuje.

Prednost je da s postojećom formulom u ovom specijalnom slučaju moguće je vrijednosti elemenata matrice direktno uvrstiti u predloženu formulu te time ubrzati izračun vrijednosti njenje determinante.

Budući da formula vrijedi jedino za specijalni slučaj matrice parnog reda daljnjim istraživanjem slučajeva matrica neparnog reda mogla bi rezultirati novom formulom te time upotpuniti postupak određivanja vrijednosti determinante za ovaj specijalan slučaj matrice.

LITERATURA

- [1] N. Elezović, Linearna algebra. Zagreb: Element, 1995.
- [2] M. Elouafi, D.A.H. Ahmed, "A New Algorithm for the Determinant and the Inverse of Banded Matrices", *Open Access Library Journal*, 1(03), str.1, 2014.
- [3] Y. Chen, "A new algorithm for computing the determinant and the inverse of a pentadiagonal Toeplitz matrix", *Engineering*, 5(05), str.25., 2013.
- [4] D. Hajrizaj, "New method to compute the determinant of 3×3 matrix", *International Journal of Algebra*, vol. 3, no. 5, pp. 211–219, 2009.
- [5] M.G. Sobamowo, "On the Extension of Sarrus' Rule to Matrices: Development of New Method for the Computation of the Determinant of Matrix", *International Journal of Engineering Mathematics*, 2016.
- [6] R.M. Meyer, "Matrices and Determinants", In *Essential Mathematics for Applied Fields* Springer, New York, NY, str. 395-416. 1979.
- [7] V.C. Mavron, T.N. Phillips, "Matrices and Determinants". *Elements of Mathematics for Economics and Finance*, str.209-232. 2007.
- [8] J.R. Sylvester, "Determinants of block matrices", *The Mathematical Gazette*, 84(501), str.460-467. 2000.

POVRATNO INŽENJERSTVO U ODRŽAVANJU SOFTVERA

Reverse Engineering In Software Maintainance

Kristina Blašković, mag. edus. phys. et inf.
TEMA automatizacija u industriji d.o.o., Pula,
kristina@tema.hr

Sažetak

Održavanje softvera podrazumijeva uvođenje izmjena ili poboljšanja u softver. Prije nego tim razvijача započne s procesom implementacije izmjena bitno je znati koji dijelovi softvera će biti zahvaćeni traženom izmjenom. Kada ovo znanje postane nedostupno uvođenje izmjena postaje zahtjevno, a tim razvijача mora pronaći način za ispravnu implementaciju izmjena. Aktivnosti procesa povratnog inženjerstva provedene na postojećem softveru omogućavaju ekstrakciju znanja, potrebnog za održavanje softvera, iz programskog koda. U ovom radu dan je pregled dosad razvijenih alata koji podržavaju ovaj proces.

Cljučne riječi: Održavanje softvera, povratno inženjerstvo

Abstract

Software maintenance implies introducing changes or improvements into the software. Before, developers start with implementation process it is important to know which parts of the software will be affected by the requested change. In case when this needed knowledge becomes unavailable the team must find the best way how to make changes to the software properly. By conducting reverse engineering process activities on existing software, we obtain the ability to extract the knowledge, required for software maintenance, from the programming code. This paper provides an overview of developed support tools in this process.

Keywords: software maintenance, reverse engineering

1. UVOD

Programski inženjeri kroz proces razvoja softvera grade znanje o softveru [1]. Prelaskom u fazu održavanja i evolucije do kraja životnog ciklusa softvera neprestano se javlja potreba za implementacijom izmjena u softver. Kako bi se izmjena ispravno provela potrebno je poznavati softver. Struktura tima zaduženog za održavanje softvera se kroz vrijeme mijenja, odlaskom glavnih i dolaskom novih razvijача te se bitno razlikuje od strukture tima zaduženog za razvoj istog softvera. Na ovaj način ukupna razina znanja o softveru opada i često postaje nedostatna za nastavak evolucije i održavanja softvera. Razvijачi su primorani osloniti se na dostupnu dokumentaciju, programski kod te komunikaciju s ostalim članovima tima i originalnim razvijачima involviranim u proces razvoja softvera, a sve u svrhu stjecanja odgovarajućih znanja. Međutim, originalni razvijачi često su nedostupni, a tradicionalni način prikupljanja znanja, poput razumijevanja programskog koda (engl. program comprehension), vremenski je i mentalno zahtjevan za razvijачe. Problem ovog rada je kako znanje o softveru učiniti dostupnim i pristupačnim za članove tima zaduženog za održavanje?

Znanje potrebno za održavanje softvera dostupno je u artefaktima softvera te ono mora biti predstavljeno na jednostavan i prirodan način što ga čini pristupačnim i lako upotrebljivim.

2. POVRATNO INŽENJERSTVO

Proces povratnog inženjerstva (engl. reverse engineering, RE) definira metode i alate za prikupljanje znanja

iz softverskih artefakata [2]. To je proces promatranja softverskog sustava bilo koje razine apstrakcije, kako bi identificirali njegove komponente i njihove međusobne veze te predstavili sustav na drugačiji način ili na višoj razini apstrakcije. Sastoji se od dvije podfaze [3]:

1. redokumentiranje (engl. redocumentation), u kojoj se generira semantički ekvivalentna reprezentacija u obliku koji je prirodniji čovjeku
2. oporavak dizajna (engl. design recovery), u kojem se ponovno kreira model sustava na temelju programskog koda, dostupne dokumentacije i znanja o softveru.

Rezultat RE procesa je poboljšana sljedivost (engl. traceability) kroz cijeli životni ciklus softvera što doprinosi razumijevanju cijelog sustava [4].

3. POSTOJEĆI ALATI ZA PODRŠKU RE PROCESU

Web aplikacije obično zahtijevaju čestu i brzu implementaciju izmjena, a Di Lucca, Fasolino, Pace, Tramontana i DeCarlini [5] dali su svoj doprinos rješa-

vanju ovog problema razvojem alata koji se bazira na povratnom inženjerstvu. Alat koristi UML notaciju za predstavljanje ponašanja softvera na različitim razinama apstrakcije dobivenih statičkom i dinamičkom analizom softverskih artefakata. U prvom koraku raščlanjuje se izvorni kod tvoreći međureprezentacijsku formu softvera (engl. Intermediate Representation Form, IRF) u xml obliku gdje oznake (engl. tag) označavaju tip elementa i attribute. Nakon toga pokreće se proces apstrakcije u kojem se IRF prevodi u relacijski model. Sada postoji mogućnost pokretanja predefiniраних upita, koji kao rezultat vraćaju informacije o softveru, na temelju kojih se generira UML reprezentacija. U repozitorij alata spremaju se IRF, relacijski modeli i podaci o softveru,

Veliki kompleksni sustavi podrazumijevaju veće dijelove zastarjelog koda (engl. legacy code) i kolaboraciju većeg broja razvijача na održavanju. To dodatno povećava kompleksnost. U tom slučaju koristi se Columbus [6], još jedan RE alat, koji može analizirati velike, kompleksne softvere u C/C++. Na početku se poziva vanjski program C++ analizator (engl. C++ Analyzer, CAN) koji, postupkom vrlo sličnom radu prevoditelja (engl. Compiler), prihvaća i raščlanjuje programski kod. Kod se analizira kroz dva prolaza, u prvom se detektiraju samo strukture, koje omogućavaju stvaranje nepotpune interne reprezentacije (engl. fuzzy), a nakon toga se pokreće kompletna analiza programskog koda, što omogućava upotpunjavanje interne reprezentacije. Takva interna reprezentacija softvera spremna je za prikaz u odgovarajućem formatu, koji je prihvatljiv korisniku alata.

VARAN [7] je RE alat u kojem generirana dokumentacija softvera na različitim stupnjevima apstrakcije daje generalni pregled softvera s osnovnim programskim strukturama i njihovim vezama. Programski kod je isto dio dokumentacije čime je ostvarena dodatna poveznica ekstrahiranih programskih struktura i formula s dijelovima programskog koda koji ih implementiraju. Prilikom statičke analize najprije se iz apstraktnog sintaktičkog stabla (engl. abstract syntax tree, AST) identificiraju programske strukture i generira se graf poziva (engl. call-graph). On predstavlja relacije između programskih struktura. Prema tim relacijama grupiraju se strukture i identificiraju upiti prema bazi podataka. Općenito se može reći da statička analiza kao rezultat daje tok podataka izvan granica funkcija putem parametara i globalnih varijabli. Tu se iz međuproceduralnih grafova kontrole toka grade lanci sastavljeni od definicija i korištenja varijabli unutar funkcija u toku podataka (engl. use-definition chain). Slično kao i kod statičke analize, prilikom dinamičke analize analiziramo međuproceduralni graf kontrole toka, u kojem se sada umjesto varijabli nalaze njihove trenutne vrijednosti. Te vrijednosti povezujemo s dobivenim lancima korištenja i definicija.

Canfora, Di Penta i Cerulo [2] kao primarni cilj RE procesa postavljaju prikaz softvera na većem stupnju apstrakcije. Budući da se ova aktivnost oslanja na in-

formacije koje se nalaze u bazi podataka od velike je važnosti definirati dobre mehanizme za postavljanje upita nad velikim skupom podataka. U slučaju da se baza sastoji od programskih kodova koriste se mehanizmi za prepoznavanje uzoraka.

Vizualizacija softvera je ključna aktivnost u RE procesu i može uvelike utjecati na pogodnost primjene [2]. Novija istraživanja [8], [9] i [10] u području razumijevanja programskog koda ističu jaz između smjera znanstvenih istraživanja i primjene rezultata u praksi. Razlog tome je što razvijачи već posjeduju određeno iskustvo u radu s neformalnim alatima, dok je alate, koji su rezultat znanstvenog istraživanja potrebno najprije svladati da bi ih se moglo ispravno primijeniti u radu. To zahtjeva dodatan napor i ponovno ulaganje vremena. U procesu razmjene znanja razvijачи se isto tako oslanjaju na neformalne izvore poput komunikacije s članovima tima. Singer, Lethbridge, Vilson i Antiquetil u svom istraživanju [11] u kojem se promatraju i evidentiraju sve aktivnosti razvijача tijekom radnog dana dolaze do rezultata da, kako iskusniji tako i novi, razvijачи ne koriste dokumentaciju softvera već znanje pretežno stječu analizom programskog koda.

4. ANALIZA PROGRAMSKOG KODA

U procesu RE se iz softverskih artefakata izvlače informacije putem analizatora, kroz statičku i dinamičku analizu softvera, i abstraktora, na temelju ekstrahiranih informacija grade se pogledi na softver (engl. software views) [2]. Statički analizatori ne smiju biti ovisni o verziji programskog jezika u kojem je softver izgrađen, moraju imati mogućnost razlučivanja samo elemenata važnih za dani zadatak (npr. samo jedne funkcionalnosti softvera) i semantike. Dinamički analizatori, s druge strane, moraju imati mogućnost prevođenja i izvršavanja programa, mogućnost odabira reprezentativnih ulaza, mogućnost rudarenja velikog skupa izvršnih tragova (engl. execution traces) te mogućnost izvođenja analize crne kutije (kod servisno orijentiranih sustava (engl. service-oriented systems) razvijачи ne mogu pristupiti programskom kodu). Ekstrakcijom informacija iz softverskih repozitorija koji sadrže sve verzije softverskih artefakata možemo provesti analizu povijesti izmjena (engl. historical analysis). Ovakvi analizatori moraju moći klasificirati i kombinirati informacije iz različitih alata koji su podrška procesu implementacije izmjena (npr. sustavi za verzioniranje i sustavi za praćenje grešaka), analizirati razlike među pojedinim verzijama i grupirati povezane izmjene.

Analiza programskog koda je proces ekstrakcije informacija iz softverskih artefakata koje mogu olakšati proces implementacije izmjena, povećati produktivnost razvijача i dati smisao programskom kodu ukoliko su predstavljene na prirodan način [12]. Analizator koda djeluje kao razložitelj (engl. parser) i generira interne reprezentacije (engl. internal representation),

nad kojima se na kraju provodi analiza (engl. analysis of the representation).

Tradicionalni analizatori rade vrlo slično kao i prevoditelji koda (engl. compiler) [13]. Definicija određenog programskog jezika uključuje specifikaciju:

- sintakse, koja definira važeće sekvence simbola
- semantike, koja se može podijeliti u statičku i izvršnu semantiku (engl. static and execution semantic).

U statičkom smislu semantika definira pravila prema kojima su sintaktički točni programi valjani, a u izvršnom smislu specificira što programski kod izračunava. Proces prevođenja započinje sintaksnom analizom koda gdje se najprije skenira programski kod znak po znak, a nizovi karaktera se grupiraju. Te grupe prihvaća razložitelj (engl. parser) koji ih slaže u izraze slijedeći sintaktička pravila. Kao rezultat dobivamo, jedan od oblika interne reprezentacije, AST koje prikazuje strukturu koda. U slijedećem koraku provodi se semantička analiza odnosno prolazi se čvor po čvor AST-a, a identifikatori i njihovi tipovi zapisuju se u tablicu simbola (engl. symbol table). Jednom stvorena tablica simbola nudi pregled tipova svih deklariranih identifikatora što omogućava validiranje izvršnih naredbi na podudarnost tipova. Finalna aktivnost je generiranje semantički vjerne reprezentacije programskog koda.

Ponašanje i funkcionalnosti softvera, koje su zapisane u programskom kodu, definirane su u popratnoj dokumentaciji softvera, a slijedivost (engl. traceability) između dokumentacije, koja je pisana u prirodnom jeziku i dijelova programskog koda možemo dobiti metodom povratka informacija (engl. Information Retrieval, IR) [14]. Metoda se bazira na pretpostavci da programeri oblikuju nazive elemenata na temelju znanja o domeni primjene [15]. Iz programskog koda ekstrahiraju se identifikatori i razdvajaju se riječi u nazivu. Nakon toga kreće proces normalizacije (engl. normalisation):

1. Riječi se konvertiraju u mala slova
2. Uklanjanje se interpunkcija
3. Provodi se morfološka analiza (sve imenice prevode se u jedninu i svi glagoli u infinitiv)

Za svaku komponentu na ovaj način generira se i indeksira upit. Proces normalizacije provodi se zatim i na dokumentima softvera koji su dostupni u repozitoriju. Usporedbom upita i rezultata normalizacije dokumenata dobivamo rangiranu listu dokumenata za svaku komponentu softvera. Tehnika kojom provodimo usporedbu i rezultirajuću rangiranu listu ovisi o tome da li smo odabrali probabilistički (engl. probabilistic) model ili model vektorskog prostora (engl. vector space). U prvom slučaju određena komponenta se rastavlja na skup riječi, a za svaku riječ određuje se vjerojatnost pojavljivanja u određenom dokumentu. Na taj način tvori se matrica vjerojatnosti. Prema vjerojatnostima rangiramo dokumente i određujemo koji dokumenti su najrelevantniji za danu komponentu. Kod modela vektorskog prostora koristimo vektorsku reprezentaciju dokumenata i upita. Za dobivanje komponenti vek-

tora uspoređujemo upite i dokumente koji se sastoje od niza riječi s definiranim riječnikom. Za svaku riječ iz riječnika ovisno o pojavljivanju u upitu ili dokumentu stavljamo 1 ili 0. Postavljanjem ovakve reprezentacije možemo odrediti međusobnu udaljenost pojedinog dokumenta u odnosu na upit. Što je udaljenost manja dokument je relevantniji za upit.

Prema Binkleyju [12] alati koji podupiru proces analize programskog koda ne bi trebali razlagati kompletni kod (engl. compiler-based parser) već je brže i efikasnije izolirati samo dijelove koda koji su važni za određenu svrhu (engl. lighter-weight techniques). Još jedna važna karakteristika koju bi RE alati trebali imati jest mogućnost integracije u razvojno okruženje razvijачa što bi potpomoglo proces upoznavanja i adaptacije te prije novi alat uključio u rad razvijачa [6],[16].

U svijetu razvoja i održavanja softvera za pametne telefone analiza programskog koda koristi se kod detektiranja malicioznih softvera [17]. U tu svrhu potrebno je konstantno nadzirati aktivnosti unutar pojedine aplikacije provođenjem statičkih i dinamičkih analiza. Informacije prikupljene tijekom statičke analize (npr. sumnjive funkcijske pozive ili pristup statički kodiranim URL-ovima) pomoću tehnika strojnog učenja klasificiraju aplikaciju kao štetnu ili sigurnu. Klasifikacija se provodi metodom stroja s potpornim vektorima (engl. Support Vector Machine, SVM) koja omogućava vektorsku reprezentaciju aplikacije. Hiperravnina koja razdvaja štetne od sigurnih aplikacija naučena je na testnom skupu i omogućava nam daljnju klasifikaciju aplikacija.

5. ZAKLJUČAK

Proces povratnog inženjerstva ima obrnuti smjer od procesa razvoja softvera te u slučaju nedostupne ili nepostojeće dokumentacije softvera iz programskog koda generira zahtijevani oblik dokumentacije.

Proces se temelji na statičkoj i dinamičkoj analizi programskog koda, a kao potpora procesu povratnog inženjerstva do danas su razvijeni mnogi alati, koji kombiniraju obje analize kako bi dali potpuniji pogled cjelokupnog softvera.

Međutim novija istraživanja ističu kako alati koje predlaže znanstvena zajednica ne prate u potpunosti potrebe razvijачa, koji se oslanjaju više na neformalne metode i alate te predlažu veći stupanj integracije s razvijачkim alatima kako bi se skratio proces usvajanja novih alata i ubrzao proces povratnog inženjerstva.

LITERATURA

- [1] N. Anquetil, K.M. de Oliveira, K.D. de Sousa, M.G.B. Dias, "Software maintenance seen as a knowledge management issue", *Information and Software Technology*, 49(5), str.515-529. 2007.
- [2] G. Canfora, M. Di Penta, L. Cerulo, "Achievements and challenges in software reverse engineering", *Communications of the ACM*, 54(4), str.142-151. 2011.
- [3] E.J. Chikofsky, J.H. Cross, "Reverse engineering and design recovery: A taxonomy", *IEEE software*, 7(1), pp.13-17. 1990.
- [4] H.A. Müller, J.H. Jahnke, D.B. Smith, M.A. Storey, S.R. Tilley, K. Wong, K., "Reverse engineering: A roadmap", *In Proceedings of the Conference on the Future of Software Engineering ACM*. str. 47-60. 2000
- [5] G.A. Di Lucca, A.R. Fasolino, F. Pace, P. Tramontana, U. De Carlini, "WARE: A tool for the reverse engineering of web applications", *In Software Maintenance and Reengineering, 2002. Proceedings. Sixth European Conference IEEE* , str. 241-250. 2002.
- [6] R. Ferenc, A. Beszédes, M. Tarkiainen, T. Gyimóthy, "Columbus-reverse engineering tool and schema for C++", *In Software Maintenance, 2002. Proceedings. International Conference IEEE*, str. 172-181. 2002.
- [7] W. Kirchmayr, M. Moser, L. Nocke, J. Pichler, R. Tober, "Integration of Static and Dynamic Code Analysis for Understanding Legacy Source Code", *In Software Maintenance and Evolution (ICSME), 2016 IEEE International Conference IEEE*, str. 543-552. 2016.
- [8] W. Maalej, R. Tiarks, T. Roehm, R. Koschke, "On the comprehension of program comprehension", *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM)*, 23(4), str.31. 2014.
- [9] T. Roehm, R. Tiarks, R. Koschke, W. Maalej, "How do professional developers comprehend software?", *In Proceedings of the 34th International Conference on Software Engineering IEEE Press*, str. 255-265. 2012.
- [10] T. Kosar, T., Mernik, M. and Carver, J.C., 2011, June. The impact of tools supported in integrated-development environments on program comprehension. In *Information Technology Interfaces (ITI), Proceedings of the ITI 2011 33rd International Conference on* (pp. 603-608). IEEE.
- [11] J. Singer, T. Lethbridge, N. Vinson, N. Anquetil, "An examination of software engineering work practices", *In CASCON First Decade High Impact Papers IBM Corp.*, str. 174-188. 2010.
- [12] D. Binkley, "Source code analysis: A road map", *In Future of Software Engineering, 2007. FOSE'07 IEEE*, str. 104-119. 2007.
- [13] C. N. Fischer, R.K. Cytron, R.J. LeBlanc, *Crafting a compiler*. Addison-Wesley Publishing Company, 2009.
- [14] G. Antoniol, G. Canfora, G. Casazza, A. De Lucia, E. Merlo, "Recovering traceability links between code and documentation", *IEEE transactions on software engineering*, 28(10), str.970-983. 2002
- [15] T.J. Biggerstaff, "Design recovery for maintenance and reuse", *Computer*, 22(7), str.36-49. 1989.
- [16] G. CanforaHarman, M. Di Penta, "New frontiers of reverse engineering", *In 2007 Future of Software Engineering IEEE Computer Society*, str. 326-341. 2007.
- [17] M. Spreitzenbarth, T. Schreck, F. Ehtler, D. Arp, J. Hoffmann, "Mobile-Sandbox: combining static and dynamic analysis with machine-learning techniques", *International Journal of Information Security*, 14(2), str.141-153. 2015.

PRIMJERI HOLONOMIJE U FIZICI

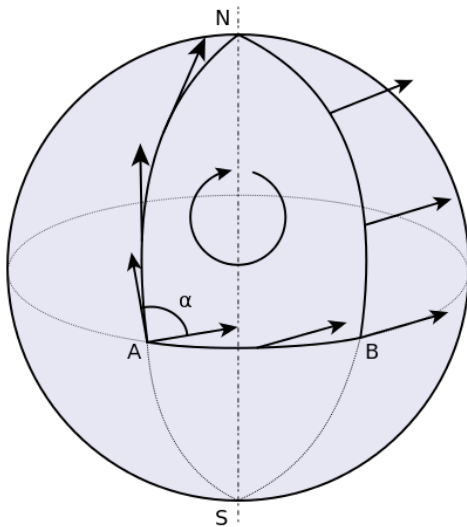
Anton Perkov, mag.phys.

Sažetak

Predstavljene su definicije paralelnog transporta, grupe holonomije i restringirane holonomije, te neke poveznice s diferencijalnom geometrijom, topologijom, i povijesti fizike. Pokazani su geometrijski izvodi kuta rotacije Foucaultovog njihala i Thomasove precesije pomoću metode tangencijalnih stožaca. Iznesen je kvantni adijabatski teorem i objašnjeno porijeklo Berryjeve faze, te njena uloga u Aharonov-Bohm efektu.

1. UVOD

U geometriji (poglavito Riemannovoj geometriji) je poznat problem opisa paralelnog prijenosa vektora po zakrivljenim mnogostrukostima, ilustriran na Slici 1. Do kraja 19. stoljeća je problem većim dijelom bio kvalitativne prirode, bez dovoljno sofisticiranih alata za rješavanje.



Slika 1: Prikaz skretanja vektora paralelnim prijenosom duž sfere po točkama $A \rightarrow N \rightarrow B \rightarrow A$, te razlika početnog i završnog stanja u kutu α .

Usporednim razvitkom alata diferencijalne geometrije i teorije grupa, naročito teorije Liejevih grupa i algebarske topologije, otvoren je put preciznoj definiciji holonomije, opisa paralelnog prijenosa i povezivanjem s lokalnim i globalnim svojstvima mnogostrukosti, od čega je najpoznatiji rezultat Ambrose-Singer teorem iz 1953., međutim, za nabrojati njegove fizikalne primjene u teoriji struna i LQG ovdje nema mnogo mjesta.

U klasičnoj fizici je uloga holonomije u opisu pojava manje zastupljena nego u modernoj fizici, uglavnom

zato što je E. Cartan definirao holonomiju tek 1926. godine iz apstraktnih motivacija, željevši dublje proučiti i klasificirati simetrične mnogostrukosti. Uloga joj prominentno raste u teorijskoj fizici tek šezdesetih i sedamdesetih godina, gdje joj počinje primjena u unificirajućim i baždarnim teorijama izraslih iz QFT-a. Uloga u opisu klasične i nerelativističke kvantne fizike postaje očita kasnije, počevši s [2] koji prepoznaje važnost geometrijske faze u adijabatskom procesu iz [8], što je opisano u jednom od idućih poglavlja. No, za precizan opis holonomije u tim fenomenima potrebno je shvatiti o čemu je uopće riječ. Stoga je u nastavku izloženo nekoliko osnovnih definicija.

Neka je (E, π, M, F, G) glatki vektorski svežanj nad diferencijabilnom mnogostrukosti M , te neka je $U \subset M$ otvoreni skup, a $I = [a, b] \subset \mathbb{R}$ interval. Označimo s $\Gamma(E, U)$ skup prereza u totalnom prostoru E nad područjem $U \subset M$, a s $\Gamma(E)$ skup prereza u E nad čitavim baznim prostorom M .

Def. 1 Neka je $\gamma: I \rightarrow M$ po dijelovima gladak put. Za $\sigma \in \Gamma(E, U)$ definiramo

$$\dot{\gamma}(t) \equiv \frac{d}{dt} \gamma(t) \equiv \dot{\gamma}^i(t) \left(\frac{\partial}{\partial x^i} \right)_{\gamma(t)} \in \Gamma(TM)$$

Gornja definicija se može shvatiti kao rastav pune derivacije d/dt na linearnu kombinaciju parcijalnih derivacija (vektora baze u tangentnom prostoru).

Def. 2 (Paralelni transport [1]): Prerez $\sigma(t) \in \Gamma(E)$ je paralelan duž $\gamma(t)$ ako vrijedi

$$\nabla_{\dot{\gamma}(t)} \sigma(t) = 0, \forall t \in I. \quad (1)$$

Paralelni transport vektora $v_0 \in E_p$ iz točke $P = \gamma(a) \in M$ u točku $\gamma(t)$ je preslikavanje

$$\tau_{\gamma(t)}: E_{\gamma(a)} \rightarrow E_{\gamma(t)},$$

dano rješenjem sustava (1) s početnim uvjetom $\sigma(a) = v_0$.

Gornja definicija, u osnovi, kaže da paralelni transport kao ulaz uzima početni vektor v_0 i izbacuje taj vektor pomaknut po krivulji do proizvoljne točke $\gamma(t)$.

U idućoj definiciji se podrazumijeva da je definirana koneksija ∇ , međutim ona neće biti eksplicitno potrebna za primjene koje će doći kasnije, a sve tehničke detalje zapravo sređuje kovarijantna derivacija ∇_x , tako da će se koneksija ∇ pojavljivati samo kao formalna, knjigovodstvena oznaka.

Prije same definicije, valja primjetiti da je τ_γ linearno i invertibilno preslikavanje. Linearnost je naslijeđena iz vektorske strukture prostora E , a invertibilnost je posljedica jedinstvenosti rješenja sustava (1) s početnim uvjetom, koja pak (skupa s egzistencijom rješenja) proizlazi iz Picard-Lindelöf teorema (poznatog i pod imenom Cauchy-Lipschitz teorem). Stoga je $\tau_\gamma \in GL(E_x)$, odnosno moguće je definirati $(\tau_\gamma)^{-1}$.

Def. 3 (Grupa holonomije [1]) Grupa holonomije u točki $x \in M$ definirana je kao skup paralelnih pomaka nad svim zatvorenim krivuljama koje prolaze kroz tu točku, odnosno

$$Hol_x(\nabla) = \{\tau_\gamma \in GL(E_x) | \gamma(a) = \gamma(b) \& \exists t_0 \in I, \gamma(t_0) = x\} \quad (2)$$

Restrignirana grupa holonomije je podgrupa $Hol_x^0(\nabla) \subset Hol_x(\nabla)$ sastavljena od paralelnih pomaka nad krivuljama γ koje su kontraktibilne, odnosno u istoj klasi homotopije kao točka.

Jednostavno je uvjeriti se kako obje holonomije doista zadovoljavaju svojstva grupe [1]:

- Grupa je zatvorena obzirom na konkatenciju paralelnih prijenosa duž zatvorenih krivulja $\gamma(t)$ i $\gamma'(t)$, jer se od njih može konstruirati nova krivulja (u reparametriziranoj domeni $I = [0,1]$):

$$d(t) = \begin{cases} \gamma(2t), & 0 \leq t \leq 1/2 \\ \gamma'(2t-1), & 1/2 \leq t \leq 1 \end{cases},$$

- Grupa je asocijativna (očito iz gornje konstrukcije i iz $\tau_\gamma \in GL(E_x)$),

- Neutralni element je trivijalna petlja $\gamma(t) = x_0 \in M$,

- Inverzni element preslikavanja duž petlje je preslikavanje duž iste petlje u suprotnom smjeru, odnosno

$$(\gamma(t))^{-1} = \gamma(1-t).$$

Pomoću ovih grupa moguće je konstruirati i fundamentalnu grupu pojedine mnogostrukosti:

$$\pi_1(M) = Hol_x(\nabla)/Hol_x^0(\nabla).$$

Očigledno, ako je mnogostrukost jednostavno povezana, tada su ove dvije grupe holonomije izomorfne i fundamentalna grupa je trivijalna. Također, ukoliko je mnogostrukost M ravna (odnosno Riemannov tenzor R^a_{bcd} iščezava), tada je grupa holonomije trivijalna. Opće poznata je i činjenica da je paralelni transport duž geodezika mnogostrukosti također identiteta [1].

2. FOUCAULTOVO NJHALO

Opis rotacije ravnine njihanja Foucaultovog njihala se u klasičnoj mehanici obično dobiva iz djelovanja Coriolisove sile, dane formulom [3]

$$\vec{F}_C = 2m\vec{v} \times \vec{\Omega}, \quad (3)$$

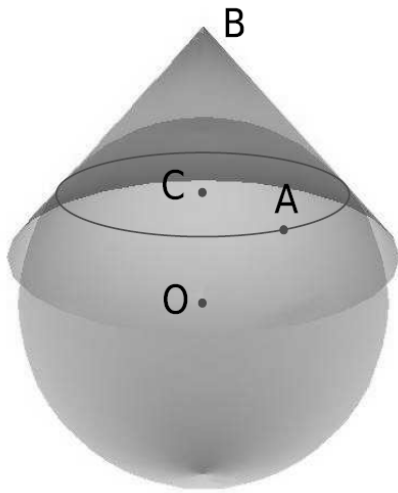
gdje je $\vec{v}$ brzina tijela na Zemljinoj površini, a $\vec{\Omega}$ kutna brzina Zemljine rotacije.

Takav pristup daje formulu zakretanja ravnine njihanja nakon jednog sideričkog dana, odnosno jedne rotacije Zemlje oko svoje osi u odnosu na daleke zvijezde, u adijabatskoj aproksimaciji, odnosno gdje je kut njihanja malen, a period njihanja mnogo manji od perioda rotacije Zemlje (vidi npr.[7], str 132; ondje je dan $\Omega_z = \dot{\phi}_E$):

$$\varphi_E = -2\pi \cos \theta_0, \quad (4)$$

gdje je φ_E kut za koji se ravnina zakrene nakon jednog dana, a θ_0 polarni kut, povezan s geografskom širinom α preko $\theta_0 = \frac{\pi}{2} - \alpha$. Međutim, takvo je ponašanje moguće izvesti geometrijski, pomoću paralelnog transporta [3].

Označimo s M sferu koja predstavlja idealiziranu Zemljinu površinu. Prvo valja primjetiti kako je $\vec{v} \in TM$, te je za neku odabranu geografsku širinu θ_0 moguće konstruirati podsvežanj na sferu u obliku stošca, što je prikazano na Slici 2.



Slika 2: Geometrijski prikaz podsvežnja na sferi za odabrani $\theta_0 = \angle(COA)$. Ovdje je A proizvoljna početna točka na kružnici, dok je C središte te kružnice. Figura je orijentirana tako da je B iznad sjevernog pola, no analogna analiza se može napraviti i za južni pol.

Uzmimo da je radijus Zemlje jediničan, te ispisujemo vektore:

$$\overrightarrow{OA} = (\hat{n} \sin \theta_0, \cos \theta_0), \quad (5)$$

$$\overrightarrow{CA} = (\hat{n} \sin \theta_0, 0), \quad (6)$$

$$\overrightarrow{BA} = (\hat{n} \sin \theta_0, -\frac{\sin^2 \theta_0}{\cos \theta_0}), \quad (7)$$

gdje je $\hat{n} = (\cos \varphi, \sin \varphi)$ jediničan vektor u ravni kružnice. Komponenta z vektora (7) je dobivena iz zahtjeva ortogonalnosti tangentnog vektora na sferu, odnosno

$$\overrightarrow{BA} \cdot \overrightarrow{OA} = 0. \quad (8)$$

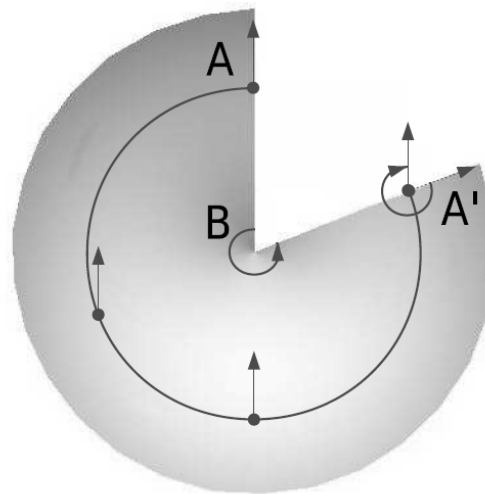
Inducirana metrika na stošcu je Euklidska, i moguće je odabrati koordinatni sustav (ρ, φ) , gdje je ρ udaljenost točke na stošcu od točke B , a φ azimutalni kut definiran u odnosu na točku A na sferi. Metrika na stošcu tada postaje

$$g = d\rho \otimes d\rho + \rho^2 \cos^2 \theta_0 d\varphi \otimes d\varphi. \quad (9)$$

Reskaliranjem varijabli $\varphi \rightarrow \varphi / \cos \theta_0$ (što je moguće jer je θ_0 konstantan) metrika stošca prelazi u uobičajenu metriku polarnog sustava u ravнини.

Ovim postupkom je efektivno uspostavljen difeomorfizam između polarne ravnine $\mathbb{R}^2$ i stošca kao tangencijalne mnogostrukosti na sferu u $\mathbb{R}^3$, što omo-

gućuje analizu paralelnog transporta. U uvodu je već naglašeno da je grupa holonomije trivijalna za mnogostrukosti s iščezavajućim Riemannovim tenzorom (odnosno ravnim mnogostrukostima), što znači da paralelni transport po bilo kojoj zatvorenoj krivulji ne mijenja vektor (u uobičajenom Euklidskom smislu), kao što je prikazano na Slici 3 za slučaj pomicanja vektora po dodirnoj kružnici stošca i sfere. Drugim riječima, vektor je invarijantan na djelovanje elemenata holonomije [1].



Slika 3: Stožac iz Slike 2 izrezan duž linije BA i izravnat (čuvajući udaljenosti) u ravninu. Točke B i A su iste kao sa Slike 2, dok se točka A' pojavila kao posljedica rezanja stošca, te ona u izvornoj slici koincidira s A .

U točki A' su za usporedbu prikazani početni vektor i vektor dobiven paralelnim pomakom duž dodirne kružnice stošca i sfere, te je evidentno kako ta dva vektora nisu identična. Štoviše, moguće je mentalno konstruirati rotaciju vektora u smjeru kazaljke na satu dok se sam vektor transportira u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Ukoliko se uzme da vektor pokazuje duž ravnine rotacije, vidljiv je geometrijski argument za rotaciju ravnine njihanja Foucaultovog njihala. [3]

Ostaje još pitanje dobivanja formule (4) geometrijskim argumentom. Kut φ_E u radianima je moguće dobiti iz omjera duljine kružnog luka $|AA'| = 2\pi|CA|$ (u smjeru suprotnom od kazaljke na satu) i radijusa $|BA|$:

$$\varphi_E = -\frac{2\pi|CA|}{|BA|} = -2\pi \cos \theta_0. \quad (10)$$

Negativni predznak u formuli dolazi od činjenice da je rotacija vektora u smjeru kazaljke na satu. Iz formule je vidljivo da najveću dnevnu precesiju ($\varphi_E = -2\pi$, odnosno $\varphi_E/24h = -15^\circ$) imaju polovi (geometrijski, za njih je slika 2 puni krug). Ravnina njihanja se ne rotira na ekvatoru (za nju slika 2 u limesu $\theta \rightarrow \pi/2$ postaje

iščezavajući kružni isječak), što je konzistentno s činjenicom da je ekvator geodezik sfere. [7]

Za usporedbu, uvrštavanjem geografske širine Zagreba ($\alpha = 90^\circ - \theta_0 = 45^\circ 50'$) dobije se $\varphi_E/24h \approx -10.76^\circ/h$.

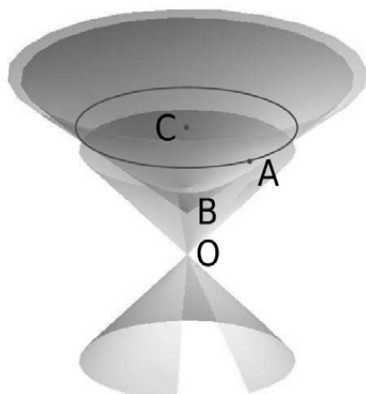
3. THOMASOVA PRECESIJA

U specijalnoj teoriji relativnosti, kompozicija dva nekolinearna Lorentzova potiska (boosta) općenito rezultira Lorentzovom transformacijom koja nije čisti potisak, već kombinacija potiska i prostorne rotacije, što je moguće vidjeti iz algebre Poincaréove grupe, o čemu je par crtica moguće naći u Dodatku B. Fenomen je poznat kao Wignerova rotacija ili Thomasova precesija, i dana je formulom [3]

$$\phi_E = -2\pi\gamma, \quad (11)$$

gdje je γ standardan Lorentzov faktor konačnog Lorentz-potisnutog sustava, a ϕ_E kut precesije, odnosno odklon brzine nakon dva nekolinearna potiska. Taj je rezultat moguće dobiti na nekoliko načina (npr. [6]), no ovdje će fokus biti na sličnoj geometrijskoj metodi kao ranije za Foucaultovo njihalo.

Pretpostavljamo prostorvrijeme Minkowskog s metrikom $g_{\mu\nu} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$, pa četverbrzina $u^\mu = (\gamma, \gamma\vec{v})$ zadovoljava $u^2 = 1$ (koristimo konvenciju $c = 1$). Ove relacije definiraju prostor brzina kao hiperboloid na suprotnim stranama svjetlosnog stošca, od kojih je onaj u budućnosti prikazan na Slici 4. [3]



Slika 4. Trodimenzionalna projekcija 4D prostora brzina. Prikazan je hiperboloid skupa sa svjetlosnim stošcem i stošcem s apeksom u B tangentnim na hiperboloid u svim točkama s istim γ kao A.

Čestica može zakretanjem u prostoru poprimiti bilo koju od brzina s kružnice s centrom u točki C. Vektori koji opisuju hiperboloid i odnose među označenim točkama:

$$\overrightarrow{OA} = (\gamma, \hat{n}\gamma v), \quad (12)$$

$$\overrightarrow{CA} = (0, \hat{n}\gamma v), \quad (13)$$

$$\overrightarrow{BA} = (\gamma v^2, \hat{n}\gamma v), \quad (14)$$

gdje je, slično kao prije, $\hat{n} = (\cos \phi, \sin \phi, 0)$ jedinični vektor u ravnini kružnice sa središtem u C, a prva komponenta vektora $\overrightarrow{BA}$ dobivena iz uvjeta da je taj vektor ortogonalan na hiperbolu obzirom na metriku Minkowskog, odnosno

$$g_{\mu\nu}(\overrightarrow{BA})^\mu(\overrightarrow{OA})^\nu = 0. \quad (15)$$

Gornje jednačbe su slične onima dobivenima za sferu, tj. (5)-(8).

Dobivanje inducirane metrike na stošcu zahtijeva drugačiji pristup u odnosu na sferu. Proizvoljna točka x na stošcu je opisana radijvektorom iz B:

$$\overrightarrow{BX} = \rho(v, \hat{n}), \quad (16)$$

Variranjem $\overrightarrow{BX}$ po ρ i ϕ , odnosno raspisivanjem diferencijalne forme po komponentama, dobiva se

$$d\overrightarrow{BX} = \frac{\partial \overrightarrow{BX}}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial \overrightarrow{BX}}{\partial \phi} d\phi \quad (17)$$

$$= d\rho(v, \hat{n}) + \rho(0, d\hat{n}), \quad (18)$$

gdje je $d\hat{n} = (-\sin \phi, \cos \phi, 0)d\phi$. Primjetimo da vrijedi $\hat{n} \cdot d\hat{n} = 0$.

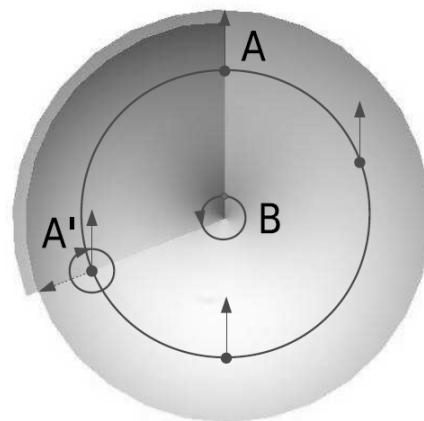
Metrika na stošcu dobiva se kontrahiranjem dvije 1-forme iz (18) metrikom Minkowskog:

$$g = \frac{1}{\gamma^2} d\rho \otimes d\rho + \rho^2 d\phi \otimes d\phi, \quad (19)$$

odnosno reskaliranjem varijabli $\phi \rightarrow \gamma\phi$ i $\rho \rightarrow \gamma\rho$ dobiva se

$$g = d\rho \otimes d\rho + \rho^2 d\phi \otimes d\phi, \quad (20)$$

dakle ponovno je dobivena euklidska metrika u polarnom sustavu. Stoga se, analogno kao sa sferom, stožac može razrezati duž linije BA, razmotati tako da se sačuvaju udaljenosti i kutevi i položiti na ravninu, kao na Slici 5.



Slika 5. Stožac iz Slike 4, izrezan duž linije BA i izravnat (čuvajući udaljenosti i kuteve) u ravninu. Točke B i A su iste kao sa Slike 4, dok se točka A' pojavila kao posljedica rezanja stošca, te ona u izvornoj slici koincidira s A'.

Postupak dobivanja kuta Thomasove precesije je sličan kao za dobivanje kuta rotacije Foucaultovog njihala [3]: potrebno je podijeliti duljinu luka $|AA'|$ s radijusom kružnice $|\overline{BA}|$, odnosno u konačnici se dobije

$$\phi_E = -\frac{2\pi|\overline{CA}|}{|\overline{BA}|} = -2\pi\gamma. \quad (21)$$

Kao i prije, negativan predznak dolazi od činjenice da čestica precesira u smjeru kazaljke na satu dok se u u prostoru njezina brzina rotira suprotno od kazaljke na satu, što je vidljivo na Slici 5.

4. BERRYJEVA FAZA

Berryjeva faza je, kao i rotacija ravnine njihanja Foucaultovog njihanja i Thomasova precesija, primjer neholonomne pojave. To znači da, tijekom nekog zatvorenog ciklusa, gdje je završna točka jednaka početnoj, rezultatno stanje nije jednako početnom (vidjeti npr. [4], str. 333 i [1], str. 369). U slučaju Foucaultovog njihala i Thomasove precesije radilo se o jednostavnoj cikličnoj promjeni nekog realnog parametra u prostoru. Za matematički opis Berryjeve faze (primjera neholonomije u kvantnoj fizici) potrebno je, pak, poznavati kvantni adijabatski teorem [2].

Tm. 1 (Kvantni adijabatski teorem) Neka je $H(t)$, $0 \leq t \leq 1$ glatki Hamiltonijan, i neka je $E(t) \in C^\infty$ izolirana nede degenerirana svojstvena vrijednost Hamiltonijana za svaki t . Neka je $\psi_T(s)$ rješenje Schrödingerove jednadžbe

$$i\hbar \frac{d}{ds} \psi_T(s) = H(s/T) \psi_T(s), \quad (22)$$

s početnim uvjetom $\psi_T(0) = \phi_0$, gdje vrijedi $H(0)\phi_0 = E(0)\phi_0$. Tada vrijedi

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \psi_T(T) = \phi_1, \quad (23)$$

gdje je ϕ_1 svojstveno stanje Hamiltonijana $H(1)$, odnosno

$$H(1)\phi_1 = E(1)\phi_1. \quad (24)$$

Dokaz teorema se može naći npr. u [4], str. 327.

Slično kao u klasičnoj mehanici, adijabatska promjena je promjena vanjskih uvjeta sustava koja se događa veoma polako. To je ovdje označeno limesom $T \rightarrow \infty$, gdje je T omjer vremenskih skala adijabatske promjene i dinamike sustava (tzv. karakterističnih vremena).

Teorem kaže da, u adijabatskoj aproksimaciji, sustav koji se nalazi u osnovnom svojstvenom stanju Hamiltonijana i nakon promjene ostaje u tom osnovnom stanju, iako na kraju procesa Hamiltonijan i svojstvena stanja mogu imati sasvim drugačije funkcionalne oblike od početnog (vidi npr. [4], str. 324).

Uzmimo sad općeniti hermitski operator $\hat{A}(x)$ ovisan o skupu parametara x , s izoliranom nede degeneriranom svojstvenom vrijednošću $E(x)$. Tada pridruženi svojstveni vektor definira vlakno svežnja nad parametarskim prostorom [2], tj.

$$F = \{(x, \phi) | \hat{A}(x)\phi = E(x)\phi\}. \quad (25)$$

Neka je $c(t)$ zatvorena krivulja u tom parametarskom prostoru, takva da je $\hat{A}(c(t)) \equiv H(t)$ te da zadovoljava uvjete adijabatskog teorema. Tada proizlazi da su ϕ_1 i ϕ_0 vezani do na fazni faktor. [8]

M.V.Berry je 1984. godine uvidio da ta faza, uz uobičajeni dinamički faktor, sadrži i dodatan član, odnosno da je cijeli izraz oblika

$$\phi_1 = \exp \left[-\frac{i}{\hbar} \int_0^T E(s/T) ds \right] \exp[i\gamma(C)] \phi_0 \quad (26)$$

gdje je $\gamma(C)$ tzv. geometrijska ili Berryjeva faza, ovisna o obliku putanje u parametarskom prostoru. Drugim riječima, iako se Hamiltonijan vratio u početni oblik, stanje sustava nije potpuno identično početnom. Dobivenu geometrijsku fazu je moguće čak i eksperimentalno izmjeriti (za detalje vidjeti [8]).

Ukoliko se oblik valne funkcije iz (26) ubaci u Schrödingerovu jednadžbu (22), dobije se jednadžba evolucije geometrijske faze:

$$\frac{\partial}{\partial t} \psi_n + i \psi_n \frac{d}{dt} \gamma_n = 0, \quad (27)$$

gdje indeks n označava n -to svojstveno stanje Hamiltonijana H . Uz razumnu pretpostavku da su stanja ortonormirana, uzimanjem skalarnog produkta gornje jednadžbe dobiva se

$$\frac{d}{dt} \gamma_n = i \langle \psi_n | \frac{\partial}{\partial t} \psi_n \rangle. \quad (28)$$

Parcijalnu derivaciju funkcije je moguće rastaviti po lančanom pravilu na iduću sumu:

$$\frac{\partial}{\partial t} \psi_n = \sum_{i=1}^N \frac{\partial \psi_n}{\partial t} \frac{dR_i}{dt} = (\nabla_R \psi_n) \cdot \frac{dR}{dt}, \quad (29)$$

gdje su R_i parametri Hamiltonijana koji prolaze kroz

adijabatsku promjenu. Radi ekonomičnosti zapisa dalje podrazumijevamo da je R vektor. Uvrštavanjem u jednadžbu (28) slijedi

$$\frac{d\gamma_n}{dt} = i \langle \psi_n | \nabla_R \psi_n \rangle \cdot \frac{dR}{dt}, \quad (30)$$

odnosno integracijom se dobiva

$$\gamma_n(T) = i \int_{t_1}^{t_2} \langle \psi_n | \nabla_R \psi_n \rangle \cdot \frac{dR}{dt} dt = i \int_{R_1}^{R_2} \langle \psi_n | \nabla_R \psi_n \rangle \cdot dR \quad (31)$$

Kako nas zanimaju zatvoreni neholonomni procesi, gornja i donja granica integracije su iste, pa je Berryjeva (geometrijska) faza dana kružnim integralom

$$\gamma_n(T) = i \oint \langle \psi_n | \nabla_R \psi_n \rangle \cdot dR, \quad (32)$$

koji je općenito različit od nule.

Kako je $\gamma_n(T)$ realan (jer se pojavljuje kao fazni faktor u (26)), kružni integral od $\langle \psi_n | \nabla_R \psi_n \rangle$ je nužno imaginaran. Ukoliko su svojstvene funkcije Hamiltonijana realne, tada je gornji izraz istovremeno realan i imaginaran, tj. jednak nuli, pa Berryjeva faza u tom slučaju iščezava.

5. AHARONOV-BOHM EFEKT

Iz teorije polja je poznat princip lokalne baždarnosti invarijantnosti jednadžbi na izbor potencijala [5]:

$$A_\mu \rightarrow A'_\mu = A_\mu + \partial_\mu \Lambda, \quad (33)$$

gdje je Λ proizvoljna funkcija vremenske i prostornih koordinata. Taj se princip obilato koristi i u klasičnoj elektrodinamici (za primjere vidjeti [9], str. 419). Zanimljivost kvantnomehaničke prirode se pojavljuje u vidu toga što Schrödingerova jednadžba ne barata s poljima, već s potencijalima, pa u tom slučaju zbog kanonske supstitucije Hamiltonijan poprima oblik ([4], str. 343)

$$H = \frac{1}{2m} (i\hbar \nabla + q\vec{A})^2 + q\phi, \quad (34)$$

gdje je $\phi \equiv A^0$ vremenski, a $\vec{A} \equiv (A^1, A^2, A^3)$ prostorni dio 4-potencijala. Kvantna teorija je i dalje baždarno invarijantna, no Aharonov i Bohm su 1959. pokazali da, čak i kad je vanjsko polje $\vec{E} = \vec{B} = 0$, kvantna čestica osjeća utjecaj potencijala. [10]

Neka se čestica s nabojem q giba kroz prostor gdje je $\vec{B} = 0$, ali $\vec{A} \neq 0$. Vremenski ovisna Schrödingerova

jednadžba tada glasi

$$\left(\frac{1}{2m} (i\hbar \nabla + q\vec{A})^2 + V \right) \psi = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi, \quad (35)$$

gdje potencijal V može i ne mora sadržavati ovisnost o električnom potencijalu $q\phi$.

Pretpostavimo da $\vec{A}$ ne ovisi o t . Moguće je provesti transformaciju iz [10], danu sa

$$\psi = e^{ig} \psi', \quad (36)$$

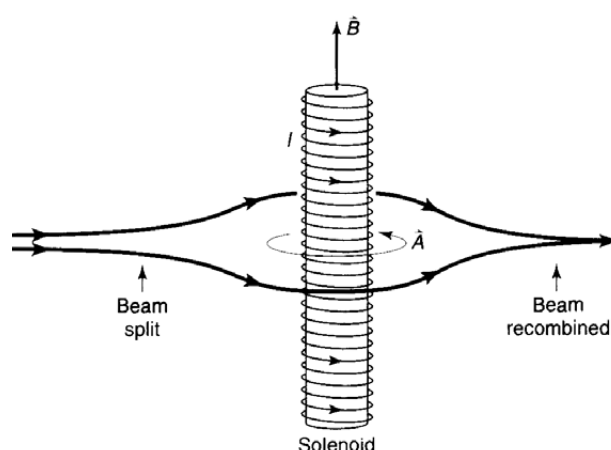
gdje je (za $\nabla \times \vec{A} = \vec{B} = 0$)

$$g(r) = \frac{q}{\hbar} \int_0^r \vec{A} \cdot d\vec{r}', \quad (37)$$

a izbor donje granice integracije je proizvoljan. Uvrštavanjem u (35) se može dobiti da ψ' zadovoljava standardnu Schrödingerovu jednadžbu:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \psi' = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi'. \quad (38)$$

Aharonov i Bohm su u [10] predložili nekoliko eksperimenata kojima bi izmjerili g . Postav jednog od njih je dan na slici 6.



Slika 6. Eksperimentalni postav Aharonov-Bohm efekta. Snop elektrona se rascijepi na dva i rekombinira nakon prolaska oko zavojnice.

Neka su elektroni dovoljno daleko od konačne zavojnice da je $B = 0$. Potencijal je dan sa $\vec{A} = \frac{\phi}{2\pi r} \hat{\phi}$, gdje je ϕ tok magnetskog polja unutar zavojnice, pa fazna

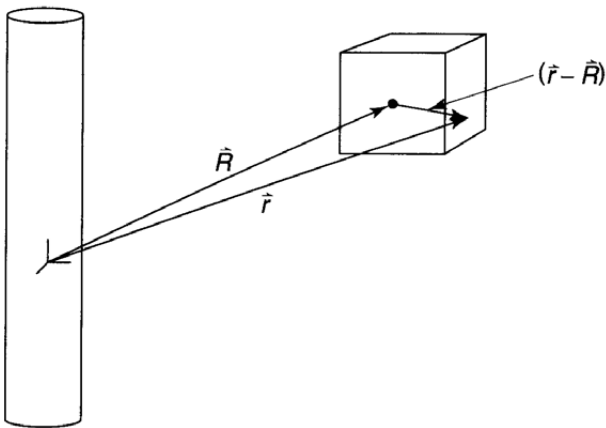
transformacija glasi

$$g(r) = \frac{q}{\hbar} \int_0^r \vec{A} \cdot d\vec{r}' = \frac{q\Phi}{2\pi\hbar} \int \left(\frac{\hat{\phi}}{r}\right) \cdot (r\hat{\phi}d\phi) = \pm \frac{q\Phi}{2\hbar}. \quad (39)$$

Suprotni predznaci dolaze od toga što elektroni mogu putovati paralelno ili antiparalelno u odnosu na A oko zavojnice. Stoga snopovi dolaze na cilj s ukupnom faznom razlikom $\frac{q\Phi}{\hbar}$, koju je moguće izmjeriti kao interferenciju. Između ostalog, to omogućuje eksperimentalno istraživanje abelovih *anyona* (čestice koje zadovoljavaju statistike na skali između fermionske i bozonske), npr. vođenjem elektrona unutar grafe na oko idealno tanke zavojnice. Otvorena je tema mogu li se na takav način simulirati neabelovi *anyoni*, odnosno *anyoni* čija dodatna faza nije kompleksan broj već unitarna matrica.

Iznenadjujuće je što se Aharonov-Bohm efekt može opisati geometrijski kao primjer Berryjeve faze, i to čak van adijabatskog režima. To se moglo naslutiti iz (36) i (37): valna funkcija uz dinamičku fazu opet dobije dodatan fazni faktor ovisan o opisanom putu u konfiguracijskom prostoru, koji se u ovom slučaju uzima kao parametarski prostor. Berry je tu vezu pokazao u [8] slijedećim izvodom.

Neka je dana čestica naboja q zatočena u kutiji centriranoj u točki $\vec{R}$ izvan zavojnice, pa je vrijednost potencijala ograničena na skup vrijednosti $V(\vec{r} - \vec{R})$, gdje je $\vec{r}$ radijvektor čestice. Situacija je prikazana na slici 7.



Particle confined to a box, by a potential $V(\mathbf{r} - \mathbf{R})$.

Slika 7: Skica uz izvod veze između Aharonov-Bohm efekta i Berryjeve faze

Svojstvene funkcije Hamiltonijana su u tom slučaju dane Schrödingerovom jednačinom:

$$\left(\frac{1}{2m} (i\hbar\nabla + q\vec{A}(\vec{r}))^2 + V(\vec{r} - \vec{R})\right) \psi_n = E_n \psi_n, \quad (40)$$

Uz uvođenje supstitucija analognih s (36) i (37) moguće je dobiti Schrödingerovu jednačinu za ψ'_n :

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\vec{r} - \vec{R})\right) \psi'_n = E_n \psi'_n, \quad (41)$$

Bitno je napomenuti kako je tim postupkom, kojeg je instruktivno samostalno raspisati, dobiven ψ'_n kao funkcija razlike $(\vec{r} - \vec{R})$, za razliku od ψ_n koji je funkcija zasebnog $\vec{r}$ i $\vec{R}$.

Kako bi se dobio globalan rezultat koristan za integraciju, potrebno je kutiju s česticom pomakati oko zavojnice. Za usporedbu s Berryjevom fazom potrebno je dobiti podintegralni skalarni produkt iz (32), sa skupom parametara $\vec{r} \rightarrow \vec{R}$.

Kako je

$$\nabla_R (e^{ig} \psi'_n(\vec{r} - \vec{R})) = -\frac{iq}{\hbar} \vec{A}(\vec{R}) e^{ig} \psi'_n(\vec{r} - \vec{R}) + e^{ig} \nabla_R \psi'_n(\vec{r} - \vec{R}) \quad (42)$$

tako je skalarni produkt (definiran u L^2 prostoru) dan sa

$$\begin{aligned} \langle \psi_n | \nabla_R \psi_n \rangle &= \int e^{-ig} (\psi'_n(\vec{r} - \vec{R}))^* e^{ig} \left(-\frac{iq}{\hbar} \vec{A}(\vec{R}) \psi'_n(\vec{r} - \vec{R}) \right. \\ &\quad \left. + \nabla_R \psi'_n(\vec{r} - \vec{R}) \right) d^3r \\ &= -\frac{iq}{\hbar} \vec{A}(\vec{R}) - \int \psi'_n(\vec{r} - \vec{R}) \nabla_R \psi'_n(\vec{r} - \vec{R}) d^3r \\ \Rightarrow \langle \psi_n | \nabla_R \psi_n \rangle &= -\frac{iq}{\hbar} \vec{A}(\vec{R}), \end{aligned} \quad (43)$$

gdje je iskorištena činjenica da je $\square_R = \square$, te da posljednji integral iščezava jer je to očekivana vrijednost impulsa u svojstvenom stanju Hamiltonijana $H = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V$. Ubacivanjem u (32) i korištenjem Stokesovog teorema dobije se

$$\gamma_n(T) = \frac{q}{\hbar} \oint \vec{A}(\vec{R}) \cdot d\vec{R} = \frac{q\Phi}{\hbar}, \quad (44)$$

što je upravo razlika u fazi među elektronima kod rekombinacije snopa predviđena jednačinom (39).

6. ZAKLJUČAK

U ovom je radu izložen novi pogled na nekoliko tema iz fizike koje na prvi pogled nemaju gotovo ništa zajedničko. Nakon uvođenja osnovnih definicija paralelnog transporta i grupa holonomije, pokazano je kako je pomoću njih moguće sistematizirati neka geometrijska opažanja koja su zajednička među danim sustavima i ukazati na zajedničko svojstvo - neholonomnost.

U opisu Foucaultovog njihala i Thomasove precesije iskorištena je metoda stošca tangentnog na sferu koja predstavlja Zemlju, odnosno na hiperboloid relativističkih brzina, te je pokazano da paralelan prijenos vektora duž krivulja koje nisu geodezici općenito ne vraća vektore u početno stanje, već ih rotira pod nekim kutom, ovisnim o parametru koji se gleda: u klasičnom slučaju je to bila geografska širina θ , dok je u relativističkom to bio Lorentzov faktor γ . U oba slučaja se krucijalnom pokazala metoda prikazivanja zakrivljene mnogostrukosti Euklidskom, odakle je intuitivno poznat paralelni transport prenesen natrag na izvornu mnogostrukost.

Iduća poglavlja, nakon iznošenja kvantnog adijabat-skog teorema, opisuju Berryjevu fazu u kvantnoj mehanici kao geometrijsku posljedicu mijenjanja skupa parametara nekog operatora po zatvorenoj krivulji u parametarskom prostoru. Jednadžba (25), koja definira vlakno svežnja nad parametarskom mnogostrukosti, je zanimljiv materijal za daljnja razmatranja. Kao primjer pojavljivanja Berryjeve faze navodi se Aharonov-Bohm efekt, koji proizlazi iz baždarne slobode EM potencijala i opisuje EM pojave bez prisutstva električnog i magnet-skog polja, ali neiščezavajućim potencijalima, koji su do tog otkrića smatrani čisto matematičkim konstruktom.

Za kraj je u Dodatku A naveden primjer Hamiltoni-jana sustava s dva nedegenerirana stanja u kojem se uvede perturbativna smetnja, te je objašnjeno kako takav sustav može objasniti porijeklo kvantizacije ener-gije kao potpuno geometrijski problem brojanja listova Riemannove plohe kompleksnog perturbativnog para-metra ε . Navedena je i moguća poveznica takvog su-stava s holonomijom.

7. DODATAK A: PRIMJER S PERTURBIRANIM HAMILTONIJANOM

Neka je dan perturbirani Hamiltonijan dvostanjskog sustava s nedijagonalnom smetnjom (interakcijom) u obliku

$$H = \begin{pmatrix} a & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix} + \varepsilon \begin{pmatrix} 0 & c \\ c & 0 \end{pmatrix}. \quad (45)$$

Označimo svojstvena stanja neperturbiranog susta-va sa

$$|\psi_+\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; |\psi_-\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (46)$$

sa svojstvenim energijama $E_+ = a$ i $E_- = b$. Uključiva-njem smetnje se mijenjaju svojstvena stanja i energije. U ovom slučaju nas zanima samo ovisnost svojstve-nih energija o parametru ε . Ta se ovisnost jednostavno može dobiti rješavanjem Schrödingerove jednadžbe $H|\psi\rangle = E|\psi\rangle$.

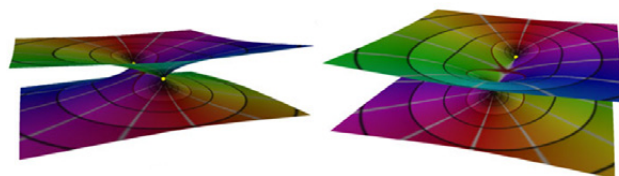
Karakteristična jednadžba:

$$\det(H - E \cdot I) = E^2 - (a + b)E + ab - \varepsilon^2 c^2 = 0, \quad (47)$$

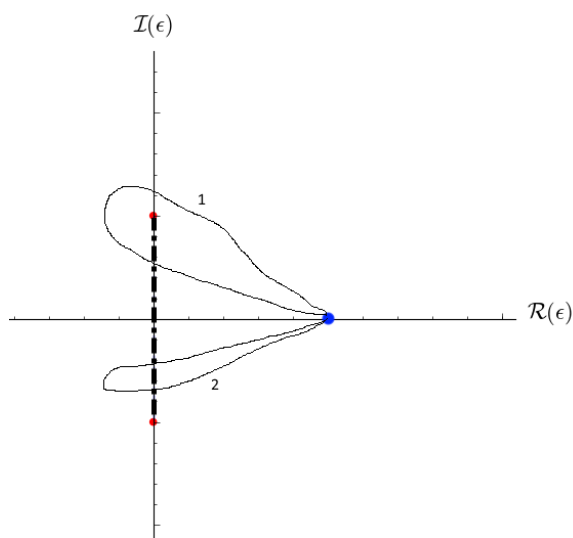
čija su rješenja

$$E_{\pm}(\varepsilon) = \frac{1}{2}(a + b \pm \sqrt{(a - b)^2 + 4\varepsilon^2 c^2}). \quad (48)$$

Ukoliko se dopusti da ε poprima vrijednosti u kom-pleksnoj ravni, vidi se da tada razvoj u red izraza za energije dobije konačan radijus konvergencije, zbog povećanja domene parametra ε na Riemannovu plo-hu za drugi korijen (Slika 8), odnosno činjenice da su $\varepsilon_{1,2} = \pm \frac{i(a-b)}{2c}$ točke grananja. Na Slici 9 iscrtkana linija između te dvije točke (označenih crveno) predstavlja mogući odabir reza.



Slika 8. Riemannova ploha za odabrani rez funkcije energije



Slika 9. Prikaz dvije moguće krivulje na kompaktно prikazanoj Riemannovoj plohi, odnosno kompleksnoj ε ravni.

Iz slika je vidljivo i da se zatvorene krivulje koje pro-laze kroz neku točku (označenom plavom bojom) mogu podijeliti, za početak, u dvije vrste krivulja (označene s 1 i 2): one koje prolaze neparan broj rezova i završe u istoj točki ali na drugom listu, stoga uvjetno rečeno nisu ni zatvorene (osim ako se ne dodefinira svojevrsni "most" između listova koji se ne broji kao prolazak kroz rez), i one koje prolaze kroz paran broj rezova (uključu-jući 0) i završe u istoj točki na listu od kojeg su krenuli.

Moguće je intuitivno izvesti nekoliko zaključaka o topološkim svojstvima različitih tipova krivulja:

- Nijedna krivulja tipa 1 nije kontraktibilna
- Korolar: sve kontraktibilne krivulje su nužno tipa 2

• Sve krivulje oba tipa su involutorne: dvostruki prolaz krivuljama vraća na izvorni list, odnosno po efektu je ekvivalentan krivulji tipa 2. To je zato što se konkatencijom dvije krivulje s n prolaza kroz rez efektivno dobiva djelovanje krivulje s $2n$ prolaza, koja je tipa 2.

No, što se uopće događa prilikom prolaza kroz rez? Tijekom tog prolaza energija E mijenja predznak ispred korijena, tako da prolaskom kroz rez zapravo dobivamo kontinuiran prijelaz iz jedne svojstvene energije u drugu - funkcija energije je jedinstvena u analitičkom produljenju za ε i iznosi

$$E(\varepsilon) = \frac{1}{2}(a + b + \sqrt{(a - b)^2 + 4\varepsilon^2 c^2}). \quad (49)$$

Iz te perspektive, energija uopće nije kvantizirana u izvornom smislu riječi - kvantizacija koja se događa u sustavu je samo posljedica prolaza (glatkog, dapače analitičkog) kroz rez na dvolisnoj Riemannovoj plohi, obilazeći točke grananja. U tom prijelazu funkcija energije mijenja predznak ispred korijena.

Drugim riječima, kvantizacija energetske stanja dolazi od brojanja listova Riemannovih ploha perturbacijskog parametra ε . Sličan efekt se vidi i kod sustava s n energijskih nivoa, jer je kod njih Hamiltonijan dan $n \times n$ matricom, koja daje algebarsku jednadžbu n -tog reda za energiju, pa se shodno tome ε pojavljuje pod n -tim korjenom, bilo u eksplicitnim formulama za rješenje jednadžbe (za $n \leq 4$), bilo tijekom aproksimativnog rješavanja.

Ovdje je, naravno, "pod tepih podmeten" uvjet da Hamiltonijan mora biti hermitski operator, što je zadovoljeno za realni ε i C , no ne vrijedi nužno za kompleksni ε i C , te se kao posljedica javljaju kompleksne energije s netrivialnom fizikalnom interpretacijom.

Eksperimentalna realizacija i opravdanje ovakvog postupka dano je u [12], dok u [13] i [14], uz buduće pažljivo istraživanje, postoji mogućnost povezivanja holonomije s tim fenomenom preko ondje iznesenih formalizma. Kao dobra opcija se čini navedenu pojavu proučavati i alatima monodromije.

8. DODATAK B: POINCARÉOVA GRUPA

Poincaréova, odnosno nehomogena Lorentzova grupa, je semidirektan produkt Lorentzove grupe $SO(1,3)$ i grupe translacija u prostor-vremenu. Djelovanje elemenata grupe se na vektore u $\mathbb{R}^4$ može zapisati kao

$$x^\mu \rightarrow \Lambda^\mu_\nu x^\nu + a^\mu, \quad (50)$$

gdje su Λ^μ_ν Lorentzove matrice, a a^μ četiri parametra translacija u prostor-vremenu. Grupa je 10-parametarska (6 parametara iz Lorentzove grupe i 4 parametra translacije), te osim generatora rotacija J^i i generatora potisaka K^i , nasljeđenih iz Lorentzove grupe, postoje i impulsi kao generatori translacija u prostoru, P^i , i Hamiltonijan kao generator translacija u vremenu, H .

Komutacijske relacije algebre koje opisuju odnos Hamiltonijana, prostornih rotacija, potisaka i impulsa dane su sa:

$$[H, P^i] = 0 = [H, J^i], \quad (51)$$

$$[K^i, H] = iP^i, \quad (52)$$

$$[J^i, P^j] = i\epsilon^{ijk}P_k, \quad (53)$$

$$[K^i, P^j] = iH\delta^{ij}, \quad (54)$$

$$[J^i, J^j] = i\epsilon^{ijk}J_k, \quad (55)$$

$$[K^i, K^j] = -i\epsilon^{ijk}J_k, \quad (56)$$

$$[J^i, K^j] = i\epsilon^{ijk}K_k. \quad (57)$$

U 3. poglavlju je posebno od interesa komutator (56), kojeg je moguće protumačiti kao pojavljivanje prostorne rotacije u ravnini kombiniranjem dva Lorentzova potiska, te je ta rotacija usmjerena u obrnutom smjeru od pravila desne ruke (negativan predznak ispred strukturne konstante), u skladu s predviđanjima ponašanja Thomasove precesije iz 3. poglavlja. (vidi npr. [11], str. 208)

LITERATURA

- [1] M. Nakahara, *Geometry, Topology and Physics*, Taylor and Francis, Shizuoka, 1990.
- [2] B. Simon, *Holonomy, the Quantum Adiabatic Theorem and Berry's Phase*, Phys.Rev.Lett. (51), 1983.
- [3] M. I. Krivoruchenko, *Rotation of the swing plane of Foucault's pendulum and Thomas spin precession: Two faces of one coin.*, arXiv: 0805.1136v2, 2010.
- [4] D. J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics*, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [5] D. J. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, John Wiley & sons, New York, 1987.
- [6] A. Dragan, T. Odrzygóźdź, *Half-page derivation of the Thomas precession*, arXiv: 1211.1854, 2012.
- [7] V. I. Arnold, *Mathematical Methods of Classical Mechanics*, Springer-Verlag, New York, 1989.
- [8] M. V. Berry, *Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes*, Proceedings of the Royal Society of London Series A vol. 394., 1984.
- [9] D. J. Griffiths, *Introduction to Classical Electrodynamics*, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [10] Y. Aharonov, D. Bohm, *Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory*, The Physical Review, vol.115, 1959.
- [11] H. F. Jones, *Groups, Representations and Physics*, 2nd ed., IOP Publishing, Philadelphia, 1998.
- [12] B. Dietz et al., *Exceptional Points in a Microwave Billiard with Time-Reversal Invariance Violation*, Phys.Rev.Lett. (106), 2010.
- [13] R. Montgomery, *The Connection Whose Holonomy is the Classical Adiabatic Angles of Hannay and Berry and Its Generalization to the Non-Integrable Case*, Commun.Math.Phys. (120), 1988.
- [14] S. W. Kim, T. Cheon, A. Tanaka, *Exotic quantum holonomy induced by degeneracy hidden in complex parameter space*, Phys. Lett. A, vol. 374, 2010.

NEURONSKE MREŽE

Sandi Buletić, dipl. ing. stroj.

Sažetak

Primjena neuronskih mreža u današnjem svijetu tehnologije neminovna je. Zbog sve većeg broja korisnika koji pristupaju internetu kao i sve zahtjevnijih programa u poslovnom svijetu, gotovo je nemoguće pristupiti računalu, a da se pritom ne aktiviraju neuronske mreže bez kojih bi rad mnogih aplikacija bio nezamisliv. Neuronske mreže su računalni modeli za obradu informacija koji funkcioniraju na sličan način kao ljudski mozak ili neke druge biološke neuronske mreže, a dizajnirane su tako da oponašaju osnovne funkcije bioloških neuronskih mreža. U ovom radu prikazani su oblici neuronskih mreža i objašnjene osnovne njihove značajke.

Ključne riječi: Neuronska mreža, biološka neuronska mreža, umjetna neuronska mreža, jednoslojni perceptron, višeslojni perceptron

1. UVOD

Neuronske mreže su računalni modeli za obradu informacija koji funkcioniraju na sličan način kao ljudski mozak ili neke druge biološke neuronske mreže. Sastoje se od velikog broja jednostavnih procesora (nelinearnih signalnih procesora koje zovemo neuronima ili jedinicama), pri čemu svaki od njih može imati malu lokalnu memoriju. Ključni element ovog modela je struktura sustava za obradu podataka. Ona se sastoji od velikog broja međusobno povezanih elemenata (neurona) koji skladno rade u svrhu što boljeg rješavanja konkretnog problema. Umjetne neuronske mreže imaju sposobnost poput ljudi učiti na primjerima, skupovima podataka te na taj način vrlo brzo izlaze na kraj s problemima koji se teško rješavaju tradicionalnim pristupom. Svaka mreža je konfigurirana za određenu primjenu, kao što je prepoznavanje uzorka, govora ili podataka klasifikacije kroz proces učenja. Učenje u biološkim sustavima podrazumijeva prilagođavanje na sinaptičkim vezama koje postoje među neuronima, a to pravilo vrijedi i za umjetne neuronske mreže.

2. POVIJESNI RAZVOJ NEURONSKIH MREŽA

Pedesetih godina prošlog stoljeća na konferenciji *Dartmouth Summer Research Project*, kao jedna od grana umjetne inteligencije, profiliralo se neuronsko računarstvo. Na toj konferenciji je najavljeno ostvarivanje vizije računalnog modela koji bi mogao u nekim temeljnim principima oponašati funkcioniranje mozga. Pojavljivanje neuronskog računarstva je odgovor *Von*

Neumannovim računalima, nastojeći ostvariti ili simulirati usporednu obradu informacija koju koristi ljudski mozak dok se sjeda, razmišlja, rješava probleme itd. Neki vrlo važni događaji za razvoj neuronskih mreža:

- 1943. *Pitts* i *Mulock* su prvi dokazali da neuroni mogu imati dva stanja (umirujuće i pobuđujuće) te da njihova aktivnost ovisi o određenoj vrijednosnoj granici. Ti dokazi su bili temelj za razvoj neuronskih mreža.
- 1949. *Hebb* je dao prijedlog za pravilo kojim se opisuje proces učenja (Hebbovo pravilo).
- 1956. *Rochester* i skupina autora predstavljaju prvu simulaciju Hebbovog modela na *Dartmouth Summer Conference*, koji je kolijevka modela neuronskih mreža.
- 1958. prva neuronska mreža „Perceptron“, koju je razvio *Frank Rosenblatt*, u kojoj se učenje razvija u dva sloja, nije mogla rješavati probleme klasifikacije koji nisu bili linearno djeljivi (npr. XOR problem).
- 1969. *Minsky* i *Papert* objavljuju rad u kojem oštro kritiziraju nedostatke „Perceptrona“ što dovodi do prekida ulaganja u razvoj neuronskih mreža.
- 1974. unatoč slabim ulaganjima *Paul Werbos* je razvio višeslojnu Perceptron mrežu – MLP, prvu verziju *Backpropagation* mreže koja prevladava nedostatak Perceptrona uvođenjem učenja u „skrivenom sloju“.
- 1986. *Rumelhart*, *Hinton* i *Williams* usavršavaju „Backpropagation“ mrežu koja vraća ugled neuronskim mrežama jer omogućuje aproksimiranje gotovo svih funkcija i rješavanje praktičnih problema.

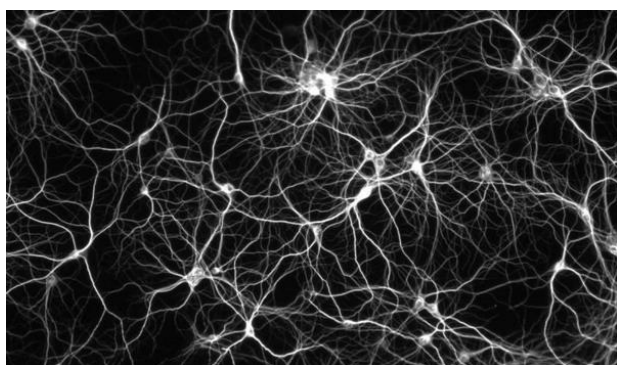
Usavršenom „*Backpropagation*“ mrežom dolazi do potpunog znanstvenog i komercijalnog svjetskog interesa za neuronske mreže čija je primjena i danas mnogostruka te se koristi u mnogim područjima ljudskog djelovanja i raznim industrijama. Postoje i drugi algoritmi razvijeni za neuronske mreže.

3. USPOREDBA BIOLOŠKE I UMJETNE NEURONSKE MREŽE

Iako su neuronske mreže nastale po uzoru na biološke, ova se dva modela u nekim karakteristikama međusobno razlikuju.

3.1 Biološke neuronske mreže

Biološka neuronska mreža je vrlo složena (slika 3.1). Sastoji se od **tijela, aksona i mnoštva dendrita** koji okružuju tijelo neurona. Akson je tanka cjevčica koja s jedne strane sadrži tijelo neurona, a s druge se strane dijeli na niz grana. Na krajevima tih grana nalaze se zadebljanja koja dodiruju dendrite, a ponekad i tijelo drugog neurona. Sinapsa je razmak između završetka aksona prethodnog neurona i dendrita ili tijela sljedećeg neurona. Dendriti su produžeci staničnog tijela, vrlo su tanki u odnosu na veličinu tijela stanice i funkcija im je prikupljanje informacija. Biološke neuronske mreže sastavni su dio čovjeka čiji se mozak sastoji od 100 milijardi neurona, a zaslužne su za izvođenje vrlo važnih funkcija kao što su razmišljanje, učenje, emocije, percepcija, motorika itd. Iako se funkcije neuronskih mreža istražuju već dugi niz godina, brojni procesi, kao i njihov način rada, ljudskom umu još uvijek nisu u potpunosti razumljivi.

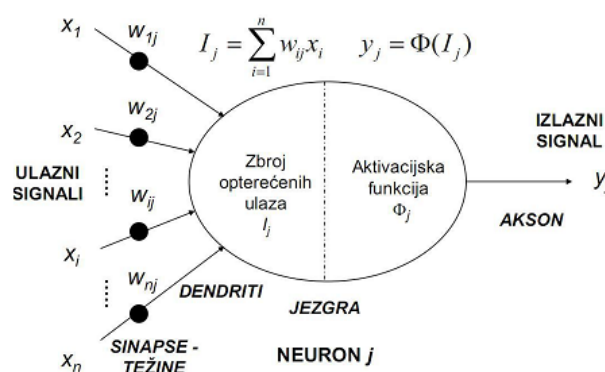


Slika 3.1 Prikaz biološkog neurona [13]

3.2 Umjetne neuronske mreže

Umjetne neuronske mreže dizajnirane su tako da oponašaju osnovne funkcije bioloških neuronskih mreža. Tijelo biološkog neurona zamjenjuje se sumatorom, ulogu dendrita preuzimaju ulazi (ulazne varijable) u sumator, izlaz (izlazna varijabla) sumatora je akson umjetnog neurona, a uloga praga osjetljivosti bioloških

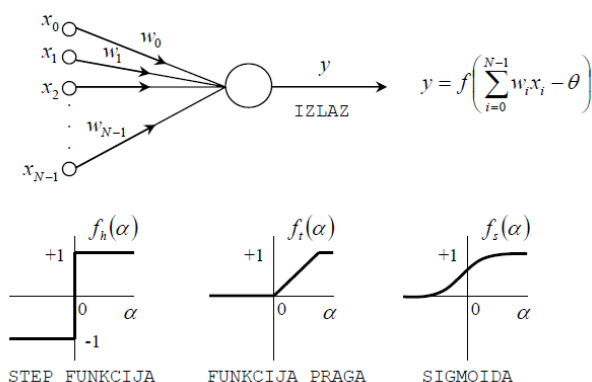
neurona preslikava se iz tzv. aktivacijske funkcije (slika 3.2).



Slika 3.2 Model umjetnog neurona

Veza umjetnog neurona s okolinom ostvaruje se pomoću funkcijske sinaptičke veze biološkog neurona. Težinski faktori mogu biti pozitivan ili negativan broj, a imaju istu funkciju kao i sinapse kod biološkog neurona: povezuju izlaze (izlazne varijable) iz okoline neurona tj. izlaze drugih neurona (aksoni) s ulazima sumatora (dendriti). Intenzitet te veze ovisi o iznosu (modulu), a vrsta veze o predznaku težinskog faktora. Aktivacijske funkcije dijele se na: **linearne i nelinearne**.

- **Linearne aktivacijske funkcije** – izlaz sumatora množi se s nekim faktorom (pojačanjem) i tako dobiva izlaz neurona.
- **Nelinearne aktivacijske funkcije** – mogu poprimiti različite oblike, a najrasprostranjenije su: funkcije praga osjetljivosti, sigmoidne, hiperbolične i harmoničke funkcije (slika 3.3). Nelinearne aktivacijske funkcije prevode izlaz sumatora na izlaz neurona preko nelinearnog pojačanja. Na taj način funkcija praga osjetljivosti daje na izlazu neurona 1, ako je izlaz sumatora veći od zadanog broja (prag osjetljivosti), što odgovara ispaljivanju impulsa kod biološkog neurona. Ukoliko neuron nije aktivan, onda je na izlazu neurona 0.



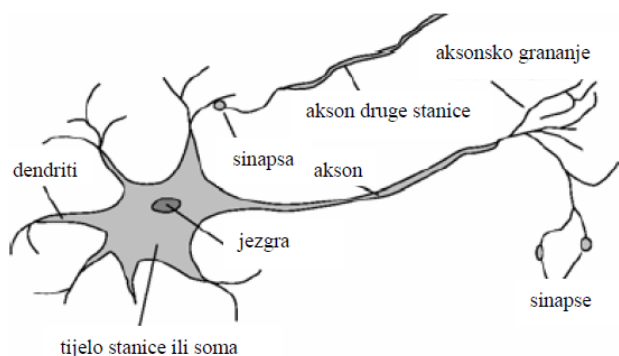
Slika 3.3 Procesni element (čvor) oblikuje zbroj N težinskih ulaza i proslijeđuje rezultat kroz nelinearnost. Prikazane su tri vrste nelinearnosti

Iz priloženog se vidi da umjetni neuron funkcionira slično kao biološki neuron. Izlazi iz drugih neurona u okruženja promatranog neurona, koji se upućuju promatranom neuronu množe se težinskim faktorima i dovode do sumatora. U sumatoru se dobiveni produkti sumiraju, a njihova suma se odvodi na ulaz aktivacijske funkcije, koja će na svom ulazu dati izlaz neurona. Na primjer, ako je izlaz sumatora označen s x , izlaz neurona s y , a aktivacijska funkcija je oblika sinusa vrijedit će izraz $y = \sin(x)$. Umjetni neuron na slici 3.2 naziva se po svojim autorima *McCulloch – Pittsov* neuron. Kada aktivacijska funkcija ima oblik praga osjetljivosti (*binary threshold function*) onda se opisani neuron naziva *Perceptron*. Njegova vrlo jednostavna struktura zanemaruje mnoge karakteristike biološkog neurona (npr. ne vodi računa o kašnjenju signala jer ulaz neurona producira trenutno njegov izlaz, što se odražava na dinamiku sustava).

4. PERCEPTRON – JEDNOSLOJNA NEURONSKA MREŽA

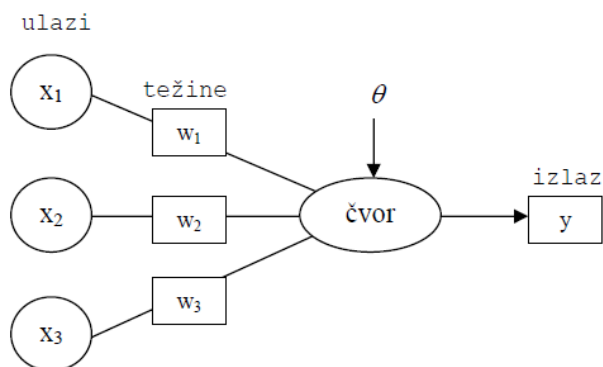
Perceptroni su jedna od najkorištenijih i najpoznatijih neuronskih mreža. Sam je pojam prvi upotrijebio *Frank Rosenblatt* [5] kako bi opisao različite modele neuronskih mreža. Od njega je potekla ideja da se funkcijski opis rada neurona implementira u obliku programskog algoritma umjesto da se pokušava izgraditi fizički model neurona.

Perceptron [2] predstavlja jednostavni model osnovne stanice mozga, model neurona (slika 4.1).



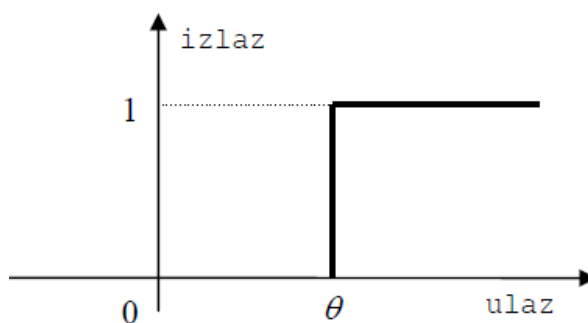
Slika 4.1 Osnovna struktura neurona – stanice mozga

Najjednostavnija neuronska mreža sastoji se od jednog perceptrona kao što je prikazano na slici 4.2. Jednoslojnu neuronsku mrežu može činiti više perceptrona kao osnovnih mrežnih čvorova.



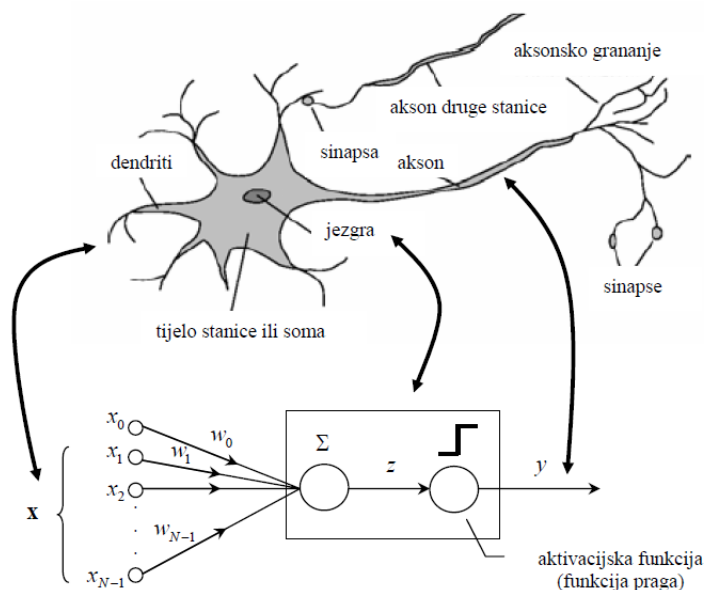
Slika 4.2 Perceptron s tri ulaza, pragom θ i jednim izlazom [2]

Svaki ulaz je množen težinskim faktorom i zajedno čine zbroj umnožaka. Na tu vrijednost primjenjuje se "aktivacijska funkcija" čiji rezultat predstavlja izlaz, aktivacijsku vrijednost čvora. Jedna takva funkcija je i *step* funkcija prikazana na slici 4.3.



Slika 4.3 Aktivacijska step funkcija

Za svaki dani ulaz, perceptron proizvodi određeni izlaz, ovisno o ulaznoj vrijednosti i težinskim faktorima. Težine se mogu podesiti tako da se postigne željeni izlaz za određeni ulaz.



Slika 4.4 Usporedba modela biološkog neurona i osnovnog procesnog elementa (čvora, perceptrona)

Kao što je vidljivo na slici 4.3 ulazi u perceptron analogni su sinapsama, same težinske veze ulaza i čvora analogne su dendritima, dok je čvor (zbroj svih težinskih ulaza i aktivacijska funkcija) analogija jezgri odnosno tijelu živčane stanice (neurona). Izlaz y perceptrona istovjetan je aksonu koji je sinapsama spojen s drugim neuronima, baš kao što je izlaz jednog perceptrona spojen sa ulazima drugih.

5. VIŠESLOJNA NEURONSKA MREŽA S UNAPRIJEDNOM PROPAGACIJOM – MFN

Višeslojne neuronske mreže s unaprijednom propagacijom (*multilayer feedforward networks* [3]) predstavljaju važnu klasu neuronskih mreža. Tipično, mreža se sastoji od skupa senzornih elemenata (ulazni čvorovi – *source nodes*) koji čine **ulazni sloj**, jednog ili više **skrivenih slojeva** procesnih elemenata, i **izlaznog sloja** procesnih elemenata. Ulazni signal širi se mrežom unaprijed, sloj po sloj. Ove se neuronske mreže obično nazivaju višeslojni perceptroni (*multilayer perceptrons* – *MLPs*).

Višeslojni perceptroni uspješno su primijenjeni na rješavanje nekih teških i raznolikih problema i to kroz postupke nadgledanog učenja (učenje s učiteljem) algoritmom propagacije greške unatrag kroz mrežu (*error back-propagation algorithm*). Algoritam se temelji na pravilu učenja korekcijom greške.

U osnovi, učenje propagacijom greške unazad sastoji se od dva prolaza kroz različite slojeve mreže: prolazak unaprijed i prolazak unatrag. U *prolasku unaprijed*, aktivni uzorak (ulazni vektor) postavlja se na ulazne čvorove mreže, i njegov učinak širi se dalje kroz svaki sloj mreže. Konačno, generira se skup izlaza kao konkretan odziv mreže. Tijekom prolaska unaprijed sve sinaptičke težine mreže su fiksne, nepromjenjive. Tijekom prolaska unatrag, sinaptičke težine se podešavaju u skladu s pravilom učenja korekcijom greške. Detaljnije, razlika željenog (ciljanog) odziva i trenutnog konkretnog odziva mreže predstavlja signal greške. Taj se signal greške dalje širi unatrag kroz mrežu, u suprotnom smjeru od sinaptičkih veza – otuda i ime "propagacija greške unatrag". Sinaptičke težine podešavaju se tako da realni odziv mreže bude bliže željenom odzivu u statističkom smislu. Proces učenja koji se izvodi u algoritmu naziva se učenje propagacijom unatrag (*back-propagation learning*).

Višeslojni perceptron odlikuju tri distinktna karakteristike:

1. Model svakog neurona u mreži uključuje *nelinearnu aktivacijsku funkciju*. Bitno je ovdje naglasiti da je nelinearna funkcija *glatka* (derivabilna), u suprotnosti sa *step* funkcijom kod Rosenblatt-ovog (jednoslojnog) perceptrona. Učestali oblik neline-

arnosti koji zadovoljava ovaj uvjet jest *sigmoidalna nelinearnost* definirana *logističkom funkcijom*:

$$y_j = \frac{1}{1 + \exp(-v_j)} \quad (5.1)$$

gdje je v_j inducirano lokalno polje (npr. težinska suma svih sinaptičkih ulaza i pomak) neurona j , a y_j je izlaz neurona. Prisutnost nelinearnosti je bitna jer bi u suprotnom ulazno-izlazni odnos mreže mogao biti reduciran na jednoslojni perceptron. Štoviše, upotreba logističke funkcije je biološki motivirana, jer pokušava opisati rad pravog neurona mozga.

2. Mreža sadrži jedan ili više slojeva *skrivenih neurona* koji nisu dio ulaza ni izlaza mreže. Ovi skriveni neuroni omogućuju mreži učenje kompleksnih zadataka pomoću ekstrakcije progresivno sve značajnijih osobina ulaznih uzoraka (vektora).
3. Mreža pokazuje visoki stupanj povezanosti, određen sinapsama mreže. Promjena u povezanosti mreže uzrokuje promjenu u populaciji sinaptičkih veza ili njihovim težinama.

Upravo kroz zajedničku kombinaciju ovih karakteristika i sposobnosti za učenje iz iskustva kroz treniranje, višeslojni perceptron crpi svoju računalnu moć. No iste ove karakteristike odgovorne su i za nedostatke našeg trenutnog znanja o ponašanju mreže. Prvo, prisutnost distribuiranog oblika nelinearnosti i visoki stupanj povezanosti mreže čine teoretsku analizu višeslojnog perceptrona teškom. Drugo, upotreba skrivenih neurona čini proces učenja težim za vizualizaciju. U implicitnom smislu, proces učenja mora odlučiti koje osobine i značajke ulaznog uzorka trebaju biti reprezentirane skrivenim neuronima. Proces učenja je time učinjen težim jer pretraživanje mora biti provedeno u puno širem prostoru mogućih funkcija, i mora se odabrati između alternativnih reprezentacija ulaznog uzorka.

Upotreba termina "propagacija unatrag" (*back-propagation*) postaje izraženija nakon 1985. kada je populariziran kroz izdavanje semestralne knjige nazvane *Paralelni distribuirani procesi* (Rumelhart and McClelland, 1986) [6].

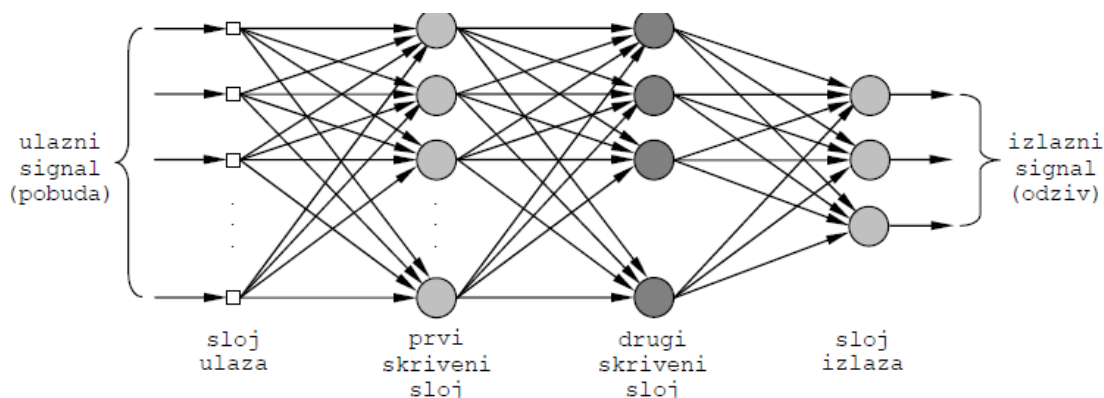
Razvoj algoritma propagacije unatrag predstavlja napredak u razvoju neuronskih mreža utoliko da čini *proračunski učinkovitu* metodu treniranja višeslojnih perceptrona. Iako ne možemo tvrditi da navedeni algoritam predstavlja optimalno rješenje za sve rješive probleme, otklonio je pesimizam u pogledu učenja kod višeslojnih perceptrona na koji su u svojoj knjizi ukazali Minsky i Papert (1969) [7].

5.1 Struktura i svojstva višeslojnog perceptrona

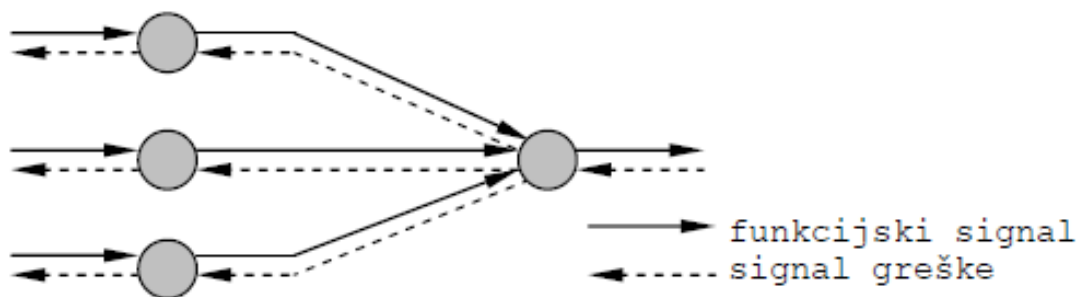
Višeslojni perceptron - MLP (*MultiLayer Perceptron*) - sastoji se od više slojeva međusobno povezanih procesnih elemenata - čvorova ili neurona. Općenito, svi su čvorovi MLP-a potpuno povezani, svaki sa svakim (slika 5.1) što znači da je svaki neuron u svakom sloju povezan sa svim čvorovima/neuronima prethodnog sloja. Signal prolazi kroz mrežu unaprijed, s lijeva na desno i sloj po sloj.

čun u svakom neuronu mreže temelji na nekom od oblika funkcije greške.

Izlazni neuroni (procesni elementi, čvorovi) čine *izlazni sloj mreže*. Preostali neuroni čine jedan ili više *skrivenih slojeva*. Tako, skriveni čvorovi nisu dio ni ulaza ni izlaza mreže – otuda njihov naziv "*skriveni*". Prvi se skriveni sloj puni podacima iz ulaznog sloja kojeg čine senzorni elementi (ulazni čvorovi): rezultirajući izlazi



Slika 5.1 Strukturni graf višeslojnog perceptrona sa dva skrivena sloja



Slika 5.2 Prikaz smjera prostiranja signala kroz dio višeslojnog perceptrona: unaprijedna propagacija funkcijskog signala i propagacija unatrag signala greške

Dvije su vrste signala prisutne u mreži prema [8] (slika 5.2.):

1. *Funkcijski signal* je ulazni signal (pobuda) koji počinje na ulaznom dijelu mreže, širi se dalje unaprijed (neuron po neuron) i javlja na izlaznom dijelu mreže kao izlazni signal. Ovakav signal nazivamo "funkcijskim" iz dva razloga. Prvo, podrazumijeva se da obavlja korisnu funkciju na izlazu iz mreže. Drugo, u svakom neuronu kroz koji funkcijski signal prolazi, signal se računa kao funkcija ulaza i pripadnih težina pridruženih tom neuronu. Funkcijski signal često se naziva i ulazni signal.
2. *Signal greške* javlja se kod izlaznog čvora mreže i propagira se unatrag (sloj po sloj) kroz mrežu. Nazivamo ga "signal greške" jer se njegov izra-

prvog sloja predstavljaju ulaze u sljedeći skriveni sloj; i tako dalje za ostatak mreže.

Svaki skriveni ili izlazni neuron višeslojnog perceptrona dizajniran je za obavljanje dva izračuna:

1. Izračun funkcijskog signala koji se pojavljuje na izlazu neurona, izražen u obliku kontinuirane nelinearne funkcije ulaznog signala i sinaptičkih težina pridruženih tom neuronu.
2. Izračun procjene gradijenta (npr., gradijenti pogreške u odnosu na težine povezane s ulazima neurona) koji je potreban pri prolasku unatrag kroz mrežu.

Mogućnosti višeslojnih perceptrona proizlaze iz nelinearnosti koje se koriste u čvorovima mreže. Jed-

noslojni perceptron stvara poluravnine kao decizijska područja tj. decizijska funkcija dijeli ravninu na dvije poluravnine.

Ulazne varijable (vektor ulaza od n komponenti) određuju n -dimenzionalni prostor značajki u kojemu složena decizijska funkcija grupira uzorke u decizijska područja koja pripadaju pojedinim klasama (izlazima iz mreže). Tako, dvoslojni perceptron može oblikovati bilo koje konveksno decizijsko područje u prostoru određenom ulaznim varijablama. Takova područja uključuju konveksne poligone i neugniježđena konveksna područja. Konveksna područja oblikuju se križanjem poluravnina koje stvara svaki čvor prvog sloja višeslojnog perceptrona.

Kada je potrebno da složena decizijska funkcija opisuje konveksna područja koja su ujedno i ugniježđena, kao što je to slučaj sa kompleksnim raspoznavanjem uzoraka koji se sastoje od većeg broja značajki (npr. $30 \times 20 = 600$ slikovnih elemenata pojedinog alfanumeričkog znaka) tada je potrebno koristiti višeslojni perceptron koji oblikuje proizvoljno kompleksna decizijska područja i može razdvajati ugniježdene klase [1].

6. ZAKLJUČAK

Primjena neuronskih mreža u današnjem svijetu tehnologije neminovna je. Zbog sve većeg broja korisnika koji pristupaju internetu kao i sve zahtjevnijih programa u poslovnom svijetu, gotovo je nemoguće pristupiti računalu, a da se pritom ne aktiviraju neuronske mreže bez kojih bi rad mnogih aplikacija bio nezamisliv. Najjednostavniji primjer rada neuronskih mreža je Google pretraživač. Ukoliko tražimo neki pojam, a nismo sigurni kako se on točno piše, tu nam pomaže pretraživač koji radi kao jedna velika optimalno istrenirana neuronska mreža.

Njihova sposobnost da uče na skupu podataka, čini ih vrlo fleksibilnima i modnima. Nema potrebe izmišljati algoritam kako bi se obavio određeni zadatak, tj. nema potrebe da razumijemo interne mehanizme za određeni zadatak. One su nam također pogodne za sustave realnog vremena zbog brzog odaziva i kratkog računalnog puta, zahvaljujući njihovoj paralelnoj strukturi. Neuronske mreže pridonose i mnogim znanostima kao što su neurologija, psihologija (svakodnevno se koriste na dijelovima modela koji su slični živom organizmu, pokušavajući istražiti i oponašati „mehanizam“ ljudskog mozga), ekonomija (proizvodnja, trgovina, marketing itd), medicina (medicinska dijagnostika), fizika (prepoznavanje, klasifikacija čestica) itd.

Zahvaljujući mogućnosti neuronskih mreža da prepoznaju uzorke (znakovi pisani rukom, detekcija lica, glasa, otpornost materijala itd) omogućen je napredak i olakšan je rad i u mnogim drugim područjima. Možda najzanimljiviji aspekt neuronske mreže jest mogućnost da se u bliskoj budućnosti proizvedu „mreže

savjesti“ koje bi u potpunosti oponašale ljudsku vrstu. Pitanje je, hoće li ikada sustav umjetnih neuronskih mreža moći doseći ljudskom umu još uvijek nedokučivo savršenstvo biološke neuronske mreže.

LITERATURA

- [1] R. P. Lippmann, *An Introduction to Computing with Neural Nets*, IEEE ASSP Magazine, Vol. 3, No. 4, pp 4-22, 1987.
- [2] A. Hayes, *Artificial Neural Networks – an Introduction*, 1998.
- [3] S. Haykin, *Neural Networks, A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall, Upper saddle River, pp. 156-255, New Jersey, 1999.
- [4] J. Yoo, B. Chun, D. Shin, *A Neural Network for Recognizing Characters Extracted from Moving Vehicles*, Proceedings of World Congress on Neural Networks, Vol. 3, 1994.
- [5] F. Rosenblatt, *The perceptron: A probabilistic model for information storage and organization in the brain*, Psychological review, Vol. 65, 1958.
- [6] D. E. Rumelhart, J. L. McClelland, *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*, Vol. 1, Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
- [7] M. L. Minsky, S. A. Papert, *Perceptrons*, Cambridge, MA: MIT Press, 1969.
- [8] D. B. Parker, *Optimal algorithms for adaptive networks: Second order back propagation, second order direct propagation, and second order Hebbian learning*, IEEE 1st International Conference on Neural Networks, Vol. 2, San Diego, CA, 1987.
- [9] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams, *Learning representations of back-propagation errors*, Nature, London, Vol. 323, 1986.
- [10] R. L. Watrous, *Learning algorithms for connectionist networks: Applied gradient methods for nonlinear optimization*, First International Conference on Neural Networks, Vol. 2, San Diego, CA, 1987.
- [11] R. A. Jacobs, *Increased rates of convergence through learning rate adaption*, Neural Networks, Vol. 1, 1998.
- [12] A. H. Kramer, A. Sangiovanni-Vincentelli, *Efficient parallel learning algorithms for neural networks*, Advances in Neural Information Processing Systems, Vol. 1, San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1989.
- [13] <http://www.geek.hr/oznaka/mozak> (08. travnja 2014.)
- [14] http://hr.wikipedia.org/wiki/Neuronska_mre%C5%BEa (08. travnja 2014.)

PROJEKTIRANJE SINKRONOG GENERATORA S CILINDRIČNIM ROTOROM ZA MALU HIDROELEKTRANU

Milenko Jokić, dipl. ing. stroj.
mr. sc. Radovan Jokić

Sažetak

U ovome je članku prikazana metodologija projektiranja generatora s cilindričnim rotorom namijenjenim za rad u elektrostrojarskom kompleksu male hidroelektrane priključene na elektrodistribucijski sustav. Postupak projektiranja kao i provjera odabranih konstrukcijskih rješenja prikazana je na jednom konkretnom-realiziranom projektu generatora. Težište analize je stavljano na danas najvažnije zahtjeve naručitelja odnosno projektanta male hidroelektrane, te uporabu naprednih tehnika analize i modeliranja.

Ključne riječi: tehnologija projektiranja, sinkroni stroj, tehnički zahtjevi, numerička simulacija, modeliranje.

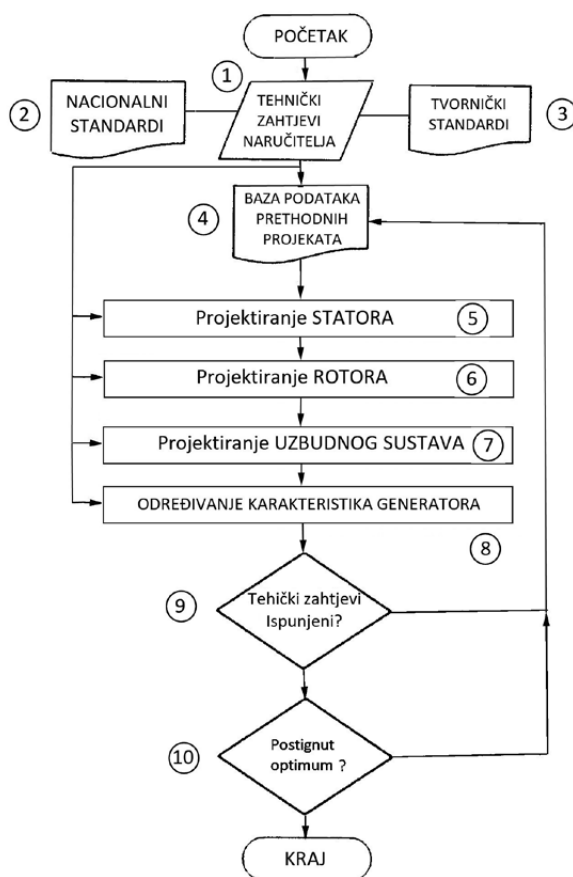
1. UVOD

Posljednjih desetljeća na tržištu proizvodnje i distribucije električne energije došlo je do porasta neovisnih proizvođača energije koji ulaze u nacionalnu električnu mrežu iz takozvanih obnovljivih izvora energije. Značajnu ulogu u tomu imaju i male hidroelektrane (MHE), koje su svoju ekspanziju doživjele, između ostalog, zahvaljujući propisima i poticajima koji su prodaju električne energije učinile profitabilnom za male proizvođače. Stoga je, od izuzetnog značaja, u proizvodnji generatora kao jednog od temeljnih dijelova elektrostrojarskog kompleksa MHE, postala kvaliteta i brzina projektiranja, te kratak rok isporuke. U članku je opisana tehnologija projektiranja sinkronog generatora s cilindričnim rotorom.

Prvo je opisan opći postupak projektiranja. Potom su na primjeru konkretnog projekta detaljno opisani tehnički zahtjevi na generator za jednu MHE. Za postizanje traženih značajki generatora daje se prikaz odabranih naprednih metoda koje su primijenjene u projektu.

2. PROCES PROJEKTIRANJA

Cilj projekta je postizanje traženih karakteristike generatora, uzimajući u obzir elektromagnetska, toplinska i mehanička ograničenja, uz što manje troškove samog projekta s jedne strane, te konačnog proizvoda s druge. Da bi se ostvarili navedeni ciljevi za svaki je projekt potrebno prilagoditi i primijeniti najdjelotvornije metode. Pojednostavljeni tijek procesa projektiranja prikazan je na slici 1.



Slika 1. Proces projektiranja generatora

Na temelju tehničkih zahtjeva naručitelja ili projektanta MHE (blok 1), nacionalnih standarda (blok 2), te tvorničkih standarda proizvođača generatora (blok 3), formira se kompletan skup ulaznih podataka. Izbor početnog tehničkog rješenje se prvo traži u bazi podataka već projektiranih / proizvedenih strojeva (blok 4). U koliko postoji slično rješenje tada je zadaća projektiranja

znatno pojednostavljena. Ako se radi o potpuno novom projektu tada je postupak znatno složeniji. Nakon toga se pristupa projektu i konstrukciji statora, rotora i uzbudnog sustava (blok 5, 6 i 7). Pri tomu se vrše elektromagnetski, termički i mehanički proračun generatora, te se određuju sve karakteristika generatora (blok 8). Ako projektom nisu postignute tražene karakteristike (blok 9) tada se potrebno vratiti na skup ulaznih podataka, te izvršiti potrebne promjene. Ako su postignute karakteristike definirane tehničkom specifikacijom, tada se još provjerava dali je projekt optimalan (blok 10). Na koncu se pristupa izradi konstrukcijske i tehnološke dokumentacije, te proizvodnji generatora. U nastavku se daje prikaz upotrijebljenih metoda projektiranja uz odgovarajuće tehničke zahtjeve. Pri tomu, zbog opsega članka, su detaljno elaborirani najbitniji zahtjevi koje ima naručitelj / projektant MHE.

3. GLAVNE DIMENZIJE I ELEKTROMAGNETSKI PRORAČUN

Naručitelj definira svoje zahtjeve kroz tehničku specifikaciju generatora i uzbudnog sustava. Pored opsega isporuke, također definira primijenjene standarde, jamstvo, montažu, ispitivanje i puštanje u pogon. Određivanje glavnih dimenzija se bazira na općim i nazivnim podacima generatora.

Na osnovu nominalnih podataka prvo treba odrediti dimenzije aktivnog dijela stroja. Ako u tvorničkoj

bazi podataka projekata nema realiziranog generatora sličnih karakteristika tada je za izbor glavnih dimenzija najprikladnije koristiti koeficijent iskorištenja odnosno Essonovu konstantu. Koeficijent iskorištenja je definiran sa :

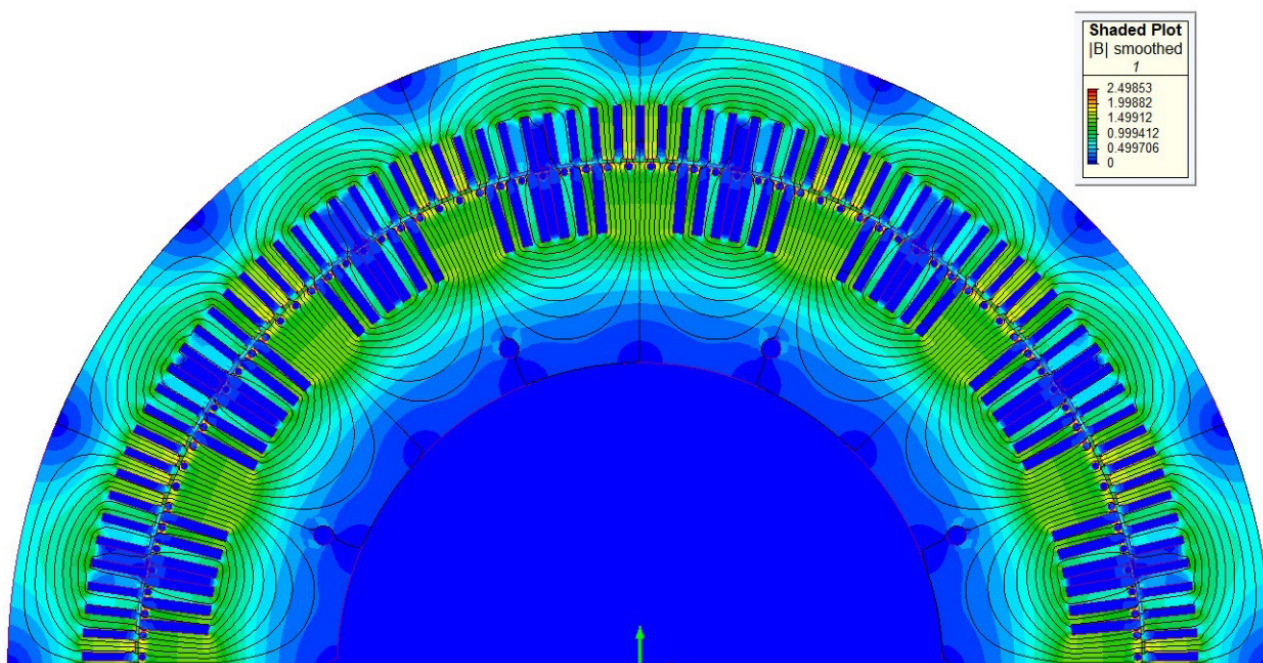
$$C_E = \frac{P_N}{D_i^2 \cdot l_{Fe} \cdot n_N} \Rightarrow \frac{\text{kW} \cdot \text{min}}{\text{m}^3}$$

gdje je P_N (kW) radna snaga generatora, D_i (m) unutarnji promjer paketa limova statora, l_{Fe} (m) dužina paketa limova statora, a n_N (o/min) nominalna brzina vrtnje. Koeficijent iskorištenja u nekom mjerilu predstavlja električnu snagu po jedinici volumena stroja, odnosno omjer okretnog momenta i volumena. Svako valja nastojati da se usvoje glavne dimenzije koje odgovaraju postojećim alatima. Nakon definiranja kompletnog reza limova statora i rotora, te definiranja svih ostalih podataka (namota statora i rotora) vrši se proračun svih elektromagnetskih naprezanja te usporedba sa dopuštenim vrijednostima. Za elektromagnetski proračun se može koristiti klasičan analitički postupak podržan računalom ili numerička simulacija bazirana na metodi konačnih elemenata. U konkretnom projektu su korištene obje metode.

Na slici 2 je prikazana razdioba polja u režimu praznog hoda. Na osnovu dobivenih podataka za uzбудu glavnog stroja, u praznom hodu, kratkom spoju i nominalnom pogonu projektiran je uzбудnik i rotirajući ispravljač.

Tablica 1. Tehnička specifikacija generatora

TEHNIČKA SPECIFIKACIJA GENERATORA	
Opći podaci	
Tip pogonskog stroja	: Turbina KAPLAN
Tip generatora i uzbuđ	: Trofazni sinkroni generator bez četkica, samouzbuđni sa statičkim sustavom uzbuđ i tiristorskim regulatorom napona. Generator ima na rotoru izmjenični namot budilice, rotirajući ispravljač i uzbuđni namot na cilindričnom rotoru sa kontinuiranim prigušnim namotom.
Paralelni rad	
Temperatura ambijenta	: 40 °C
Vlažnost ambijenta	: relativna vlažnost 95%
Visina instalacije	: 751 m iznad razine mora
Primijenjeni standardi	: Najnoviji standardi IEC, ISO, VDE i DIN
Nazivni podaci	
Vrsta pogona	: Trajni pogon (S1)
Nazivna snaga	: 1750 kVA, 1400 kW
Nazivni napon	: 690 V
Nazivni faktor snage	: 0,8 induktivno
Nazivna frekvencija	: 50 Hz
Nazivna brzina	: 375 rpm
Spajanje namota statora	: (Y) zvijezde
Broj izvoda namota statora	: 6 izvoda, 3 priključne sabirnice
Smjer vrtnje na pogonskoj strani	: u smjeru kazaljke na satu
Klasa izolacije svih namota	: F
Trajna struja 3-polnog k. s.	: 3 x I _n
Harmonijski sadržaj izlaznog napona u praznom hodu	: < 1,5 %
Dopušteni inverzni sustav utrajnom radu	: 20 %
Regulacija statike napona	: 0 – 10%



Slika 2. Razdioba polja u generatoru u režimu praznog hod

Osim nominalnih podataka za generator, zahtjeva se i određenu vrijednost tzv. omjera kratkog spoja (vrlo često se u dokumentaciji koristi oznaka SCR – „short circuit ratio“) koji je bitan za stabilnost pogona MHE na mreži. Omjer kratkog spoja definiran je kao omjer između uzbudne struje (I_{u0}) potrebne za dobivanje nazivnog napona u praznom hodu i uzbudne struje (I_{uk}) potrebne za postizanje nazivne struje u kratkom spoju [1,5]. Ovaj se parametar može definirati i kao inverzna vrijednost zasićene sinkrone reaktancije u uzdužnoj osi ($1/X_{dzas}$).

Kod generatora sa cilindričnim rotorom se u novije vrijeme traži da vrijednost omjera kratkog spoja bude:

$$K_{OKS} = \frac{1}{X_{dzas}} \geq 0,4$$

gdje je X_{dzas} relativna zasićena uzdužna sinkrona reaktancija (p.u). Karakteristične vrijednosti koje omogućuju ocjenu točnosti elektromagnetskog proračuna su date u tablici 2.

Tablica 2. Pregled rezultata

	Proračun	Mjerenje
I_{u0} (A)	2,82	3,05
I_{uk} (A)	5,85	6,194
X_{dzas} %	207,12	203,08
SCR	0,48	0,49

Vrijednosti parametara generatora koje je naručitelj tražio, a koje su rezultat elektromagnetskog proračuna su sve reaktancije, otpori i vremenske konstante. Vrijednosti dobivene elektromagnetskim proračunom su prikazane u tablici 3.

Tablica 3. Reaktancije, otpori i vremenske konstante

Sinkrona reaktancija u uzdužnoj osi $X_{d'}$ zas.	[%]	: 207,12
Sinkrona reaktancija u poprečnoj osi $X_{q'}$ zas.	[%]	: 159,48
Tranzijentna reaktancija u uzdužnoj osi $X_{d''}$ zas.	[%]	: 30,80
Tranzijentna reaktancija u poprečnoj osi $X_{q''}$ zas.	[%]	: 159,48
Subtranzijentna reaktancija u uzdužnoj osi $X_{d'''}^*$ zas.	[%]	: 18,17
Subtranzijentna reaktancija u poprečnoj osi $X_{q'''}^*$ zas.	[%]	: 19,08
Inverzna reaktancija X_2	[%]	: 18,62
Nulta reaktancija X_0	[%]	: 12,82
Tranzijentna konstanta praznog hoda direktne osi T'_{d0}	[s]	: 0,983
Tranzijentna konstanta kratkog spoja direktne osi T'_d	[s]	: 0,1463
Subtranzijentna konstanta kratkog spoja direktne osi T''_d	[s]	: 0,0057
Vremenska konstanta istosmjerne komponente T_a	[s]	: 0,0443
Otpor namota statora po fazi na 75 ° C	[%]	: 1,34

4. KONSTRUKCIJA I MEHANIČKI PRORAČUN

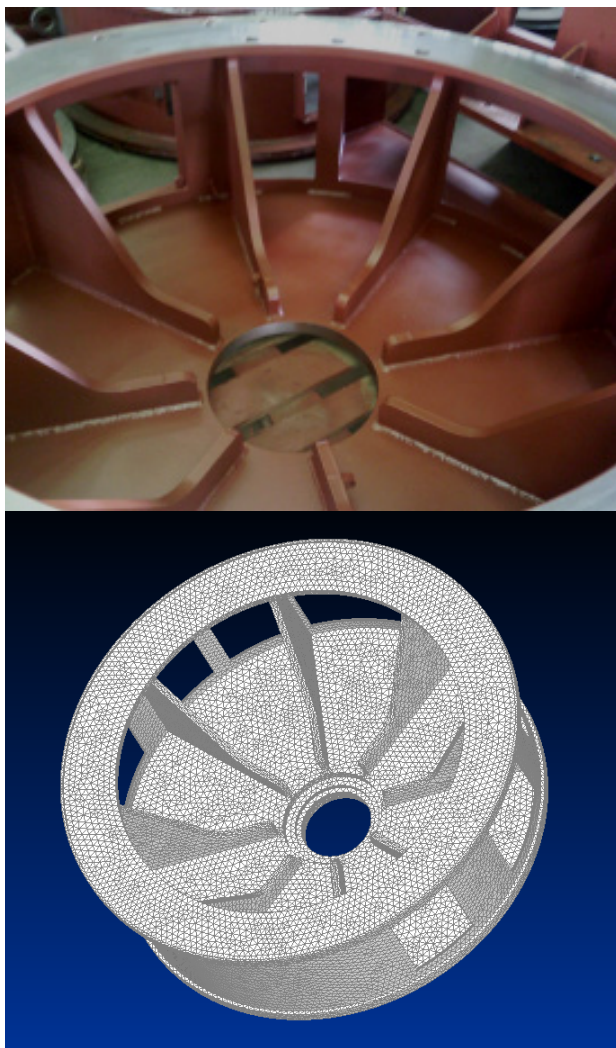
Mehanička konstrukcija generatora je određena slijedećim zahtjevima definiranim u tablici 4.

Tablica 4. Tehnička specifikacija generatora – mehanički zahtjevi

Tehnička specifikacija generatora – mehanički zahtjevi	
Izvedba (oblik ugradnje-vertikalni)	: IM 3011
Stupanj zaštite	: IP 44
Hlađenje	: IC 81W
Najveća dopuštena brzina (pobjeg)	: 950 o/min u trajanju od 2 min
Balansiranje rotora	: prema ISO 1940-1 min. G2,5
Vibracija ležaja prema	: ISO 10816-5 stupanj A
Rukavac osovine	: definiran je nacrtom naručitelja, prilagođen za ugradnju kotača Kaplan turbine
Aksijalna sila	: definirana je aksijalna sila od 233 kN
Tip ležaja	: klizni

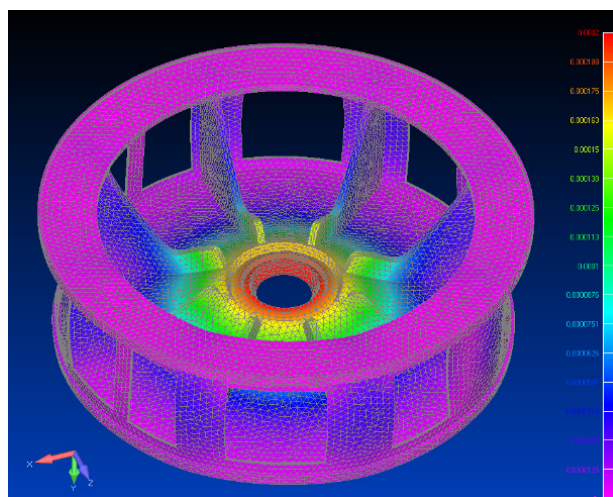
Dakle, generator je vertikalne izvedbe IM 3011 sa stupnjem mehaničke zaštite IP44 prema IEC 34-5, te hlađenjem tipa IC81W sa izmjenjivačem topline (unu-

tarnja cirkulacija zraka preko izmjenjivača topline (zrak/voda). Brzina vrtnje u pobjegu je više od 2,5 puta veća od nominalne. Kako je zadana velika aksijalna sila potrebno je obvezno provjeriti odabranu konstrukciju ležajnog štita odnosno kompletnog kućišta. Zbog vrlo malog dozvoljenog progiba definiranog od strane naručitelja, ova se provjera vrši numeričkom simulacijom. Na slici 3 prikazana je zavarena konstrukcija ležajnog štita i numerička mreža virtualnog prototipa. Rezultati numeričke simulacije prikazani na slici 4 pokazuju da su dobiveni pomaci u granicama dopuštenog.

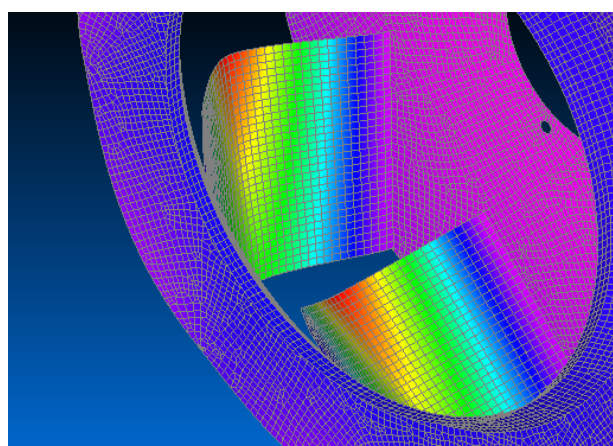


Slika 3. Zavarena konstrukcija ležajnog štita (gore), numerička mreža virtualnog prototipa (dole)

Na rotoru je potrebno provjeriti: kritične brzine rotora, naprezanja u ventilatoru te bandaže glava namota rotora.

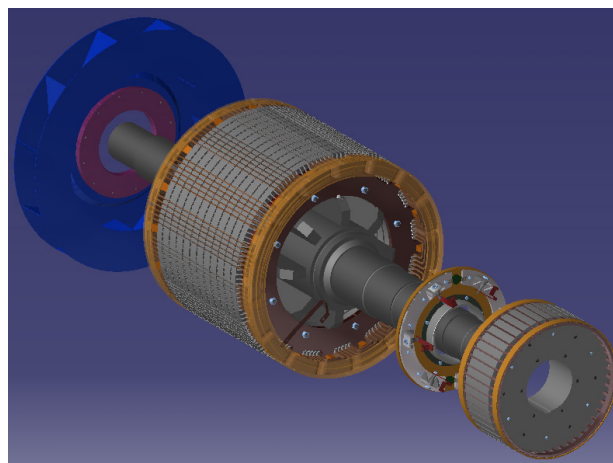


Slika 4. Rezultati – polje pomaka na strukturi ležajnog štita



Slika 5. Prikaz polja pomaka – deformacija lopatica

Analitički i numerički dobivene vrijednosti napreznja i deformacija kao i proračunate vlastite frekvencije su potvrdile ispravnost mehaničke konstrukcije rotora. Na slici 5 prikazane su deformacije lopatica ventilatora rotora računane na brzini pobjega, a na slici 6 je prikazana kompletna konstrukcija rotora.



Slika 6. Konstrukcija rotora (CAD 3D prikaz)

Na osnovu ukupnih radijalnih i aksijalnih sila koje djeluju na ležajeve odabrani su odgovarajući klizni ležaji podmazivani uljem. Zbog velikih toplinskih gubi-

taka u ležajevima, isti imaju prinudnu cirkulaciju ulja odnosno spojeni su na izmjenjivače topline kako bi se omogućilo adekvatno hlađenje ulja. Na osnovu maksimalnog momenta koji se javlja kod dvopolnog kratkog spoja, vrši se dimenzioniranje sidrenih vijaka za ugradnju i temeljenje generatora.

5. TOPLINSKI PRORAČUN I HLAĐENJE

Sustav hlađenja sinkronog generatora za malu hidroelektranu se projektira na temelju sljedećih zadanih podataka navedenih u tablici 5, uzimajući pri tome u obzir ukupne toplinske gubitke u stroju.

Tablica 5. Tehnička specifikacija – sustav hlađenja

Tehnička specifikacija generatora – sustav hlađenja	
Prirast temperature	: za klasu izolacije B
Vrsta hlađenja	: IC 81 W
Ulazna temperatura vode za hlađenje	: 25 °C
Izlazna temperatura rashladne vode	: 30 °C
Broj izmjenjivača topline	: 1

Materijal za namot statora i rotora prema nazivnim podacima odgovara klasi izolacije F. Međutim iz razloga stanovite sigurnosti, te povećanja trajnosti konstrukcije, naručitelj zahtjeva da prirast temperature bude za klasu izolacije B. To znači da generator mora davati nazivnu snagu pri nazivnom naponu, frekvenciji i faktoru snage bez prekoračenja slijedećih vrijednosti prirasta temperatura (IEC 34-1) :

- Namot statora za strojeve od 200 do 5000 kW:
 - 80 °C mjereno otpornom metodom, ili
 - 90 °C mjereno senzorima temperature
- Namot rotora za strojeve s cilindričnim rotorom:
 - 90 °C mjereno otpornom metodom

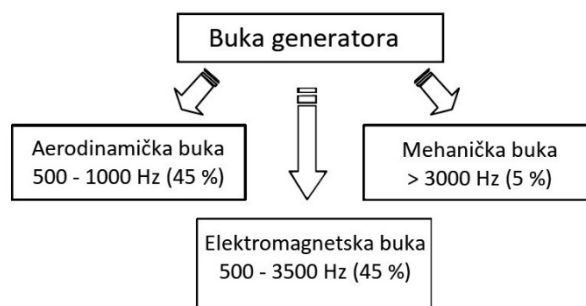
Na osnovu ukupnih gubitaka generatora određuje se potrebna količina zraka za hlađenje. Na osnovu količine zraka, karakteristika ventilatora, aerodinamičkog otpora sustava, te zadanih temperatura ulazne i izlazne rashladne vode, s proizvođačem izmjenjivača topline, odabire se odgovarajući izmjenjivač topline. Isti mora konstrukcijski biti prilagođen ugradnji u generator. Ulaženje u detalje toplinskog proračuna kao i proračuna ventilacije izlazi iz opsega ovog rada.

6. RAZINA BUKE

Utjecaj povećanja ekološke svijesti rezultira sve oštrijim zahtjevima na smanjenje zagađenje okoliša bukom. Stoga je razina buke pored učinkovitosti generatora postala jedan od vrlo važnih zahtjeva na projekt i konstrukciju. Kada je objekt male hidroelektrane u blizini naselja, traži se čak i jamstvo na razinu buke. U ovom

projektu je postavljen zahtjev za postizanje razine zvučnog tlaka od maksimalno 85 db(A), na 2 m udaljenosti i 1 m visine, i to u svim pogonskim stanjima generatora. Za generator ove veličine je to vrlo teško dostići.

Pored buke koju proizvodi aerodinamički sustav ventilacije i ležajevi stroja, elektromagnetski uzbuđene vibracije su značajan uzrok cjelokupne zvučne buke koju zrači generator. Buka ventilacije se nalazi u širokopojasnom frekvencijskom opsegu od oko 500... 1000 Hz. Ležajevi zrače jednim tonom frekvencije veće od 3 kHz. Najvažniji dio, zbog velike osjetljivosti ljudskog uha na frekvencijama od 500... 3500 Hz, su magnetski pobuđene vibracije koje se nalaze upravo u tom frekvencijskom rasponu. Na slici 7 je prikazana struktura buke sa pripadnim opsegom frekvencija i približnim relativnim utjecajem pojedinih dijelova na ukupnu razinu buke stroja. Buka ventilacijskog sustava ovisi i tipu hlađenja. Izvedbu generatora IP44 sa sustavom hlađenja IC81W ima manju buku od izvedbe IP23.



Slika 7. Glavni izvori buke sinkronog generatora

U ovom se projektu za analizu elektromagnetske buke koristila analitička metoda razvijena u [4]. Ova analiza počiva na proračunu vibracija statora koje se u osnovi određuju proračunom elektromagnetskih sila u zračnom rasporu, te mehaničkom proračunu vlastitih frekvencija paketa limova statora s namotom. Na bazi svih potrebnih ulaznih veličina, pažljiva analiza elektromagnetske buke pobuđene vibracijama statora, je pokazala da će razina buke biti veća od zahtijevane. Analiza drugih varijanti aktivnog dijela stroja je pokazala da bi zadovoljavanje zahtjeva za bukom iziskivalo povećanje dimenzija stroja i značajno povećanje troškova. Stoga se smanjenje buke realiziralo sa zvučnom izolacijom. Na kućište se postavila obloga debljine 30 mm od odgovarajućeg materijala za prigušenje buke. Na taj se način uz minimalne troškove postignuta tražena razina buke.

7. UČINKOVITOST I GUBICI

Vrijednosti svih parametara generatora mora biti u tolerancijama prema IEC standardima. Kod MHE je od izuzetnog značaja stupanj korisnosti generatora,

jer izravno utječe na godišnju proizvodnju električne energije. U nekim se MHE mijenja stari elektrostrojar-ski kompleks s novim isključivo zbog povećanja učinkovitosti. Stoga se stupanj korisnosti obvezno utvrđuje testiranjem kod tehničkog preuzimanja generatora, a odstupanje od zajamčene vrijednosti se penalizira sa smanjenjem ugovorene cijene generatora. Smanjenje cijene se ugovara. Obično se cijena smanjuje po 5% za svaki postotak niži od zajamčene ponderirane vrijednosti stupnja korisnosti. Ponderirana vrijednost stupnja korisnost ovisi o lokaciji MHE odnosno značajki vodnoga toka. Zajamčena ponderirana prosječna učinkovitost izračunava se prema sljedećoj formuli:

$$\eta_P = c_{20} \cdot \eta_{20} + c_{50} \cdot \eta_{50} + c_{70} \cdot \eta_{70} + c_{100} \cdot \eta_{100}$$

gdje su c_n težinski koeficijenti koji pripadaju određenom postotku opterećenja (na primjer za 70% opterećenja odnosno 980 kW, težinski koeficijent je $c_{70}=0.3$), a η_n su pripadne korisnosti.

Tablica 6. Podaci za određivanje ponderiranog stupnja korisnosti

Opterećenje	P	$\eta_{\cos j = 1,0}$	c_n
[%]	[kW]	[%]	[1]
20	280	93,28	0,10
50	700	96,45	0,25
70	980	96,75	0,30
100	1400	96,83	0,35

Dakle, na osnovu zahtijevanih podataka kupca (% opterećenja i težinski koeficijenti), te proračunskih vrijednosti učinkovitosti kod jediničnog faktora snage, dobije se sljedeća zajamčena ponderirana vrijednost:

$$\eta_P = 0,1 \cdot 93,28 + 0,25 \cdot 96,45 + 0,3 \cdot 96,75 + 0,35 \cdot 96,83 = 96,34 \%$$

Kod preuzimanja generatora od strane naručitelja učinkovitost je na ispitnom stolu određena indirektnom metodom pojedinačnog zbrajanja gubitaka sukladno propisima IEC 34-2 (čl. 9.2. i čl. 9.2.2. Resp.) i IEEE 115-1996 propisa (čl. 4.2). Separacija gubitaka se određuje mjerenjima u praznom hodu i kratkom spoju na generatoru koji je pogonjen istosmjernim motorom sa poznatim gubicima. Detaljni postupak mjerenja kao i dobiveni rezultati se prikazuju u posebnom elaboratu. Rezultati mjerenja učinkovitosti su prikazani u tablici 7.

Tablica 7. Rezultati mjerenja stupnja korisnosti

Postotak opterećenja [%]	20	50	70	100
Snaga u KW	280	700	980	1400
Učinkovitost %	92,93	96,09	96,42	96,33

Ponderirana korisnost je :

$$\eta_{MP} = 0,1 \cdot 92,93 + 0,25 \cdot 96,09 + 0,3 \cdot 96,42 + 0,35 \cdot 96,33 = 95,927 \%$$

Odstupanje izmjerene vrijednosti je manja od propisanog, pa proizvođač ne podliježe penalizaciji.

8. OPREMA GENERATORA

Generator je opremljen sa kompletnim uzбудnim sustavom (regulator i svi potrebni strujni i naponski transformatori) koje komponente se jednim dijelom isporučuju odvojeno, a jedan dio je ugrađen na samom generatoru. Za mjerenja temperatura namota koriste se osjetnici temperature tipa Pt100 smješteni u utore namota statora i to 6 osjetnika od kojih su 3 rezerva. Temperatura ležaja se također mjeri osjetnicima tipa Pt100 i to jedan osjetnik na ležaju na pogonskoj strani i dva osjetnika na ležaju suprotnom od pogonske strane. Mjeri se također temperatura u krugu rashladnog zraka sa dva Pt100 osjetnika.

U generatoru su ugrađeni antikondenzacijski grijači snage 630 W, 230 V. Na zahtjev kupca su na kućištima ležaja predviđene navojne rupe M8 duboke 20 mm za ugradnju vibracijskih senzora i to:

- na pogonskoj strani jedan senzor za mjerenje vibracija u radijalnom smjeru
- na strani suprotnoj pogonskoj jedan senzor u radijalnom i jedan senzor u aksijalnom smjeru

U sklopu izmjenjivača topline zrak / voda nalazi se detektor propuštanja vode. Pored 3 strujna transformatora ugrađena u zvjezdište za diferencijalnu zaštitu, isporučuje se i tri jednaka za ugradnju u rasklopni ormar. Također su dio opreme i svi ostali strujni i naponski transformatori potrebni u sustavu mjerenja i zaštite generatora.

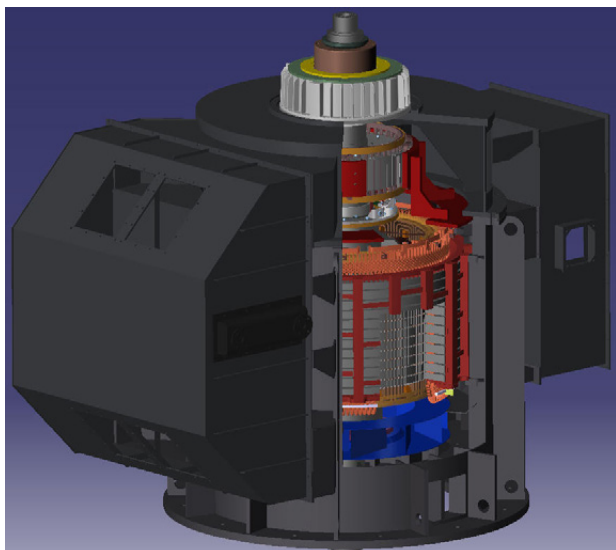
9. KONSTRUKCIJA GENERATORA

Na slici 8 prikazana je kompletna izvedba projektiranog generatora, a na slikama 9 i 10 ugradnja generatora i kompletno opremljen i ugrađen generator u MHE.

U tablici 8 su navedeni osnovni mehanički podaci proizvedenog generatora.

Tablica 8. Osnovni mehanički podaci izrađenog generatora

Osnovni mehanički podaci	
Ukupna dužina generatora	: 3500 mm
Ukupna masa generatora, uključujući izmjenjivače topline	: 24 800 kg
Ukupna težina rotirajućih dijelova	: 7000 kg
Moment inercije bez turbinskog pogona	: 750 kgm ²



Slika 8. Konstrukcija generatora (CAD 3D prikaz)



Slika 9. Ugradnja generatora



Slika 10. Kompletno opremljen i ugrađen generator

10. ZAKLJUČAK

Mnogopolni generatori s cilindričnim rotorom na koji se postavljaju posebni zahtjevi naručitelja, propisi distribucije, te ekološki standardi sva više nalaze svoju primjenu u malim hidroelektranama. Za brzu izradu projekta konkurentnog generatora, te davanje čim točnije ponude, važno je pravilno odabrati pouzdane i precizne metode za elektromagnetski, toplinski i mehanički dio projekta. Na primjeru izrade projekta, te njegove realizacije i utjelovljenjem proizvedenog i ispitnog generator s cilindričnim rotorom, prikazane su i opisane uspješno upotrijebljene metode.

LITERATURA

- [1] Piotrovskij, L.M. (1970), *Električni strojevi*, Tehnička knjiga, Zagreb
- [2] Jokić, R.; Štih, Ž.; Berberović, S. (2007), *Tehnologija projektiranja i optimizacije brodskog osovinskog generatora numeričkim simulacijama*, Savjetovanje EDZ, Šibenik
- [3] Henke, M.; Narjes, G.; Hoffmann, J.; Ponick, B. (2018), *Challenges and Opportunities of Very Light High-Performance Electric Drives for Aviation*, *Energies* 11(2):344
- [4] Jordan, H. (1950), *Geräuscharme Elektromotoren*, Verlag W. Giradet, Essen
- [5] Sirotić, Z.; Krajzl, V. (1966), *Upute za proračun sinkronih strojeva*, Sveučilište u zagrebu
- [6] Leylandn, B. (2014), *Small hydroelectric engineering practice*, Taylor & Francis Group, London, UK
- [7] Zakarian, Vaagn L.; Kaiser, Mark J. (1999), *Com-*

puter-aided design of synchronous generators with comb rotors, Applied Mathematical Modelling, 23

- [8] White paper (2013); *Electric Machine Design Methodology: A Revolutionary Approach*, ANSYS
- [9] Rosu, M.; Zhou, P.; Lin, D.; Ionel, D.; Popescu, M.; Blaabjerg, F.; Rallabandi, V.; Station D. (2018), *Multiphysics simulation by design for electrical machines, power electronics, and drives*, John Wiley & Sons
- [10] Spunei, E. (2019), *Optimal design of synchronous generator for micro hidropower plant*, Doctoral thesis
- [11] Aravind, C.V.; Grace, I.; Rozita, T.; Rajparthiban, R.; Rajprasad, R.; Wong, Y.V. (2012), *Universal Computer Aided Design for Electrical Machines*, IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications
- [12] Herold, T.; Böhmer, S.; Coenen, I., Steentjes, S. (2012), *The art of modelling Electrical Machines*, Institute of Electrical Machines, RWTH-Aachen University

PRIMJENA ADITIVNE PROIZVODNJE U PROCESU RAZVOJA NOVIH PROIZVODA

Milenko Jokić, dipl. ing. stroj.
Filip Jurman, bacc. ing. politehn.¹

Sažetak

U posljednjih nekoliko godina se uočava snažan rast industrije aditivne proizvodnje. Osim za brzu izradu prototipova, tehnologije 3d ispisa se koriste i za izradu gotovih proizvoda. Na tržištu je dostupan sve veći broj industrijskih 3d pisača koji su mogućnosti izrađivati tvorevine iz polimernih, keramičkih i metalnih materijala. Međutim, postavlja se pitanje opravdanosti odnosno ekonomske isplativosti njihove implementacije u proizvodne procese. Analizom tržišta i pregledom relevantne literature iz područja aditivne proizvodnje u radu su sistematizirane mogućnosti primjene iste u različitim fazama razvoja novih proizvoda, imajući pri tome u vidu zahtjeve za tehnološkom ispravnosti odnosno ekonomskom isplativosti procesa. Na kraju rada je opisan generički postupak izrade tvorevina primjenom aditivnih postupaka, te je prikazana izrada funkcionalnog prototipa kućišta USB prijenosne memorije primjenom postupka taložnog očvršćivanja.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, 3d pisač, brzi razvoj proizvoda, brza izrada prototipova, brza proizvodnja, taložno očvršćivanje.

1. UVOD

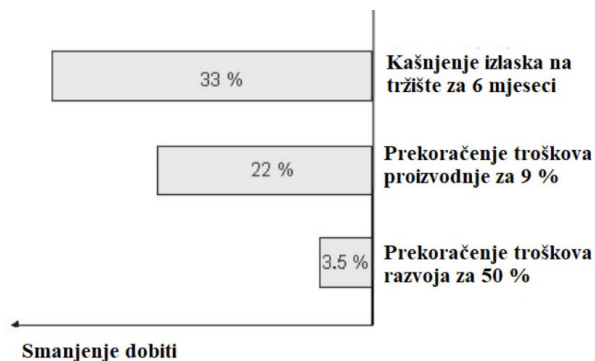
Suvremeni zahtjevi tržišta definiraju sve teže zadatke pred stručne timove ljudi koji sudjeluju u procesu razvoja novih proizvoda. Na tržištu se uočava povećanje broj varijanti proizvoda i sve kraći vremenski interval izlaska njihovih novih inačica. To je posljedica globalizacijskih procesa, ekonomskog i društvenog uređenja koji pridonose pojačanoj konkurenciji među proizvođačima. Da bi mogli biti konkurentni na tržištu, isti se sve više okreću krajnjem korisniku i njegovim zahtjevima [1]. Od proizvođača se očekuje brza prilagodba kako bi mogli uspješno odgovoriti na nove izazove i sve veći broj zahtjeva za pojedinačnim, maloserijskim i serijskim proizvodima posebne namjene, prilagođenim specifičnim zahtjevima krajnjeg korisnika. Pri tome se očekuje i ekološki odgovorno poslovanje odnosno projektiranje proizvodnih procesa i proizvoda koji neće negativno utjecati na održivi razvoj.

Mogu se definirati četiri ključna čimbenika koji izravno utječu na uspješnost poslovanja i konkurentnost na tržištu. To su: skraćenje vremena razvoja proizvoda, snižavanje troškova razvoja i proizvodnje, povišenje fleksibilnosti i povišenje kvalitete proizvoda [2,3].

Proces konstruiranja kao podproces procesa razvoja novog proizvoda u najvećoj mjeri utječe na gore navedene čimbenike. Nužno je osigurati sve preduvjete da se vrijeme potrebno za proces konstruiranja u što

većoj mjeri skрати i da se u tako skraćenom vremenskom periodu projektira optimalan proizvod. Također se očekuje projektiranje optimalnog i fleksibilnog proizvodnog procesa, te što preciznija procjena troškova buduće proizvodnje.

Kao odgovor na gore definirane zahtjeve nameće se uporaba suvremenih tehnologija objedinjenih pod pojmom „Brzi razvoj proizvoda“ (engl. „*Rapid Product Development*“). Uz CAD (engl. „*Computer Aided Design*“), CAM (engl. „*Computer Aided Manufacturing*“) i CAE (engl. „*Computer Aided Engineering*“) sustave koji su postali industrijski standard u proteklih nekoliko desetljeća, gore spomenuti pojam podrazumijeva upotrebu aditivne proizvodnje, reverzibilnog inženjerstva i virtualne stvarnosti u procesu razvoja. Važnost ulaganja u koncept brzog razvoja proizvoda se uočava analizom slike 1.



Slika 1. Utjecaj različitih čimbenika na gubitak dobiti [4]

U nastavku rada su sistematizirane mogućnosti primjene aditivne proizvodnje u procesa razvoja novih

¹ Student diplomskog sveučilišnog studija informatike, Sveučilište Jurja Dobrile u Puli

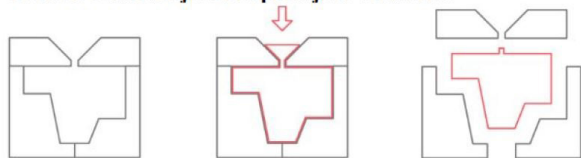
proizvoda. U radu je opisan generički postupak izrade dijelova odnosno tvorevina primjenom tehnologija 3d ispisa, te je prikazan primjer izrade funkcionalnog prototipa kućišta USB prijenosne memorije primjenom postupka taložnog očvršćivanja.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

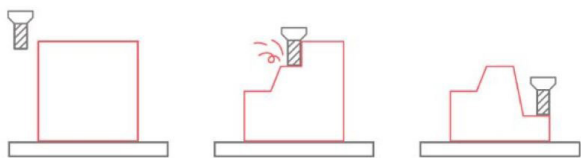
U općem slučaju, bazirajući se samo na geometriji dijela, tehnologije izrade se dijele u tri osnovne grupe. To su: obrada odvajanjem čestica, obrada oblikovanjem bez promjene volumena (lijevanje, kovanje, savijanje, prešanje itd.) i aditivna proizvodnja [5]. Posljednja se počinje razvijati i primjenjivati od druge polovine 80-tih godina prošlog stoljeća [1].

Standard ISO/ASTM 52900:2015 definira aditivnu proizvodnju kao proces povezivanja materijala u svrhu izrade dijelova direktno iz 3d računalnih modela, uobičajeno sloj na sloj, što je suprotno tehnologijama obrade odvajanjem čestica i oblikovanjem bez promjene volumena (slika 2).

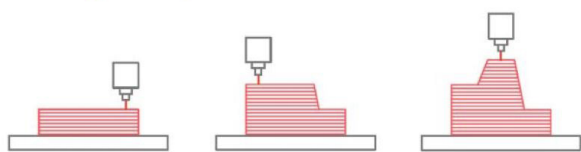
Obrada oblikovanjem bez promjene volumena



Obrada odvajanjem čestica



Aditivna proizvodnja



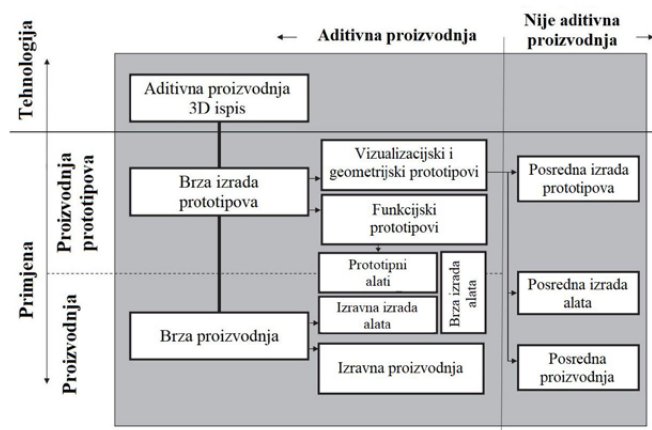
Slika 2. Tehnologije izrade dijelova [6]

Za razliku od konvencionalnih postupaka, aditivna proizvodnja omogućava *brzu* izradu dijelova bez potrebe za dodatnim alatima, napravama, kalupima i tehničkom dokumentacijom. Ovdje se naglašava da pojam *brzo* ima relativno značenje. Proizvodnja dijela (prototipa) primjenom aditivne proizvodnje u početnim fazama procesa razvoja može biti brža i ekonomičnija u odnosu na konvencionalne postupke. Međutim, serijska proizvodnja istog dijela primjenom aditivne proizvodnje će još uvijek u najvećem broju slučajeva biti spora odnosno neekonomična.

Postupcima aditivne proizvodnje se mogu izraditi dijelovi vrlo kompleksnih geometrija koje nije moguće

proizvesti konvencionalnim tehnologijama, obradom odvajanjem čestica, lijevanjem, kovanjem, prešanjem itd. Time se omogućava izrada dijelova optimalnih geometrija odnosno dijelova koji će zadovoljiti sve zahtjeve za funkcionalnom ispravnosti uz minimalni utrošak materijala za njihovu izradu. U tu svrhu se u procesu razvoja novih proizvoda koriste numeričke metode za strukturnu optimizaciju koje su sastavni dijelovi suvremenih CAE sustava. Prvenstveno se koriste topološka i lattice optimizacija. U općem slučaju, može se reći da aditivna proizvodnja zahtjeva manji utrošak materijala i energije čime se smanjuju štetni učinci proizvodnje na okoliš, prvenstveno iscrpljivanje prirodnih bogatstva, te zagađenje okoliša ispušnim plinovima, prašinom, bukom i otpadom.

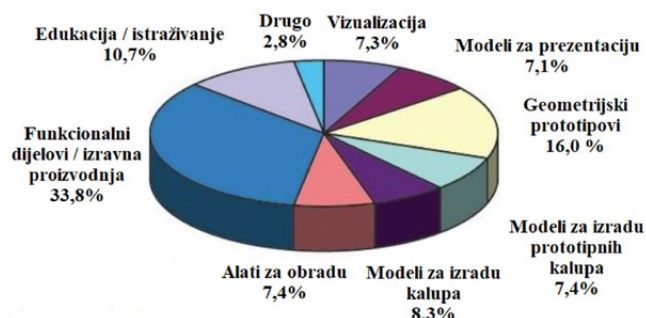
S obzirom na tehnološka ograničenja u pogledu brzine izrade dijelova u velikoserijskoj i masovnoj proizvodnji, aditivna proizvodnja se prvenstveno koristi za izradu vizualizacijskih, geometrijskih i funkcionalnih prototipova u različitim fazama procesa konstruiranja, ali i za izradu gotovih proizvoda specijalne namjene (često prilagođenih posebnim zahtjevima krajnjeg korisnika) u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji. Ostali ograničavajući faktori su preciznost izrade, kvaliteta površine, izbor i svojstva materijala, smanjena mogućnost kontrole proizvodnog procesa, potreba za potpornim strukturama kod određenih postupaka izrade itd. Sistematizacija mogućih primjena aditivne proizvodnje u procesu razvoja novih proizvoda je prikazana na slici 3.



Slika 3. Sistematizacija mogućih primjena aditivne proizvodnje [4]

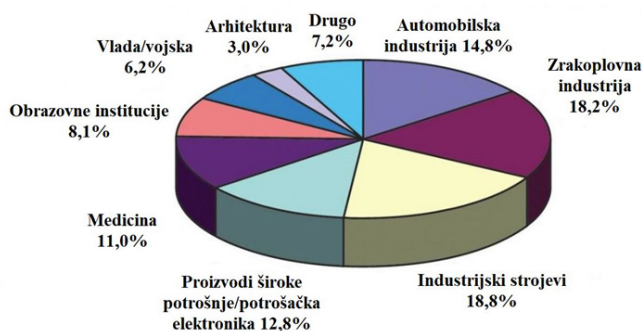
Analizom tržišta u posljednjih nekoliko godina uočava se snažan rast industrije aditivne proizvodnje. Uz 3d pisače za osobnu upotrebu i profesionalne 3d pisače koji se koriste prvenstveno za izradu prototipova i koji su u najvećoj mjeri ograničeni na korištenje polimernih materijala, sve se više koriste industrijski 3d pisači u procesu proizvodnje. Isti omogućavaju izradu dijelova iz polimernih, keramičkih i metalnih materijala, te su vrlo često opremljeni i sustavima za naknadnu obradu dijelova. Ubrzani razvoj uređaja i postupaka za 3d ispis koji omogućavaju izradu dijelova iz metalnih materijala utječe na sve veći udio primjene aditivne proizvodnje

nje u izradi gotovih (funkcionalnih) proizvoda (slika 4). Detaljna sistematizacija i opis uređaja za 3d ispis se mogu pronaći u [1], [4] i [7].



Slika 4. Primjena dijelova izrađenih postupcima aditivne proizvodnje [8]

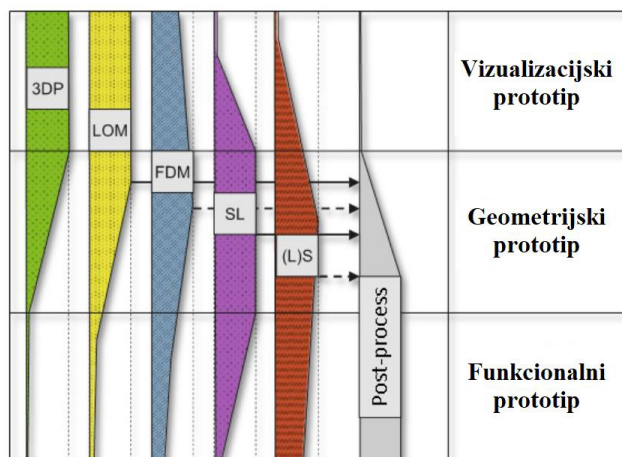
Aditivna proizvodnja najveću primjenu ima u zrakoplovnoj industriji, automobilske industriji i medicini. Na slici 5 je prikazana struktura primjene postupaka aditivne proizvodnje u različitim granama industrije i ostalim područjima.



Slika 5. Primjena aditivne proizvodnje u različitim područjima [8]

2.1. Brza izrada prototipova

Brza izrada prototipova (eng. „*Rapid prototyping*“) je pojam koji definira primjenu tehnologije aditivne proizvodnje u svrhu izradu prototipova. Prema namjeni, razlikuju se vizualizacijski, geometrijski i funkcionalni prototipovi. Vizualizacijski prototipovi se koriste u svr-



Slika 6. Upotreba postupaka aditivne proizvodnje u ovisnosti o namjeni prototipa [4]

hu prezentacije. Geometrijski i funkcionalni prototipovi se koriste kako bi se ispitivanjima na fizičkim modelima dobile povratne informacije o aspektima funkcionalne ispravnosti budućeg proizvoda odnosno kako bi se u što većoj mjeri osigurao njegov optimalan dizajn. Na slici 6 se prikazuje odnos upotrebe različitih postupaka aditivne proizvodnje s obzirom na namjenu prototipa. Sistematizacija i opis postupaka aditivne proizvodnje se može pronaći u [1,4,7].

Na slici 7 je prikazan primjer funkcionalnog prototipa koji je korišten u svrhu ispitivanja učinkovitosti sustava ventilacije osobnog automobila. Model je izrađen primjenom postupka stereolitografije (SLA).



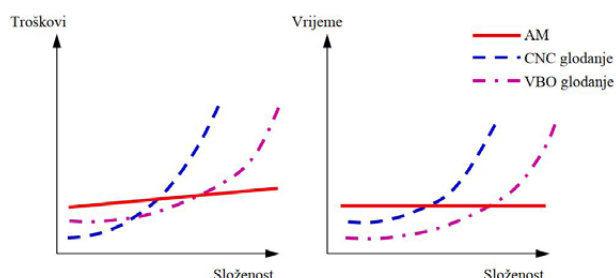
Slika 7. Primjer funkcionalnog prototipa (izvor: 3D Systems) [4]

2.2. Brza proizvodnja

Brza proizvodnja (eng. „*Rapid manufacturing*“) je pojam koji definira primjenu postupaka aditivne proizvodnje u svrhu izrade gotovih proizvoda odnosno dijelova koji će udovoljavati svim zahtjevima za funkcionalnom i tehnološkom ispravnošću definiranim konstrukcijskim zadatkom i procesom konstruiranja. Iako se aditivni postupci za brzu proizvodnju dijelova iz metalnih materijala trenutno jako brzo razvijaju u pogledu preciznosti izrade i svojstava materijala, još uvijek se kao najveći problem nameće brzina izrade odnosno brzina proizvodnje, što je posebno izraženo kod zahtijeva za proizvodnjom dijelova većih dimenzija. S toga se brza proizvodnja u najvećoj mjeri i dalje koristi za pojedinačnu i maloserijsku proizvodnju.

Primjena tehnologija aditivne proizvodnje u procesu proizvodnje je opravdana u slučajevima kada upotreba konvencionalnih postupaka nije moguća odnosno opravdana zbog složene geometrije dijela i/ili kada upotreba konvencionalnih postupaka nije opravdana zbog velikih troškova izrade, prvenstveno zbog potrebe za izradom alata, naprava, kalupa itd. kod pojedinačne i maloserijske proizvodnje. Da li će se u procesu proi-

zvodnje koristiti aditivni postupci će ovisiti i o zahtjevi-
ma za preciznošću izrade, kvaliteti površine, mehanič-
kim, toplinskih i kemijskim svojstvima materijala dijela
itd. S obzirom na povećanje složenosti (kompleksno-
sti) geometrije dijela, na slici 8 je prikazana isplativost
upotrebe postupaka aditivne proizvodnje u odnosu
obradu odvajanjem čestica.



Slika 8. Isplativost upotrebe obrade odvajanjem čestica i aditivne proizvodnje s obzirom na složenost dijela [9]

Primjeri gotovih proizvoda izrađenih postupcima adi-
tivne proizvodnje su prikazani na slikama 9 i 10.



Slika 9. Zubni most (lijevo, izvor: GoetheLab FH Aachen/Sokalla), kućišta slušnih pomagala (desno, izvor: 3D Systems) [4]

U trećoj fazi definiraju se parametri izrade uz pomoć
specijaliziranih programskih sustava (npr. Autodesk
Netfabb, ANSYS SpaceClaim, Ultimaker Cura itd.). Isti
omogućavaju simulaciju procesa 3d ispisa, optimalno



Slika 10. Nosač antene za RUAG Sentinel satelit (lijevo, izvor: EOS GmbH), kalup za izradu golf loptica (desno, izvor: EOS GmbH)

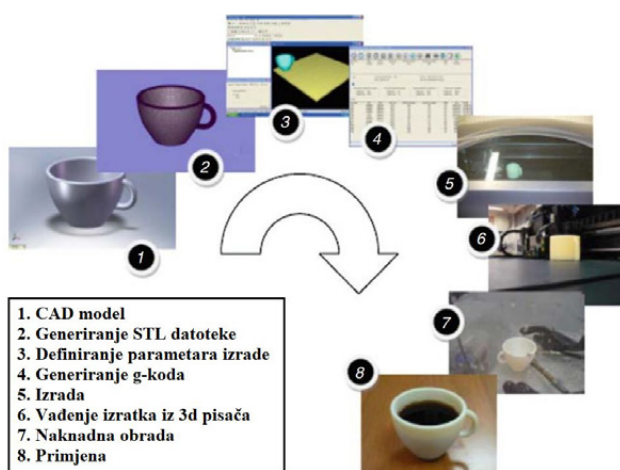
definiranje potpornih struktura ako su potrebne, opti-
malno definiranje temperatura, brzina ispisa, debljine
slojeva, preciznosti izrade, unutrašnje strukture (latti-
ce optimizacija) itd. Osnova za definiranje svih para-
metara izrade je STL datoteka generirana u drugoj fazi.

3. FAZE IZRADE DIJELOVA ADITIVNOM PROIZVODNOM

U općem slučaju, izrada dijelova primjenom postupa-
ka aditivne proizvodnje se može podijeliti u osam faza
(slika 11). Za izradu vizualizacijskih i geometrijskih
prototipova u procesu konstruiranja uglavnom nisu
potrebni postupci naknadne obrade objedinjeni u sed-
moj fazi izrade, pa se ista tada izostavlja.

U prvoj fazi se primjenom nekog od komercijalnih ili
nekomercijalnih CAD sustava izrađuje 3d geometrijski
model. Pri tome je jako važno da vanjska geometrija 3d
modela u potpunosti odgovara obliku proizvoda koji se
želi proizvesti. 3d geometrijski model se također može
izraditi primjenom reverzibilnog inženjerstva (3d la-
sersko skeniranje).

U drugoj fazi se generira STL datoteka na temelju
prethodno izrađenog 3d geometrijskog modela. Ista
sadrži samo informacije o vanjskoj konturi dijela, bez
podataka o svojstvima materijala, boji, unutrašnjoj
strukтури itd. Uglavnom svi poznatiji CAD sustavi imaju
mogućnost generiranja STL datoteke, te se može reći
da je ista postala industrijski standard u postupku pri-
preme modela za 3d ispis.



Slika 11. Faze izrade tvorevine primjenom aditivne proizvodnje [7]

U četvrtoj fazi se generira g-kod, te se isti učitava u 3d pisač. Zatim slijedi faza izrade odnosno 3d ispisa. Nakon što je proces 3d ispisa završen, šesta faza podrazumijeva vađenje izratka iz pisača. Ovdje treba voditi računa o temperaturama i ostalim sigurnosnim mjerama. Prema potrebi, ovisno o funkciji izrađene tvorevine, u sedmoj fazi se vrši naknadna obrada (čišćenje, pjeskarenje, poliranje, toplinska obrada itd.). Osmu fazu podrazumijeva izrađenu tvorevinu spremnu za upotrebu.

4. IZRADA KUĆIŠTA USB PRIJENOSNE MEMORIJE TALOŽNIM OČVRŠĆIVANJEM

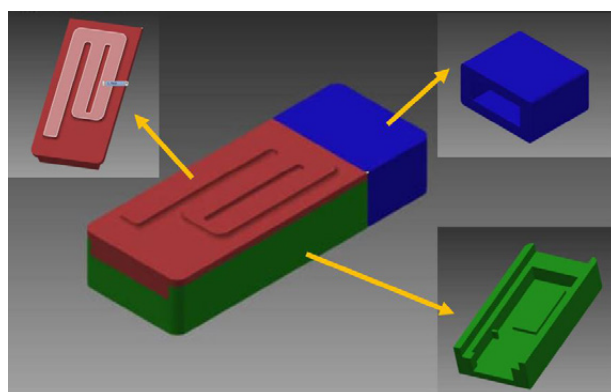
Postupak taložnog očvršćivanja (eng. „*Fused Deposition Modeling - FDM*“) je aditivni postupak kod kojeg polimerni materijal u obliku žice prolazi kroz mlaznicu, zagrijava se i tali. Iz numerički upravljane mlaznice izlazi materijal u omekšanom stanju, a pri sobnoj temperaturi ubrzo očvršćuje te se polaže na željena mjesta. Stoga je važno održavati temperaturu materijala malo iznad temperature očvršćivanja. [10] Tehnologijom taložnog očvršćivanja se mogu izrađivati vizualizacijski, geometrijski i funkcionalni prototipovi, ali i gotovi proizvodi. Prednosti i nedostaci primjene postupka taložnog očvršćivanja su navedeni u tablici 1. Više o FDM aditivnom postupku se može pronaći u [1,4,7]

Tablica 1. Prednosti i nedostaci FDM aditivnog postupka [1]

Aditivni proizvodnja – postupak taložnog očvršćivanja	
Prednosti	Nedostaci
• manja potrošnja energije • nema zahtjeva za hlađenje i ventilaciju • jednostavna upotreba • relativno mala investicija • niski troškovi održavanja • male izmjere uređaja	• ograničeni izbor materijala • često nužna izrada podupora • potrebna naknadna obrada proizvoda • vidljive linije između slojeva • snižena čvrstoća proizvoda • oscilacije temperature tijekom postupka mogu dovesti do delaminiranja (raslojavanja) proizvoda

Funkcionalni prototip USB prijenosne memorije je izrađen u svrhu prezentacije dizajna i testiranja ergonometrije budućeg proizvoda. 3d geometrija kućišta (slika 12) je izrađena primjenom programskog sustava Autodesk Inventor 2015, a za definiranje parametara izrade je korišten programski sustav Ultimaker Cura 2.7.0. Osnovni parametri izrade su:

- debljina sloja: 0,1 mm
- širina linije: 0,3 mm
- broj linija vanjskih kontura: 3
- gustoća ispune: 30 %
- brzina ispisa: 45 mm/s



Slika 12. 3d geometrija kućišta USB prijenosne memorije

Za izradu je upotrijebljen 3d pisač Ultimaker 2 Extended+, a za materijal je odabrana PLA plastika. Nakon 3d ispisa je izvršena naknadna površinska obrada odvajanjem čestica korištenjem brusnog papira. Na slici 13 je prikazan izrađeni funkcionalni prototip USB prijenosne memorije.



Slika 13. Funkcionalni prototip USB prijenosne memorije

5. ZAKLJUČAK

U posljednjih nekoliko godina uočava se snažan rast industrije aditivne proizvodnje. Kontinuirano poboljšavanje tehnologija postojećih i razvoj novih aditivnih postupaka omogućava sve veću primjenu istih u svim fazama procesa razvoja novih proizvoda. Dok su se u svojim počecima tehnologije 3d ispisa uglavnom koristile za izradu prototipova, danas je sve češća njihova primjena za izradu gotovih dijelova odnosno proizvoda. To je posljedica sve većeg broja dostupnih komercijalnih industrijskih 3d pisaa koji omogućavaju izradu tvorevina iz metalnih materijala. Međutim, još uvijek se kao najveće ograničenje šire primjene aditivne proizvodnje nameće problem brzine izrade, posebice kod dijelova većih dimenzija. S toga je upotreba iste u proizvodnom procesu uglavnom ograničena na pojedinačnu i maloserijsku proizvodnju, i to prvenstveno u zrakoplovnoj industriji, automobilske industriji i medicini.

Imajući u vidu suvremene trendove i sve veće zahtjeve tržišta za proizvodnjom pojedinačnih (personaliziranih) proizvoda i proizvoda koji će biti u najvećoj mogućoj mjeri optimizirani u pogledu smanjenja mase (topološka i lattice optimizacija), sigurno je da će se aditivna proizvodnja i dalje nastaviti razvijati te da će se industrijski 3d pisaa sve češće koristiti u procesu proizvodnje.

U ovom radu su definirani osnovni pojmovi koji se odnose na aditivnu proizvodnju, te su sistematizirane mogućnosti primjene iste u različitim fazama procesa razvoja novih proizvoda. Opisan je generički postupak izrade tvorevine primjenom aditivnih postupaka, te je na primjeru kućišta USB prijenosne memorije prikazan postupak izrade funkcionalnog prototipa primjenom taložnog očvršćivanja.

LITERATURA

- [1] Godec, D.; Šercer, M. (2015), *Aditivna proizvodnja*, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb
- [2] Gebhardt, A. (2003), *Rapid Prototyping*, Carl Hanser Verlag, Munchen
- [3] Godec, D. (2005), *Utjecaj hibridnog kalupa na svojstva injekcijski prešanog polimernog otpreska*, doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb
- [4] Gebhardt, A.; Hötter, J. (2016), *Additive Manufacturing*, Carl Hanser Verlag, Munchen
- [5] Burns, M. (1993), *Automated Fabrication – Improving Productivity in Manufacturing*, PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey
- [6] <https://www.core77.com/posts/71171/Choosing-Between-3D-Printing-n-CNC-Machining> (2.7.2019.)

- [7] Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B. (2010), *Additive Manufacturing Technologies : Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer
- [8] Wohlers, Terry T.; Campbell, I. (2017), *Wohlers Report 2017: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry : Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, Inc.
- [9] Cukor, G. (2011), *Aditivna proizvodnja*, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci, Rijeka
- [10] Godec, D.; Krsnik, I.; Šercer, M. (2010), *Od ideje do gotovoga polimernog proizvoda*, Polimeri, 31(2010)2, str.71-76, Zagreb

BASIC AND ADVANCED DC MOTOR POSITIONING APPLICATIONS

Nikola Baćac, mag. ing. el.¹
dr. sc. Ervin Kamenar²

Abstract

This article gives an overview of the articles „Comparison of different DC motor positioning control algorithms” and “Modelling and experimental validation of an ultra-high precision positioning system based on the FPGA architecture” from the same authors to compare different electrical motor positioning control algorithms implemented on two different types of hardware. The paper tries to answer in which situations the control system should be implemented on processor based DAQ and in which circumstances on FPGA based DAQ control hardware. Transient responses of a PID controller, a cascade controller and a state-space controller implemented on a processor based DAQ are considered. Results show that the state-space controller has the fastest response time but PID controller has zero steady-state error. On the other hand, it was concluded that the response of the system controlled via two PI controllers in cascade is not satisfactory due to the slow dynamics of the used DAQ hardware. A new set of experiments is conducted next by employing small scale ultra-high precision positioning device controlled via real-time FPGA based control hardware and measured and simulated dynamic responses are compared. Good correspondence is achieved though some differences between simulated and measured results can still be observed due to the simplification of certain parameters in the simulation model.

Key words: DC motor, control algorithms, PID controller, cascade controller, state-space controller, Stribeck model, Dahl model, FPGA, LabVIEW

1. INTRODUCTION

An electrical motor is widely used in applications where an accurate response in a predictable and repeatable manner is needed. It finds application in many of today's mechatronics systems such as robots, precision positioning machines and industrial applications. In a pick-and-place machine for production of electronic components, for example, components must be placed precisely on the printed circuit board (PCB), before the soldering process. Further example is a robot manipulator that uses several motors for 2D or 3D positioning of the robotic arm [1].

This work considers usage of the conventional actuators in different precision positioning applications aiming at achieving micro or sub-micro resolutions. If the positioning accuracy criteria is above micro scale, basic control methods are sufficient and processor based control hardware with the slower rate is viable. On the other hand, in the field of nanotechnologies precision can be achieved only by employing advanced position-

ing control algorithms and by using real-time control hardware. In section 2, three types of basic electrical motor positioning algorithms implemented on processor based DAQ control hardware are described. In section 3, advanced PID control implemented on FPGA based DAQ control hardware is examined. Experimental set-ups are used to validate the behavior of the proposed control algorithms on processor and FPGA based DAQ control systems. The article tries to distinguish which control hardware should be used depending on the observed application and used control approach.

1.1 Overview of control hardware

Generally, data acquisition systems (DAQ) are used to represent real world physical (analog) signals in a digital form for further computational processing. Simplified DAQ block scheme is depicted in Fig. 1.

Depending on the bandwidth of the ADC output and the nature of the processing, different digital signal processing solutions might be preferred. For low- to

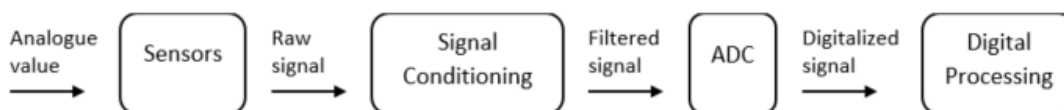


Figure 1. Simplified DAQ block scheme

¹ British American Tobacco, Burići bb, 52352 Kanfanar

² University of Rijeka, Faculty of Engineering & Centre for Micro- and NanoSciences and Technologies, Vukovarska 58, 51000 Rijeka, CROATIA

mid-speed DAQ (for example, audio processing and control applications, such as in the automotive indu-

stry), the digital samples are generally processed by a microprocessor or a processor. For high-speed DAQ and correlated multichannel applications, such as Radial Neutron Camera [15], conventional processors can't handle the DAQ bandwidth [14]. FPGA based DAQ meets those requirements. Some of the FPGA DAQ advantages over CPU based DAQ are as follows [16]:

- Ability to create standard and non-standard interfaces with very high speed data rates (>100 Mbit/s),
- True parallel data processing,
- Precise time data event,
- Very high processing speed (>100 MHz).

In the following sections, different digital control approaches are implemented on different control hardware systems. A processor based data acquisition system (DAQ) with slower dynamics is used in the first experimental set-up while a field programmable gate array (FPGA) based hardware is employed next.

2. POSITIONING CONTROL ALGORITHMS IMPLEMENTED ON A PROCESSOR BASED DAQ HARDWARE

In this section, different control algorithms are studied and developed in the LabVIEW working environment interfaced to the National Instruments data acquisition hardware (DAQ). Basic experimental set-up, where the rotational angle of the rotor is controlled variable, is employed.

2.1. Description of the experimental set-up

A block-scheme shown in Fig. 2 represents the experimental set-up that is used to validate the characteristics of typical electrical motor positioning control methods. The actuating system is composed of an electrical motor with embedded gearhead and an encoder used as a feedback sensor. The power needed to operate the electrical actuator is obtained by using LM675T power amplifier. The control system is, on the other hand, based on the National Instruments (NI) hardware (PXI 6221 DAQ card) and the LabVIEW software [1].

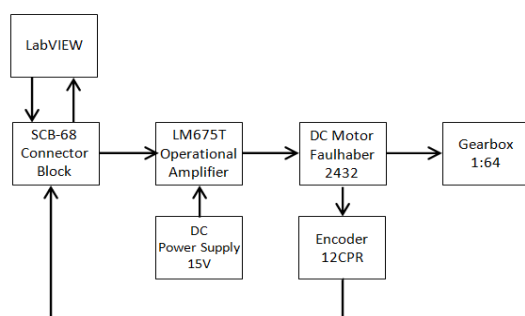


Figure 2. Experimental set-up scheme. Reproduced from [1].

A Faulhaber 2342 DC motor (Figure 3) with an embedded planetary gearhead (marked with (1)) with reduction ratio of 1:64 and an incremental rotational encoder (marked with (2)) with 12 counts per revolution [3] is used as an actuating element. The main characteristics of this assembly are given in Table 1.

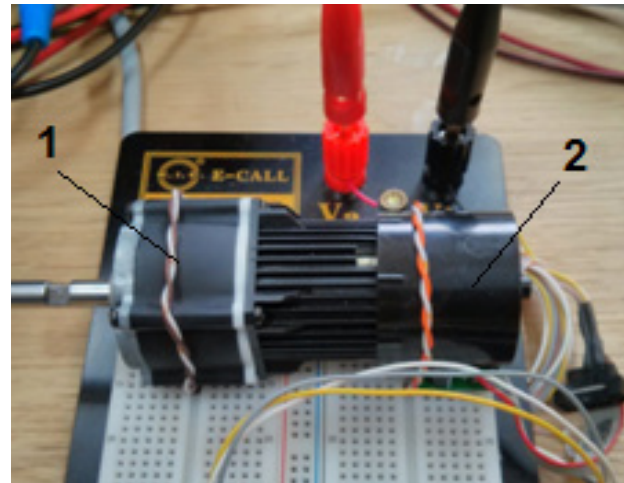


Figure 3. DC motor with gearbox and encoder. Reproduced from [1].

Table 1. Faulhaber 2342 DC motor characteristics [3].

Moment of inertia	J	$5.7 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Torque constant	K_m	$13,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$
Back-EMF constant	K_e	$1,4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{rpm}}$
Armature resistance	R_a	$1,9 \Omega$
Nominal voltage	U_n	12 V
Nominal armature current	I_{an}	75 mA
Friction coefficient	b	$1 \frac{\text{mNm}}{\text{rpm}}$

The encoder coupled to the actuator is an incremental encoder with two channels with a 90 degree phase shift and 12 cycles per revolution (CPR). Two encoder channels are used to determine position speed and direction. Encoders are also characterized by their encoding type, which directly affects encoder resolution. In the described experimental set-up, rising and falling edges on both channels are counted (Fig. 4) in order to achieve the highest resolution [1]. This type of encoding is usually referred as X4 encoding [4, 5].

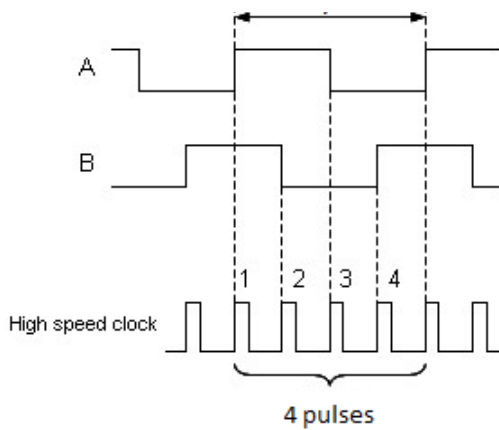


Figure 4. Reading and encoding signals from incremental encoder. Reproduced from [1].

2.2 LabVIEW control implementation

The LabVIEW programming environment is used to develop the control algorithms and to store the measurement to a comma separated file (CSV) for further analysis performed in Matlab/SIMULINK environment. LabVIEW is a graphical programming interface whose routines are called virtual instruments (VIs). Virtual instruments are composed of user graphical interface (front panel) and program part where the algorithms are implemented (block diagram). In this example the algorithms are developed to be used on a DAQ hardware. In the considered case, the DAQmx **Start Task block** is used to trigger the channels used in the set-up. The acquired data is then passed to the DAQmx **Read block** positioned within the time loop with 2 ms sample time. Similarly, voltage output is driven using the DAQmx **Write block**. This output file containing CSV data is created by using a **Write-to-spread sheet file block**. Theoretical background for basic control algorithms and Matlab implementation is described in [1].

2.3. PID control

Digital PID control algorithm is implemented within the LabVIEW working environment by using the predefined PID block from the **LabVIEW Control, Design and Simulation Module** [1]. The particular front panel as well as the core part of the block diagram are shown in Figure 5.

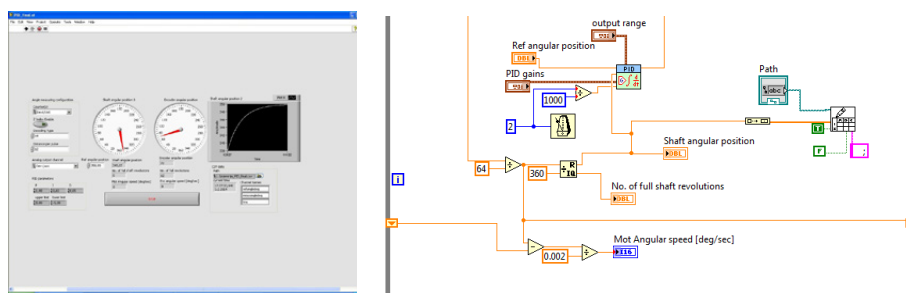


Figure 5. PID regulation VI: front panel (left), block diagram (right). Reproduced from [1].

It has to be noted here that the controller input (error) is calculated as the difference between the reference position and the position measured by the incremental encoder. Based on the calculated error and PID gains, the controller calculates the control effort needed to achieve desired position [1].

2.4. Cascade control

Cascade control is composed of the motor shaft position control loop and the motor shaft velocity control loop. Output of the outer position control loop is used as reference input for the inner velocity control loop. The front panel and the block diagram of the cascade control composed of two PI controllers in series are shown in Figure 6. For a given reference position, the dynamic response of the system is visualized on a waveform chart and on a circular gauge. The motor shaft speed (RPM) is shown as well [1].

Since the cascade controller uses both position and velocity states, while the encoder gives only the position measurements, the needed velocity is calculated by using the algorithm of the block diagram shown in Figure 6 (right).

2.5. State-space control

The state-space controller, composed of vector with two gains, is synthesized by the pole-placement method using Ackerman's formula. An additional gain that changes the reference position is used in order to eliminate the steady-state error. The discrete state space representation of the electrical actuator is used in all the calculations. The controller is then implemented in the LabVIEW, as depicted on Figure 7 [1].

2.6. Experimental results and discussion

Performances of the three mentioned basic positioning control algorithms are examined with an input step command of 200 degrees. DC motor input voltage is limited to $\pm 5V$, which dictates the minimum rise time for all control topologies [1].

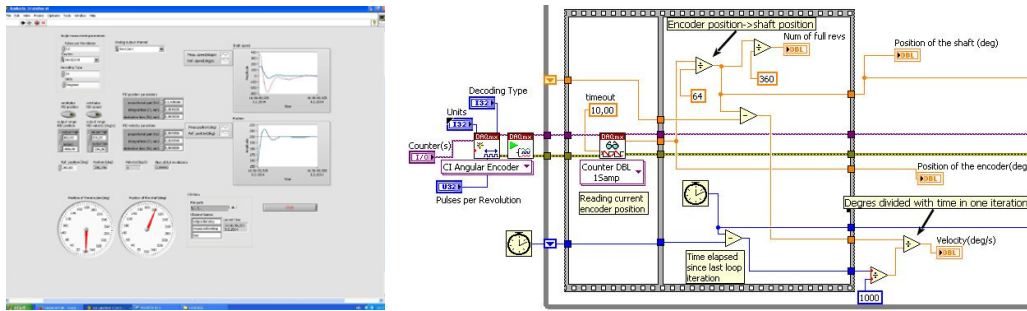


Figure 6. Cascade control VI: front panel (left), block diagram (right). Reproduced from [1].

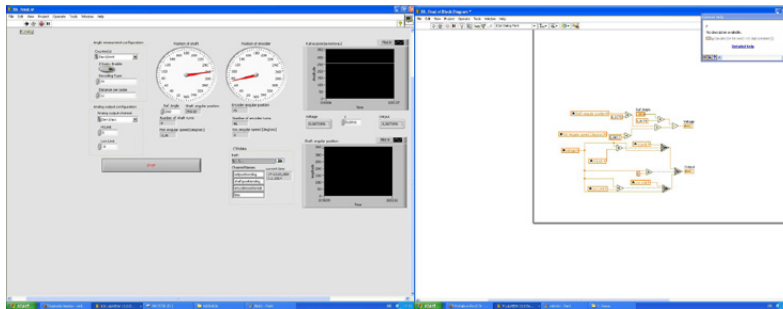


Figure 7. State-space control VI: front panel (left), block diagram (right). Reproduced from [1].

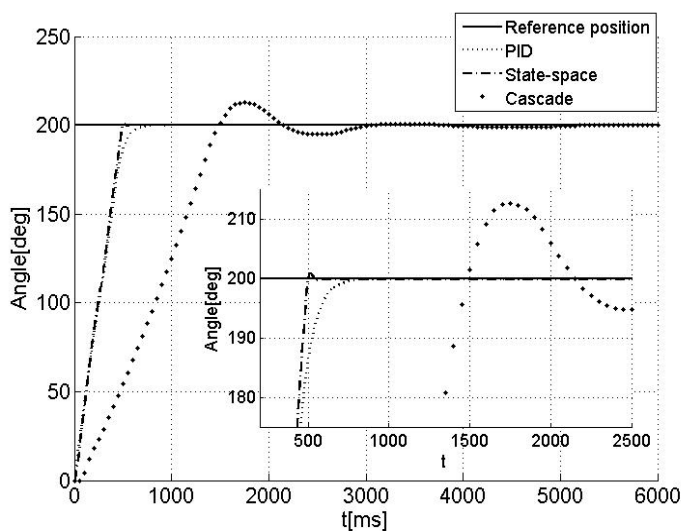


Figure 8. Combined experimental results. Reproduced from [1].

Table 2. Comparison of dynamics for different control methods (experiments). Reproduced from [1]

	PID	Cascade	S.S.
Rise time [ms]	425	1120	390
Percent overshoot [%]	0	6.35	0.5
Settling time [ms]	800	3500	550
Steady-state error [%]	0	0.1	0.04

The comparison of transient responses obtained through several tests for all three used controllers is given in Fig. 8. Rise time, percent overshoot, settling time and steady-state error for each control method are in turn given in Table 2. The results show that, since there are no additional time constants (no additional poles) added to the system, the state-space control algorithm has faster response times comparing to the PID and the cascade controller [1]. On the other

hand, the system with PID controller has the smallest steady-state error. Furthermore, experiments with cascade control allowed establishing that, due to the sampling time limitations of the DAQ hardware, the velocity signal results in errors because the computational routines are slower than motor's response [1]. This issue can be prevented by using dedicated hardware, such as FPGA based DAQ, that is convenient for processing high-bandwidth signals. Other approach is to have sensor or equipment that directly gives analogue or digital signal proportional to shaft rotational velocity, such as a tachogenerator.

3. POSITIONING CONTROL ALGORITHM IMPLEMENTED ON FPGA BASED DAQ HARDWARE

In this section, PID control algorithm is studied and developed in the LabVIEW working environment interfaced to the National Instruments field programmable gate array (FPGA) real-time hardware. Experimental set-up, where the linear displacement of the translator is controlled variable, is employed.

3.1. Description of the experimental set-up

In this section, the experiments are conducted on a 50 mm translational axis of the experimental set-up shown in Figure 9. A translational displacement is achieved by converting the rotational motion of a Faulhaber DC actuator with embedded gearhead, by using ball screw machine element, to linear displacement of the translator. The main characteristics of the used actuator are shown in Table 3. A linear incremental encoder with a 100 nm resolution is used as a feedback sensor. The control of the system is achieved via a National Instruments FPGA module [2, 8].

Table 3. Faulhaber 1724 DC motor characteristics [9]

Moment of inertia	J	$1 \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Torque constant	K_m	$6,59 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Nm}}{\text{A}}$
Back-EMF constant	K_e	$0,69 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{rpm}}$
Armature resistance	R_a	$3,41 \Omega$
Nominal voltage	U_n	6 V
Nominal armature current	I_{an}	20 mA
Nominal speed	n_0	8600 rpm

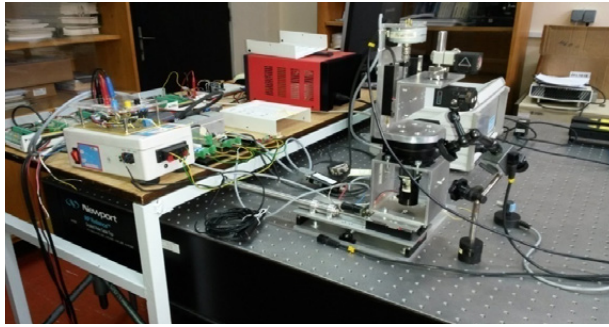


Figure 9 Experimental set-up.

In order to validate experimental responses, a simulation model (Figure 10) for the considered device is developed by employing Matlab/SIMULINK programming environment [2]. The mathematical modeling is based on the method described by Sato [11]. The friction of the electrical actuator is described by using the Striebeck function, while the friction of the machine elements is simulated by the Dahl friction model given by the following equation [6]:

$$\dot{F} = \sigma \left| 1 - F/F_c \operatorname{sign} v(t) \right|^n \operatorname{sign} \left(1 - F/F_c \operatorname{sign} v(t) \right) v(t) \quad (1)$$

where F is the overall friction force, $F_c = 30.4 \text{ N}$ is Coulomb friction, v is velocity, $n = 1$ is a parameter related to the force-displacement curve shape, while $\sigma = 75 \text{ N/m}$ is the stiffness i.e. the slope of this curve for $F = 0$ [7]. F_c is obtained by measuring the motor current for constant velocities. The other parameters are obtained numerically via the minimization of the deviations of the modelled behavior with respect to the measured response [2].

3.2. Obtained results and discussion

To compare the experimental and simulation results, unidirectional repetitive point-to-point and low velocity experiments, are conducted for different positioning steps. The parameters K_p , K_i and K_d of the used digital PID controller are obtained from developed MATLAB/Simulink model. The mathematical formulation of the used digital controller is given by the following equation [2]:

$$u(n) = K_p e(n) + K_i \sum_{k=0}^n e(k) + K_d [y(n) - y(n-1)] \quad (2)$$

where $u(n)$ is the output from the controller, n is the discrete time step of a sampling time $T = 1 \text{ ms}$, $e(n)$ is the discrete proportional and derivative error term, $e(k)$ is the integral error term, k is the summation variable, while $y(n)$ and $y(n-1)$ are the measured positions in two subsequent discrete time steps [2].

Repetitive point-to-point experiments are performed for $100 \mu\text{m}$ and 1 mm positioning steps, while the achieved position is concurrently measured via the interferometric system. It was concluded that FPGA based control hardware and the used PID controller allow to achieve micrometric positioning repeatability.

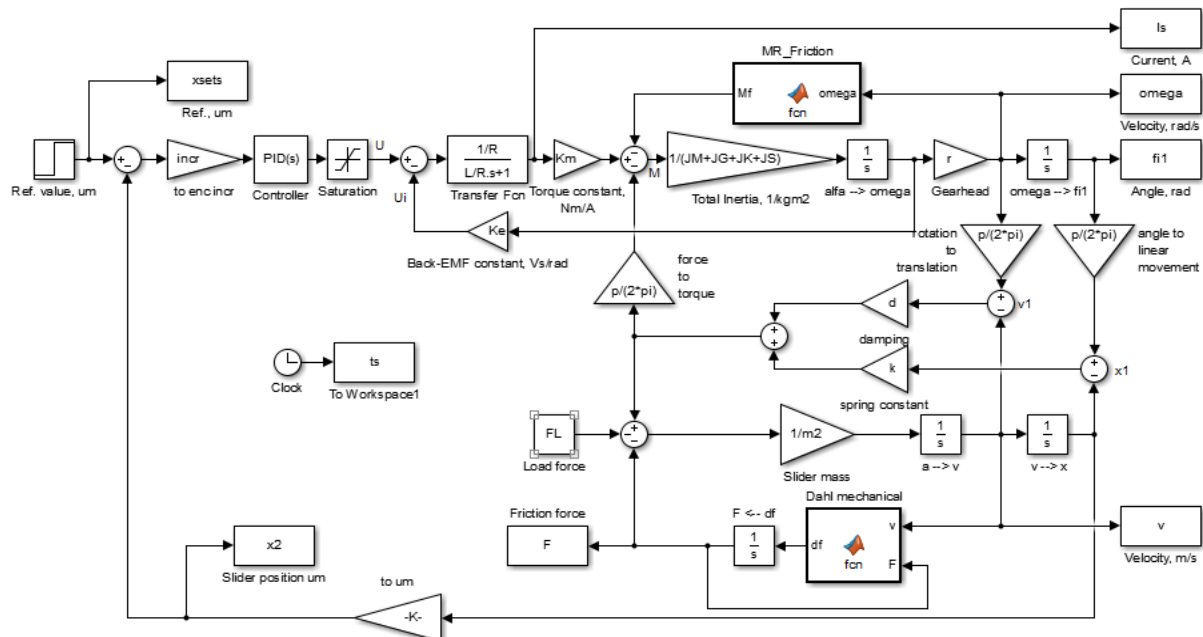


Figure 10. Matlab/Simulink model of the ultra-high precision positioning system.

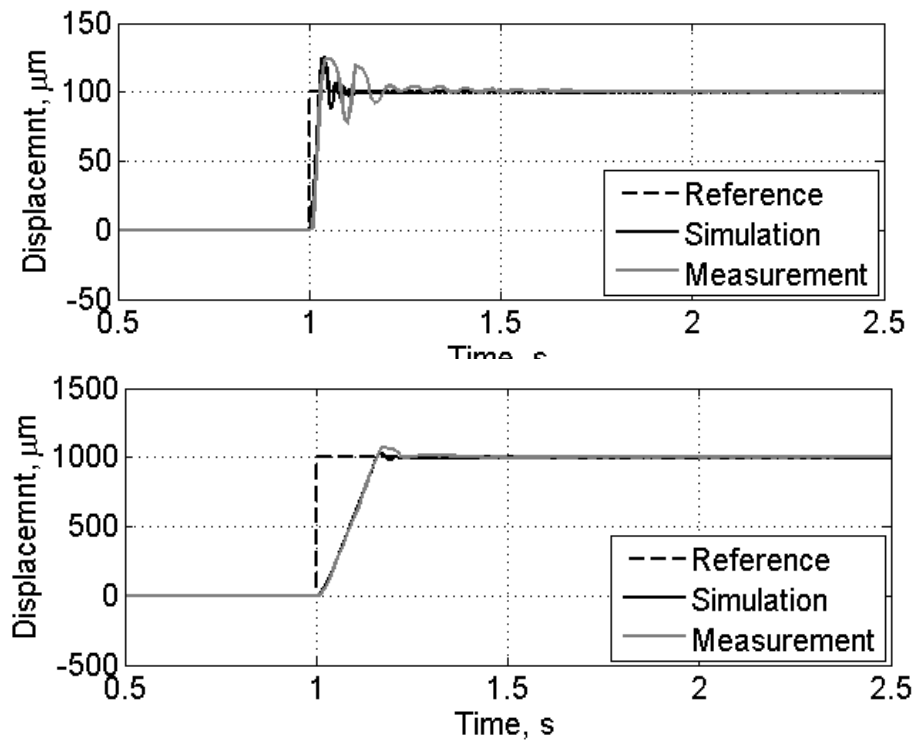


Figure 11. Dynamic responses for 100 μm and 1 mm steps.

ty and precision. In fact, the calculated unidirectional point-to-point positioning accuracy and repeatability, according to the ISO 230-2:2014 machine tools' standard, are 3.19 μm for the 100 μm steps and 1.83 μm for the 1 mm steps [2].

Figure 11 gives also the comparison of the experimental data and the response simulated in Matlab working environment. It can be observed that certain deviations are present due to the stochastic nature of friction which is not incorporated into the friction model [2].

4. CONCLUSIONS AND OUTLOOK

An overview of different electrical motor control strategies is given in this work. These are namely a conventional PID controller, a cascade controller and the state-space controller synthesized by pole-placement procedure using Ackerman's formula. Controllers are then implemented in the LabVIEW programming environment and experimental measurements are conducted. Two different experimental set-ups are used: NI PC-based DAQ with the slower dynamic and NI FPGA module with faster dynamics. It was shown that when the simpler experimental set-up is used, a hardware with the slower dynamics can generally be used, even though the performed analyses showed that the used processor based DAQ has too slow dynamics when two PI controllers in cascade are employed.

On the other hand, if the system is used in linear positioning applications where micron or sub-micron positioning resolutions are expected, a real-time control

hardware has to be employed. Matlab/Simulink simulation model of ultra-high precision positioning mechatronics system was developed where Stribeck and Dahl friction models are employed to describe nonlinearities present in the nonlinear system. Experiments were conducted on FPGA based DAQ experimental set-up to compare simulated and measured dynamic responses. Although some discrepancies were present between simulation and experimental results due to the simplification of some parameters in the simulation model, it can be concluded that linear displacement with micron precision can be achieved even with a regular DC motor when the position controller is implemented on an FPGA based control hardware.

REFERENCES

- [1] N. Baćac, V. Slukić, M. Puškarić, B. Štih, E. Kamenar and S. Zelenika, "Comparison of different DC motor positioning control algorithms", Proc. 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics MIPRO, pp. 138-143, 2014.
- [2] E. Kamenar and S. Zelenika, "Modelling and experimental validation of an ultra-high precision positioning system based on the FPGA architecture," Proc. EUSPEN's 15th International Conference & Exhibition, Leuven, Belgium, June 2015.
- [3] URL: www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_2342_CR_DFF.pdf, Accessed: November 25th, 2019.

- [4] URL: www.gurley.com/Encoders/Understanding_Quadrature.pdf
- [5] G. S. Gordon, "Square Waves And Pulses: A Clarification," *Measurements & Control*, 1988.
- [6] Dahl P R 1968 A solid friction model Techn. report (Aerospace Corp.)
- [7] Drinčić B 2012 Mechanical Models of Friction that Exhibit Hysteresis, Stick-Slip and the Stribeck Effect D.Sc. thesis (U. Michigan)
- [8] Kamenar E and Zelenika S 2013 Proc. 36th MI-PRO Int. Conv. (Rijeka, HR: MIPRO) 138-43
- [9] URL: https://www.faulhaber.com/fileadmin/Import/Media/EN_1724_SR_DFF.pdf, Accessed: November 25th, 2019.
- [10] Kamenar E, Zelenika S and Franulović M 2014 Proc. 14th Int. EUSPEN Conf. 1 (Delft, N: Sieca Repro) 360-3
- [11] Sato R 2011 *Int. J. Autom. Techn.* 5 875-82
- [12] Zelenika S and De Bona F. 2009 *J. Mech. Eng. Sci.* 223/C8 1955-63
- [13] Armstrong-Helouvry B, Dupont P and Canudas de Wit C 1994 *Automatica* 30/7 1083-138
- [14] URL: <https://www.nutaq.com/blog/advantages-using-fpgas-high-speed-high-density-data-acquisition-systems>, Accessed: November 25th, 2019.
- [15] Ana Fernandes, Nuno Cruz, Bruno Santos, et. al., „FPGA code for the data acquisition and real-time processing prototype of the ITER Radial Neutron Camera“, *IEEE Transactions on Nuclear Science* PP(99):1-1, March 2019
- [16] URL: <https://mtnstormdaq.com/blog/2012/10/fpga-based-daq-part-1-introduction-and-benefits/>, Accessed: November 25th, 2019.

IMPLEMENTACIJA ERP INFORMACIJSKOG SUSTAVA U PODUZEĆU

Saša Radetić, struč. spec. oec
Danijela Cetina, struč. spec. oec
Miško Macolić Tomičić, struč. spec. oec.

Sažetak

Planiranje poslovnih resursa predstavlja skup procesa i alata za upravljanje ravnotežom tražnje i potreba te njihovo predviđanje, koji omogućavaju objedinjeni pogled na ukupno poslovanje poduzeća, uz podršku odlučivanju. Implementacija takvih sustava za rezultat imaju veću produktivnost iz razloga što se cijeli proces promatra kontinuirano od dizajna proizvoda preko nabave sirovina, proizvodnje, te servisiranja na terenu a ujedno omogućuju i tehničke izmjene od strane zaduženih inženjera te se sve izvodi u realnom vremenu.

Glavne riječi: ERP, poslovno informacijski sustavi, poslovni procesi, sustavi planiranja materijalnih potreba

Abstract

Business resource planning is a set of processes and tools which help us manage customer demands and needs. As well it helps with the prediction of demands and needs which allows us a unified view of total business operations with decision support. The implementation of such systems results in greater productivity because the entire process is continuously monitored from product design to raw material procurement, production and field servicing, while also providing technical modifications by engineers in charge. It is possible to get the update in real time.

1. UVOD

Poslovno informacijski sustavi u skladu sa brzo rastućem razvojem moderne tehnologije pružaju sve više načina za optimalno upravljanje cjelokupnim poslovanjem. Poduzeća trebaju identificirati probleme te implementirati informacijski sustav po svojoj mjeri koji omogućuje kvalitetnije upravljanje informacijskim tehnologijama, projektima, ulaganjima i rizicima. ERP (eng. Enterprise Resource Planning) informacijski sustav predstavlja strateški alat namijenjen integraciji svih poslovnih procesa koji se odvijaju unutar organizacije i u njenom okruženju i što optimalnijem korištenju dostupnih resursa. U ovom članku se prikazuje važnost ERP informacijskih sustava, te njihove prednosti i nedostatke koje treba uzeti u obzir pri implementaciji istih.

2. ERP SUSTAVI

ERP sustav je integrirani informacijski sustav koji služi za sveobuhvatnu podršku poslovanju, a koristi se u gotovo svim dijelovima organizacije nekog poduzeća. ERP sustavi su fokusirani na potpuno integriranje svih aspekata od dizajna proizvoda, proizvodnje, materijalne evidencije, financijske evidencije, glavne knjige, upravljanja ljudskim resursima pa sve do marketinga i

prodaje. ERP prvenstveno nudi mogućnost prilagodbe i uporabe gotovih programskih rješenja ili programsku podršku kreiranu po mjeri određenog korisnika.¹

Svojstva ERP programskih paketa su:²

- sastoji se od više podsustava i velikog broja predefiniranih opcija,
- podržava stotine različitih poslovnih funkcija i procesa rada,
- realiziran je s više milijuna linija programskog koda i,
- u razvoj je utrošena ogromna količina vremena visoko kvalificiranih radnika.

Prilagodba ERP modula konkretnom korisniku obavlja se posebnim alatima te standardnim ili posebnim programskim jezicima. Naime sam posao prilagodbe i uvođenja, ključan je faktor za uspješnu implementaciju ERP sustava. Bitno je napomenuti da je u današnje vrijeme većina ERP sustava raspoloživa u modularnom obliku, što omogućava poduzećima da sustav prilagođavaju vlastitim potrebama i mogućnostima. Broj modula ovisi i njihove mogućnosti ovisi o proizvođačima ERP sustava.³

1 Gajšak, M: **Projektiranje informacijskih sustava ERP**, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2004.

2 Fertalj, K. et al.: **Komparativna analiza programske potpore informacijskim sustavima u Hrvatskoj**, verzija 1.1., Zagreb, 2002. str.5

3 Gajšak, M: **Projektiranje informacijskih sustava ERP**, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2004.

Glavni cilj ERP-a je implementacija najboljih praksi za sve poslovne procese. Može se reći da je ERP ključna poslovna strategija danas i najveća je prednost njegove implementacije stjecanje sposobnosti eliminacije višestrukih sustava unutar poslovnog sustava bez povećanja proširenosti jedinstvenog sustava. Prema definiciji ERP je alat koji će pomoći poslovnim sustavima da resurse iskoriste na najbolji način.⁴

ERP podržava sve ključne poslovne procese („core business“) proizvodno-poslovnog sustava:⁵

- obrada narudžbi kupaca,
- planiranje proizvodnje i potrebnih resursa,
- nabavljanje i prijem materijala i odnos s dobavljačima,
- upravljanje zalihama,
- upravljanje radnim nalogima,
- otpremanje, izrada računa, naplata i odnosi s kupcima,
- upravljanje ljudskim resursima,
- osnovna sredstva i njihovo održavanje.
- obračun proizvodnje i poslovanja itd.

2.1. Razvoj ERP sustava

Sustavi planiranja materijalnih potreba (MRP) razvijeni su 70-ih godina. MRP se povezuje s jednostavnim operacijama u proizvodnji. On predstavlja napredniji koncept ranijih napora obrade popisa materijala. Izumitelji MRP-a tražili su bolju metodu naručivanja materijala, a pronašli su je upravo u tom konceptu. Temeljni koncept planiranja materijalnih potreba zasniva se na četirima pitanjima koja predstavljaju njegovu logiku:⁶

- Što ćemo proizvoditi?
- Što je potrebno da se to proizvede?
- Što imamo?
- Što moramo nabaviti?

MRP je brzo evoluirao u nešto više nego „bolji način naručivanja materijala“. Prvi korisnici vrlo su brzo došli do zaključka da MRP ima sposobnosti veće od pretpostavljenih. Primijetili su da taj koncept može biti koristan za planiranje u cilju zadržavanja važećih krajnjih rokova nakon što su distribuirane narudžbe. MRP otkriva kada je krajnji rok narudžbe i kada dolazi do kašnjenja.⁷

MRP postaje formalan mehanizam vođenja prioriteta u promjenjivom okruženju proizvodnje. Promjene u proizvodnom okruženju nisu moguće ili vjerojatne, one su neizbježne. Funkcija MRP-a koja je orijentirana na pridržavanje krajnjih rokova i promjenama u proizvodnim poslovnim sustavima je planiranje prioriteta. Kapacitet predstavlja još jedan, jednako važan čimbenik

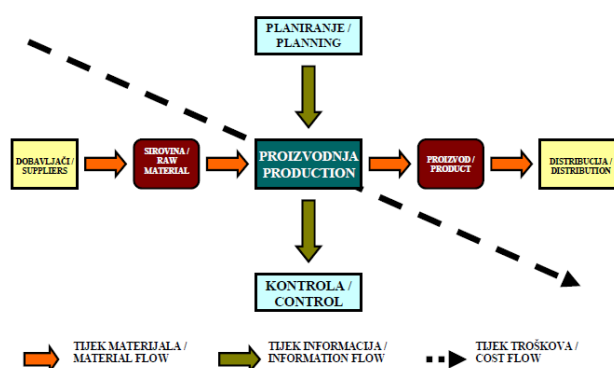
u planiranju prioriteta.⁸

Razvijanjem koncepta MRP došlo se do koncepta planiranja resursa proizvodnje, MRP II. On se bavi optimizacijom proizvodnih procesa na način da se sinkroniziraju dobava potrebnog materijala i potrebe u proizvodnji. MRP II uključuje područja kao što su: upravljanje distribucijom, upravljanje u proizvodnji, vođenje projekata, financije, ljudski resursi, itd. MRP II ima sposobnost simulacije proizvodnoga poslovnog sustava. MRP II uključuje tri dodatna elementa u odnosu na MRP zatvorene petlje:⁹

- planiranje prodaje i operacijsko planiranje predstavlja koncept uravnoteženja potražnje i dobave na razini količina,
- financijsko sučelje je sposobnost pretvaranja operativnih planova u novčane jedinice,
- simulacija predstavlja sposobnost MRP II koncepta da postavi pitanje „što ako“ te da se dobije odgovor na osnovi kojega se može djelovati.

Da bi se postigla učinkovita proizvodnja korištenjem koncepta MRP II, potrebno je unificirati i harmonizirati tri vrlo važna tijeka unutar poslovnog sustava. Tri tijeka u poslovnim sustavima prikazana su na slici 1. To su:¹⁰

- tijek materijala → pretvorba poluproizvoda ili sirovine u finalni proizvod,
- tijek informacija → transformiranje ulaznih u izlazne informacije, te planiranje i kontrola proizvodnje,
- tok troškova → troškovi se akumuliraju u finalnom proizvodu od njegova usvajanja preko proizvodnje, distribucije, prodaje, sve do kraja jamstvenoga roka.



Slika 1. Tri tijeka u poslovno proizvodnom sustavu

Izvor: Vuković A., Džambas I., Blažević D.: **Engineering review: Razvoj ERP koncepta i ERP sustava**, izvorni znanstveni članak, Faculty of Engineering/Faculty of Civil Engineering University of Rijeka, 2007.

Evolucijom koncepta MRP, MRP zatvorene petlje, te MRP II dolazi se do trenutno aktualnoga koncepta

⁴ www.kwaliteg.co.za

⁵ Brumec, J. i Vrček, N.: **Stanje i razvoj ERP sustava**, Sažetak predavanja za doktorski studij, Fakultet organizacije i informatike, Zagreb, 2011.

⁶ Vuković A., Džambas I., Blažević D.: **Engineering review: Razvoj ERP koncepta i ERP sustava**, izvorni znanstveni članak, Faculty of Engineering/Faculty of Civil Engineering University of Rijeka, 2007.

⁷ Ibidem.

⁸ Wight, O.W.: *The Executive's Guide to Successful MRP II*, John Wiley and Sons, New York 1993

⁹ Vuković A., Džambas I., Blažević D.: **Engineering review: Razvoj ERP koncepta i ERP sustava**, izvorni znanstveni članak, Faculty of Engineering/Faculty of Civil Engineering University of Rijeka, 2007.

¹⁰ Sheikh, K.: *Manufacturing Resource Planning (MRP II): With Introduction to ERP, SCM and CRM*, McGraw Hill Professional, New York, 2003.

planiranja resursa poslovnog sustava ili ERP-a. Temelji ERP-a isti su kao i MRP II. ERP se kao skup poslovnih procesa razvio zahvaljujući razvoju informacijskih i komunikacijskih tehnologija, dok je njegov konceptualni razvoj samo jedan od koraka u razvoju upravljanja poslovnim sustavima. Opsegom je veći i efikasniji pri radu s više poslovnih jedinica. Financijska integracija je jača. Alati dobavnih lanaca, koji podržavaju poslovanje izvan granica poslovnog sustava su robusniji. Računalni sustav planiranja resursa poslovnog sustava, (ERP-sustav) predviđa i uravnotežuje potražnju i dobavu, predstavlja skup alata za predviđanje, planiranje i terminiranje na razini poduzeća, a ti alati izvode sljedeće zadatke:¹¹

- povezuju kupce i dobavljače u cjelovit dobavni lanac,
- koriste provjerene procese za donošenje odluka,
- koordiniraju prodaju, marketing, operacije, logistiku, nabavu, financije, razvoj proizvoda i ljudske resurse.

Koncept ERP izravan je nasljednik MRP II, te nasljeđuje sve njegove karakteristike. Ima veći broj mogućih primjena zbog definiranih alata planiranja na cijelom poslovnom sustavu. Glavni razlozi implementacije koncepta ERP su:¹²

- integracija financijskih informacija,
- integracija informacija o narudžbama klijenata,
- standardiziranje i ubrzanje proizvodnih procesa,
- smanjenje zaliha,
- standardiziranje informacija o ljudskim resursima,

Potrebno je napraviti razliku između koncepta ERP-a i ERP-sustava. ERP-sustavi omogućavaju ostvarivanje ERP-koncepta.

2.2. Arhitektura i tehnologija sustava

ERP sustavi baziraju se na otvorenoj višeslojnoj arhitekturi klijent/poslužitelj („Client/Server“). Princip otvorene arhitekture znači fleksibilnost proširivanja i dodavanja drugih komponenata ili funkcionalnosti sustava. Višeslojna arhitektura omogućava simultani pristup podacima mnogih korisnika, čime se smanjuje rizik od pada sustava. Arhitektura može biti dvoslojna, troslojna i Internet/Intranet.¹³ Dvoslojnu arhitekturu čine:¹⁴

- prvi sloj - odnosi se na poslužitelja koji upravlja s aplikacijom i s bazom podataka te ujedno pokriva poslovnu logiku,
- drugi sloj - odnosi se na klijenta koji kontrolira ko-

risničko sučelje, odgovoran je za prikaz podataka i ulaz podataka do poslužitelja.

Kako poslužitelja može biti više, tako i klijenti mogu biti distribuirani na više mjesta koji su međusobno povezani, pa su i ERP aplikacije postavljene na distribuirani ili disperzivan način. Poslužitelji mogu biti centralizirani, a klijenti su obično postavljeni na različitim lokacijama poduzeća. Troslojnu arhitekturu čine:¹⁵

- podatkovni sloj - odnosi se na poslužitelja baze podataka koji osigurava integritet podataka primjenom ugrađenih automatskih kontrola i procedura,
- aplikacijski sloj - odnosi se na aplikativnog poslužitelja kojih može biti jedan ili više, a pokriva glavni dio poslovne logike, omogućava komunikaciju s bazom podataka i osigurava integritet podataka kada to nije u stanju provesti baza podataka,
- prezentacijski sloj - odnosi se na korisnički sloj ili klijenta, odnosno softvera za korisničko sučelje koji je zadužen za unos, prikaz i ispis podataka.

Internet/Intranet arhitektura bazira se na jakoj komunikacijskoj lokalnoj mreži („Local Area Network – LAN“) i raširenom području mreža („Wide Area Network – WAN“). Većina IT odjela razmatra seljenje na internet/intranet čime bi se omogućila široka komunikacija. Podaci koji se procesiraju i pohranjuju u sustavu vrlo su kritični i osjetljivi za što je odgovorna sigurnost sustava. Sigurnost sustava može se slikovito prikazati piramidom (slika 2).



Slika 2. Sigurnost ERP sustava

Izvor: autori prema Gajšak, M: Projektiranje informacijskih sustava ERP, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2004.

Osnova piramide je fizička sigurnost hardvera, baza podataka i medija za spremanje podataka. Druga razina radi s operacijskim sustavom. Treća razina je orijentirana na sigurnost softvera koja se postiže instaliranjem sigurnosnog produkta ili njegovom ugradnjom u operacijski sustav. Na toj razini osigurava se prostor na disku i prijenos informacija operacijskom sustavu, te hardveru na koji način spriječiti direktni pristup ope-

11 Vuković A., Džambas I., Blažević D.: **Engineering review:** Razvoj ERP koncepta i ERP sustava, izvorni znanstveni članak, Faculty of Engineering/Faculty of Civil Engineering University of Rijeka, 2007

12 Vuković A., Džambas I., Blažević D.: **Engineering review:** Razvoj ERP koncepta i ERP sustava, izvorni znanstveni članak, Faculty of Engineering/Faculty of Civil Engineering University of Rijeka, 2007

13 Gajšak, M: **Projektiranje informacijskih sustava ERP**, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2004.

14 Koch, C.: **ABCs of ERP**, ERP Research Center, <URL: <http://www.cio.com>> (05.11.2018.)

15 Koch, C.: **ABCs of ERP**, ERP Research Center, <URL: <http://www.cio.com>> (05.11.2018.)

racijskom sustavu i hardveru preko ERP sustava. Treća razina također doprinosi sigurnosti računalnog okruženja. Ako je ono sigurno, ERP sustavi će poboljšati financijski i operacijski integritet osjetljivih transakcija, a u suprotnom narušiti će se njihov integritet. Četvrta razina predstavlja relacijsku bazu podataka do koje se pristupa strukturiranim jezikom upita SQL („*Structured Query Language*“), a na vrhu se nalazi ERP sustav.¹⁶

Važno je spomenuti da ERP sustav uključuje mnoge kontrole; primjerice za zaštitu podataka, provjere korisničkih ograničenja, autorizacija korisnika za određene transakcije (za svaku spomenutu transakciju kreiraju se dokumenti odnosno podaci koji se ne mogu brisati, te se prikazuju vidljivi tragovi svih unesenih podataka u sustav). Prednosti ERP sustava jesu:¹⁷

- brži obrtaj proizvodne imovine - uz pomoć ERP sustava, procesi kao što je planiranje proizvodnje i nabave automatizirani su, pa se deseterostruko povećava proizvodna zaliha, a ujedno smanjuju troškovi skladištenja 10 % do 40 %,
- poboljšanje usluga kupcu - pružajući pravodobne informacije ERP sustavi omogućuju povećanje ispunjenja narudžbi od 80% do 90%, što rezultira zadovoljstvom kupaca i njihovim zadržavanjem,
- veća preciznost inventara - rezultat je manja potreba za revizijom. Fizičko prebrojavanje u nekim proizvodnim centrima obavlja se svaki mjesec pa čak i svaki tjedan, a preciznost je svega 20% , dok se uz ERP sustav može postići preciznost inventure više od 90%. S druge strane, osim što je provođenje inventure i skupo, to često traži prekidanje posla i kontrolu zaliha,
- uštede u vremenu - ERP sustav može skratiti vrijeme proizvodnje grupiranjem sličnih poslova i osiguranjem koordinacije ljudi, alata i strojeva. Planiranjem maksimalne upotrebe opreme i efikasnog održavanja strojeva smanjuje se vrijeme kvara. Sve to utječe na povećanje prihoda bez dodatnih troškova,
- bolja kvaliteta ima za posljedicu manje popravaka - ERP softver s jakom proizvodnom komponentom postiže visoku preciznost u kvaliteti povećavajući efikasnost proizvodnje, te ujedno smanjuje i eliminira popravke,
- pravovremena naplata - uz pomoć ERP sustava automatski se generira lista zakašnjelih plaćanja kupaca, obavještavaju se kupci putem opomena ili im se do podmirenja dugovanja blokira isporuka robe,

Treba spomenuti i druge, a jednako važne koristi ERP sustava kao što su: poboljšanje i standardizacija poslovnih procesa, pristup informacijama u stvarnom vremenu, povećanje fleksibilnosti, smanjenje troškova održavanja jer su razni samostalni sustavi zamijenjeni jednim ERP sustavom, povećanje produktivnosti,

povećanje zadovoljstva klijenata, optimizacija lanaca opskrbe, povećanje prodaje i profita, razvoj poslovanja, smanjenje vremena od narudžbe do isporuke, smanjenje operativnih troškova, mogućnost konkurentске pozicije, zajedničke usluge, smanjenje vremena tržišnog ciklusa te povećanje kontrole proizvoda.¹⁸

Nedostaci ERP sustava su:¹⁹

- implementacija ERP sustava je dugotrajan i skup posao,
- stvara se ovisnički odnos između tvrtke koja uvodi ERP sustav i dobavljača koji konstantno vrši pritisak da se stalno kupuju novije verzije softvera jer za stare verzije neće više biti podrške,
- javlja se velika potreba za konzultantima zbog zahtjeva za velikom prilagodbom ERP sustava,
- potreba za reorganizacijom i reinženjeringom poslovnih procesa kako bi se samo poslovanje prilagodilo sustavu,
- veliki broj modula ERP sustava, velika baza i programski kod pisan na velikom broju stranica što sve skupa otežava održavanje jer se iziskuje poznavanje velikog broja parametara.

Najčešće se događa da ako projekt implementacije ne uspije, krivica se svaljuje na softver, a u većini slučajeva je uzrok nedovoljno prethodno planiranje implementacije i nerealna očekivanja.

2.3. Strategija implementacije ERP sustava

Uspješna implementacija zahtijeva strukturalnu metodologiju koja omogućava ovladavanjem neočekivanih pojava bez nekih negativnih posljedica. Procjena poslovne strategije i plana započinje prije same nabave softvera i instalacije. Dobro razrađena metodologija povećat će vjerojatnost uspjeha implementacije, ali to još uvijek nije garancija uspjeha.²⁰

Postupak implementacije ERP sustava u jednom poslovnom sustavu predstavlja projekt strateške važnosti za poduzeće tijekom kojeg se njegovi sudionici susreću sa velikim brojem problema, sa tehničkog i organizacijskog aspekta. Tehnički aspekti implementacije ERP sustava su:²¹

- tehnološka spremnost poduzeća,
- kompleksnost izabranog ERP rješenja,
- stupanj gubitka, odnosno upotrebljivosti postojećih podataka u kontekstu kompatibilnosti ERP rješenja i postojećih („*legacy*“) sustava,
- adekvatnost novih projektiranih poslovnih procesa.

16 Gajšak, M: Projektiranje informacijskih sustava ERP, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2004.

17 Čupić, A.: Strategija uspješnog uvođenja sustava za planiranje resursa poduzeća, Magistarski rad, Ekonomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.

18 Čupić, A., : Strategija uspješnog uvođenja sustava za planiranje resursa poduzeća, Magistarski rad, Ekonomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.

19 Čupić, A., : Strategija uspješnog uvođenja sustava za planiranje resursa poduzeća, Magistarski rad, Ekonomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.

20 Gajšak, M: Projektiranje informacijskih sustava ERP, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2004.

21 Ibid.

Uobičajeni organizacijski problemi implementacije ERP sustava su:²²

- generalni otpor promjenama,
- neadekvatan trening i obuka,
- podcijenjeno vrijeme i troškovi implementacije,
- smanjena efikasnost u inicijalnoj fazi rada novo projektiranih poslovnih procesa, uslijed adaptacije poslovnog okruženja.

Osnovni faktor za upravljanje rizicima od eskalacije nekog od navedenih problema predstavlja izbor implementacijskog pristupa, opisanog dvjema dimenzijama: vremenom implementacije i fokusom, odnosno pretpostavljenim (željenim) stupnjem promjena u organizaciji. Iako je primarna odgovornost za uspjeh implementacije ERP sustava na organizaciji u kojoj se ona sprovodi, u implementacijskom timu sudjeluju i predstavnici dobavljača izabranog ERP sustava i vanjski konsultanti. Osnovne grupe aktivnosti, predviđene standardnim konceptom implementacije ERP sustava su:²³

- obuka,
- evaluacija,
- organizacija i planiranje projekta implementacije,
- implementacija i reinženjering poslovnih procesa,
- izbor ERP sustava, instalacija, integracija, konfiguracija i,
- konverzija i transfer postojećih („*legacy*“) podataka.

Sve komponente implementacije ERP sustava su raspoređene u okviru tri osnovne faze projekta. Prva se odnosi na implementaciju osnovnih ERP funkcija. U okviru druge faze, vrši se integracija osnovnih ERP funkcija u lanac snabdijevanja poduzeća. Konačno, u okviru *post mortem* aktivnosti projekta, vrši se sveukupna integracija ERP sustava u okruženje definirano granicama ukupnog poslovnog informacijskog sistema.

Obuka korisnika ERP sustava predstavlja aktivnost koja se provodi tijekom cijelog procesa implementacije. Najveća odgovornost za ovaj segment implementacije ERP sustava pripada samom poduzeću. Naime, obuka budućih korisnika ERP sustava mora se provoditi sa aspekta dosadašnjih načina za izvršenje poslovnih procesa i njihovih korekcija koje zahtijeva njegova buduća upotreba. Nakon završetka projekta implementacije ERP sustava, proračunom za njegovo održavanje je potrebno predvidjeti periodične obuke korisnika sustava u okviru kojih se vrši uvođenje novih postupaka provođenja poslovnih aktivnosti.²⁴

Evaluacija - prema standardnom konceptu ERP implementacije, prvi korak u ovom procesu predstavlja prvobitna evaluacija izvodivosti i isplativosti primjene ERP sustava. Ona treba uzeti u obzir specifičnosti organizacije, na temelju kojih se donose odluke o načinu provedbe i da predstavlja osnovu za stvaranje kratko-

ročnog akcijskog plana, kojim treba da se premosti razdoblje do formiranja detaljnog plana implementacije.²⁵

Planiranje projekta implementacije i organizacija - prema standardnom konceptu implementacije ERP sustava, planiranje ovog procesa započinje izradom vizije projekta implementacije, dokumenta koji treba predstaviti operativno okruženje za upravljanje poslovnim sustavom, nakon implementacije ERP sustava. Osnovni uvjet za uspješno odvijanje projekta je formiranje njegove organizacije, kojom rukovodi izvršni odbor, sastavljen od operativnih menadžera. Izvršni odbor projekta je odgovoran za definiranje vizije projekta, njegovo strateško planiranje, kao i rješavanje konflikata, nastalih u procesima detaljnog planiranja ili realizacije. Za donošenje operativnih odluka, odgovoran je voditelj projekta („*Project Manager*“), koji, u suradnji s članovima izvršnog odbora projekta, kreira i provodi detaljni plan implementacije, rukovodi dvjema momčadi - tehničkom i konzultantskom. Konzultantski tim je zadužen za reinženjering poslovnih procesa, dok je odgovornost tehničkog - IT implementacija i prilagodba odgovarajućeg ERP rješenja. U oba tima, ravnopravno sudjeluju zaposlenici iz organizacije u kojoj se projekt provodi, predstavnici konzultantske kuće koja je certificirana za implementaciju određenog ERP rješenja i, eventualno, predstavnici dobavljača.²⁶

Implementacija i reinženjering poslovnih procesa - implementacija ERP procesa obuhvaća skupinu aktivnosti koja se odnosi na jednoznačno definiranje procesa poslovanja koji će se realizirati uz pomoć ERP sustava. Osnovne skupine procesa su planiranje prodaje i operacija, planiranje i upravljanje potražnjom i financije i računovodstvo. Posebnu dimenziju aktivnosti implementacije ERP sustava predstavlja reinženjering poslovnih procesa. On obuhvaća aktivnosti za uređivanje poslovnih procesa u cilju ostvarivanja optimalnog toka resursa kroz poslovni sustav i predstavlja kritičan dio projekta, čiji se utjecaj prožima kroz sveukupno poslovanje poduzeća.²⁷

Izbor ERP sustava, instalacija i konfiguriranje - izbor ERP rješenja, odnosno dobavljača se vrši na temelju polaznih pretpostavki korištenja sustava koje se odnose na definirane ciljeve i očekivane razine njihovog ispunjenja i rezultate cost-benefit analize. Izbor dobavljača ERP sustava predstavlja složeni proces analize tržišta ponude koji može trajati i mjesecima. On se, uobičajeno, vrši na temelju sljedećih kriterija, poredanih po prioritetu, odnosno mogućem utjecaju na kvalitetu provođenja projekta implementacije i minimalizacije njegovih troškova:

- Podrška industrijskoj grani. ERP II trend karakterizira pojava rješenja prilagođenih određenoj industrijskoj grani. Ova prilagodbe su proistekla iz

22 Ibid.

23 Nepoznat: **Planiranje poslovnih resursa ERP**, <URL: <http://www.scribd.com/doc/74643087/Planiranje-Poslovnih-Resursa-Erp>> (23.07.2013.)

24 Ibid.

25 Nepoznat: **Planiranje poslovnih resursa ERP**, <URL: <https://www.scribd.com/document/74643087/Planiranje-Poslovnih-Resursa-Erp>> (05.11.2018.)

26 Ibid.

27 Nepoznat: **Planiranje poslovnih resursa ERP**, <URL: <http://www.scribd.com/doc/74643087/Planiranje-Poslovnih-Resursa-Erp>> (05.11.2018.)

referenci dobavljača i njihovog iskustva u implementaciji ERP sustava u određenim industrijskim okolnostima. Na primjer, PeopleSoft rješenja su specijalizirana za obrazovanje, Baan - za proizvodnju, SAP - za zdravstvenu zaštitu i prevenciju, petrokemijsku industriju, itd. Izbor specijaliziranog rješenja podrazumijeva pristup referentnoj poslovnoj praksi i značajno skraćuje vrijeme i smanjuje troškove projekta implementacije;

- Potreban stupanj prilagodbe rješenja. Funkcionalna analiza rješenja određenog dobavljača, u kontekstu izbora ERP rješenja, mora rezultira kvantitativno izraženom ocjenom obima potrebnog prilagođavanja izabranog rješenja postojećim ili željenim poslovnim procesima u ciljnoj organizaciji;
- Stupanj podrške postojećim ključnim procesima organizacije. Ukoliko se u okviru poslovnog sustava ključni procesi odvijaju na optimalan način, potrebno je izabrati dobavljača, čije rješenje ne odstupa od postojećeg stanja. U tom smislu, u okviru izbora rješenja, potrebno je izvršiti odgovarajuću gap analizu i vrednovati odluku o izboru rješenja na temelju njezinih rezultata;
- Veličina poslovnog sustava. Arhitektura određenog ERP rješenja u velikoj mjeri ovisi o veličini poslovnog sustava koja karakterizira ciljnu grupu dobavljača. Na primjer, SAP, JD Edwards i Oracle (PeopleSoft) rješenja su namijenjena velikim poduzećima, dok su SYSPRO, Navision i drugi, specijalizirani za poslovne sustave srednje veličine²⁸

2.4. Načini implementacije ERP sistema

Pri implementaciji diferentnih ERP sustava u drugačijim poslovnim okruženjima, najčešće se koriste tri načina, a to su Big Bang strategija, Franchising strategija, i Slam Dunk strategija. Big Bang strategija podrazumijeva sveukupan pristup implementaciji, dok druge dvije opisuju faznu implementaciju u horizontalnom (Franchising) ili vertikalnom (Slam Dunk) pravcu, svaki metoda ima određene prednosti i nedostatke. Primjerice, fazni pristup podrazumijeva dekompoziciju implementacijskog procesa u manje, upravljive cjeline, pri čemu njegova ciklična priroda omogućuje ranu evaluaciju, uočavanje sistemskih problema i primjenu odgovarajućih mjera za njihovo rješavanje u narednoj iteraciji. Sa druge strane, fazni pristup, suprotno od sveukupnog, obvezuje implementacijski tim voditi računa o privremenim sučeljima novog sa postojećim („*legacy*“) sustavima, koji su neophodni radi očuvanja održivosti kontinuiteta poslovnog sustava tijekom procesa implementacije. Izrada i održavanje ovih privremenih sučelja može značajno povećati troškove implementacije.²⁹

Izbor strategije implementacije određuju vrijeme i resursi odnosno ljudi i novac. Veličina i cilj će također utjecati na odluku o izboru strategije implementacije.

²⁸ Ibid.

²⁹ Gajšak, M: Projektiranje informacijskih sustava ERP, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2004

Naime, postoje brojni slučajevi koji mogu utjecati na izbor prave strategije kao što su spajanje i razdvajanje tvrtke, nove zakonske regulative, poboljšanja softverskih nedostataka tekućeg sustava, potreba za reinženjeringom poslovnih procesa, te smanjenje troškova programiranja unutar tvrtke itd.³⁰

Međutim, postoje faktori koji utječu na implementaciju bez obzira koja strategija implementacije je izabrana. Takvi su faktori geografsko područje, potrebe kupca, potrebe korisnika, vrijeme, hitnost te utjecaj na stari sustav.³¹ Strategije implementacije ERP sustava su:³²

Strategija postupne implementacije

Makar je baza podataka ERP sustava integrirana, sam ERP sustav se sastoji od modula, što kod uvođenja ERP sustava znači da se implementacija može odvijati u fazama i to po principu da se svaka faza implementacije sastoji od skupa funkcionalnih i nezavisnih modula. Strategija postupne implementacije jako je dobra za tvrtke koje po prvi put razvijaju ERP rješenja. Ako tvrtka nikad nije koristila integrirani sustav i odjednom primjenjuje implementaciju na sve procese, to može uzrokovati veliki pritisak na zaposlenike i neće se moći postići efikasan prijelaz sa starog na novi sustav. U ovim slučajevima bolje je koristiti pristup strategije postupne implementacije, koja se bazira na poslovnim informacijama i standardizaciji procesa.

Faza u implementaciji može biti više. Tako se može odrediti da se u prvoj fazi implementiraju modul Financija i modul Kontrolinga (FI i CO), u drugoj fazi modul Upravljanja materijalima (MM) i modul Prodaje (SD), te u trećoj fazi modul Planiranja proizvodnje. Prije same prilagodbe mora se uspostaviti cjelokupni koncept za sve relevantne poslovne procese kako bi se izbjegao konflikt i ograničenje u kasnijim implementacijama.³³

Strategija frontalne implementacije

Kasnih devedesetih godina zavladała je strategija frontalne implementacije ili *Big Bang* strategija. Tvrtke su odjednom ukinule svoj stari sustav i uvele odjednom novi ERP sustav u cijelu tvrtku. Međutim, malo je tvrtki koje su se usudile provoditi takvu strategiju jer je to značilo mobilizirati cijelu tvrtku i provesti sve promjene odjednom. Nitko iz tvrtke nije imao takvo iskustvo i nitko nije bio siguran hoće li sustav stvarno raditi i hoće li odgovarati potrebama tvrtke. Međutim, ERP neminovno uključuje kompromise, jer većina odjela imaju svoje računalne sustave koji su podešeni njihovom načinu rada i u većini slučajeva ERP ne nudi niz funkcionalnosti ni lakoću upotrebe koje je nudio stari sustav.

³⁰ Čupić, A., : Strategija uspješnog uvođenja sustava za planiranje resursa poduzeća, Magistarski rad, Ekonomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.

³¹ Čupić, A., : Strategija uspješnog uvođenja sustava za planiranje resursa poduzeća, Magistarski rad, Ekonomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2005.

³² Ibidem.

³³ Siemens prezentacija: Uvođenje SAP sustava u Vetropack Stražu, 2001.

Strategija koncesija

Strategiju koncesije ili *Franchise Strategy* prihvaćaju velike tvrtke ili tvrtke s raznolikom djelatnošću svojih poslovnih jedinica. Instaliraju nezavisne podsustave u svakoj poslovnoj jedinici uz integraciju samo zajedničkih procesa kao npr. financijsko knjigovodstvo na nivou cijele tvrtke. Svaka poslovna jedinica ima svoje vlastite ERP podsustave sa odvojenom bazom podataka. Podsustavi su povezani kako bi razmjenjivali informacije neophodne za tvrtku kako bi se dobila cjelokupna slika svih poslovnih jedinica ili procesa. Ova implementacija obično započinje s demonstracijom ili pilot instalacijom i to u poslovnim jedinicama u kojima neće biti poremećen poslovni rezultat tvrtke ako nešto pođe krivo. Kad jednom projektni tim uspostavi sustav i sve radi bez greške, onda taj tim počinje prodavati uslugu implementacije ERP sustava drugim poslovnim jedinicama koristeći dobre reference prve implementacije iz vlastite kuće.

Strategija uvođenja samo ključnih procesa

Strategija uvođenja samo ključnih procesa ili *Slum dunk* pogodna je za manje tvrtke koje nisu u mogućnosti uvesti cjelovito ERP rješenje i gdje je fokus na nekoliko ključnih procesa, a u budućnosti se planira prijeći na ERP sustav. Ovdje je cilj brzo uvesti i započeti rad s ERP sustavom ne opterećujući se idejom reinženjeringa. Međutim, mali je broj onih koji su proveli ovu strategiju i uz to imali očekivani povrat od novog sustava. U ovom slučaju ERP sustav je malo bolji od starog sustava i još k tome ne zahtijeva veće promjene kod zaposlenika da mijenjaju stare navike ponašanja.

2.5. Troškovi implementacije ERP sustava

Implementacija ERP sustava predstavlja projekt relativno dugog trajanja s uobičajeno velikim proračunom u dinamici koja je u skladu s odabranom strategijom. Jedan od osnovnih faktora uspjeha ERP implementacije predstavlja detaljno planiranje proračuna projekta u okviru kojeg se ona provodi. Osnovni razlog za to je činjenica da ovakav projekt karakterizira veliki obim tzv. nevidljivih troškova, odnosno utrošenih resursa, koje je teško predvidjeti, odnosno čije kvantificiranje nije jednostavno izvesti. Struktura troškova implementacije ERP sustava se sastoji od sljedećih osnovnih elemenata:³⁴

- **Licenca ERP software-a.** Pravo korištenja ERP software-a od strane jednog poslovnog sustava, kao i nivoi prava na izmjenu njegovog koda se definira licencnim ugovorom. Troškovi licence ERP software-a su fiksni, ali ovise od izbora njegovih komponenti.
- **Održavanje ERP sustava.** Prilikom sklapanja licencnog ugovora i ugovora o implementaciji ERP sustava s određenim dobavljačem, obavezno je predvidjeti i klauzule o održavanju sustava koje se vrši

od strane dobavljača i koje se ugovaraju periodično. One sadrže točno definirane odgovornosti dobavljača, dok se proračun za održavanje uobičajeno definira kao određeni postotak cijene licence (20-60%).

- **Consulting.** Implementacija ERP sustava obavezno podrazumijeva angažiranje eksternih stručnjaka za objektivnu evaluaciju poslovnog sustava i savjetovanje u procesu njegove eventualne revizije i implementacije ERP sustava.
- **Prilagodba.** U uvjetima u kojima zadani poslovni procesi izabranog ERP sustava ne odgovaraju poslovnom sustavu u kojem se on instalira, potrebno je izvršiti njihovo prilagođavanje. Troškovi prilagodbe ovise od razine generičnosti arhitekture izabranog ERP sustava.
- **Revizija infrastrukture.** ERP sustav prožima sve sektore poduzeća i koristi se u distribuiranom IT okruženju. Ukoliko postojeća IT infrastruktura ne odgovara zahtjevima dostupnosti, sigurnosti i brzine izabranog ERP sustava, potrebno je uraditi njenu reviziju.
- **Interni troškovi.** Najveću odgovornost za uspjeh projekta implementacije ERP sustava ima organizacija u kojoj se on provodi. S obzirom na to, najveći dio implementacijskog tima čine predstavnici poslovnog sustava, čije angažiranje je izuzetno skupo – operativni menadžment i IT sektor.
- **Troškovi prilagođavanja poslovnog sustava.** U okviru faze puštanja u rad jednog ERP sustava, poduzeće treba predvidjeti izvjesne troškove prilagodbe, nastale uslijed mogućih negativnih utjecaja izvršene transformacije na poslovne rezultate. Legitimni troškovi implementacije ERP sustava su opadanje profita, zadovoljstva klijenata, povećanje ukupnih vremena proizvodnje i isporuke, pojava škarta, itd. Iako oni nisu izravno vezani za implementaciju ERP sustava, izravno su uzrokovani njome. Shodno tome, implementacijski tim mora predvidjeti određena sredstva osiguranja u proračunu projekta.

2.6. Extended ERP³⁵

Porast brzine Internet veze i težnja za povezivanjem dislociranih odjela velikih kompanija u jedan poslovni sustav ponukalo je proizvođače ERP sustava da sve više svoje poslovne sustave orijentiraju na Internet. Tako su nastali Extended ERP poslovni sustavi. Poslovni sustav kojem može pristupiti korisnik u svako doba dana i svugdje (bitna je samo veza na Internet) omogućava spajanje s novim vanjskim modulima kao što su napredno poslovno planiranje („*APS - Advanced Planning and Scheduling*“), automatizirana prodaja („*SFA - Sales Force Automation*“), poslovna inteligencija („*BI - Business Intelligence*“), „*e-business*“ rješenja kao što je upravljanje odnosima s kupcima („*CRM - Customer Relationship Management*“) i upravljanje logističkim lancem („*SCM - Supply Chain Management*“).

34 Nepoznat: **Planiranje poslovnih resursa ERP**, <URL: <http://www.scribd.com/doc/74643087/Planiranje-Poslovnih-Resursa-Erp>> (05.11.2018.)

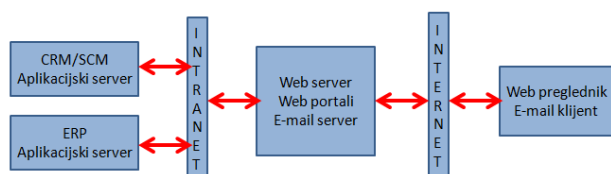
35 Gajšak, M: Projektiranje informacijskih sustava ERP, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2004.

U biti, ERP poslovni sustav je tako postao pomoćno sredstvo poslovnim organizacijama za obavljanje on-line poslovnih transakcija preko Interneta. Tako se automatski povećava zadovoljstvo kupaca, povećavaju se mogućnosti prodaje i marketinga, šire se distribucijski kanali i omogućava se brže, jednostavnije i raznoliko plaćanje roba i usluga. SCM i CRM omogućavaju bolje, jednostavnije i brže odnose između organizacije, nabave i prodaje.

„Supply Chain Management“ (SCM) se sastoji od pomoćnih modula za narudžbu materijala, transformaciju materijala u proizvodnju i distribuciju proizvoda kupcima te nudi prema zahtjevu kupca određen proizvod na određeno mjesto u određeno vrijeme po najnižoj mogućoj cijeni kako bi se najbolje mogle zadovoljiti potrebe kupca.

„Customer Relationship Management“ (CRM) omogućava organizacijama da saznaju što je više moguće o kupcu kako bi znale što u danom trenutku kupac treba, po kojoj cijeni i u koje vrijeme. Tako se mogu uspješnije brže i bolje planirati i provesti investicijske odluke organizacije kako bi se mogle što bolje zadovoljiti potrebe kupca. CRM se sastoji od podmodula marketing, prodaja, podrška kupcu itd.

„E-commerce“ je spoj poslovnih transakcija koje se odvijaju između organizacija s podrškom umreženim informacijama i komunikacijskim tehnologijama korištenjem Internet aplikacija kao što su Web i e-mail koje sigurno djeluju i pridonose pronalasku novih kupaca i što boljoj ponudi postojećim (slika 3). „E-commerce“ se u današnje vrijeme sve više uvodi i koristi kako kod velikih tako i kod malih proizvođača ERP sustava. Web poslovne aplikacije su integrirane s klasičnim ERP aplikacijama omogućujući brze i automatske poslovne transakcije kao što su prihvati narudžbi kupaca, kupnja, automatski izračun zalihe sirovine, prava zaposlenika itd., te se time stvara čvrsta povezanost između kupaca, dobavljača, proizvodnje i drugih grana poslovnog sustava na vjerodostojan i pouzdan način.



Slika 3. Web orijentiran extended ERP sustav

Izvor: autor prema Gajšak, M: Projektiranje informacijskih sustava ERP, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb 2004.

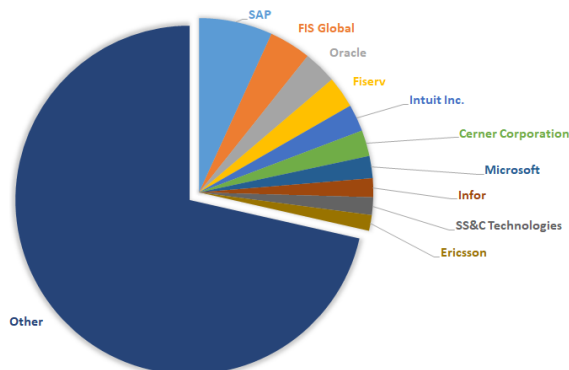
2.7. Stanje ERP sustava na tržištu

U 2016. godini 10 najvećih prodavača ERP softvera imalo je ukupno 28,5% tržišta što je otprilike 82,2 milijardi dolara u licencama sa godišnjim rastom od 1,4%. SAP je bio vodeći sa udjelom od 7%, a slijede ga FIS Global, Oracle, Fiserv i Intuit. Isti poredak je bio i 2015. godine.

SAP je zadržao vodeću poziciju na hrvatskom ERP tržištu u 2017. godini. Microsoft je drugi, a slijede do-

maće tvrtke IN2, PIS i Omega Software. Ukupan prihod od licenci i održavanja pet vodećih proizvođača predstavlja više od pola kompletnog domaćeg tržišta ERP aplikacija u prošloj godini.

EXHIBIT 1: 2016 ERP APPLICATIONS MARKET SHARES SPLIT BY TOP 10 ERP VENDORS AND OTHERS, %



Slika 4. Udio pojedinih ERP proizvođača na tržištu

Izvor: Forbes, Top 10 ERP Software Vendors and Market Forecast 2016-2021, <URL: <https://www.appsruntheworld.com/top-10-erp-software-vendors-and-market-forecast/>>

2.8. Utjecaj ERP sustav na TQM

ERP sustavi imaju pozitivan utjecaj na TQM (eng. Total quality management) u organizacijama jer u oba koncepta na prvom mjestu je usredotočenost na kupca. Prednosti koje proizlaze iz uspješne implementacije ERP-a po pitanju kupca su poboljšana sposobnost organizacije da sustavno prati povratne informacije, omogućuje brži odgovor na zahtjeve kupaca i povećana je kvaliteta usluga koje organizacije nude. Uz usredotočenost na kupca, ERP sustavi povezuju i stvaraju zavisnosti odjela što potiče da svi odjeli unutar organizacije bolje razumiju potrebe i zahtjeve ostalih odjela te ovim načinom utječe pozitivno na timski rad što je jedan od glavnih načela TQM. Razmjena podataka i zapisa odvija se kroz središnju bazu podataka, a uglavnom se to događa bez mogućnosti dodatne intervencije na zapise pa se samim time točnost podataka i njihova pouzdanost povećava. Organizacije koje su implementirane ERP sustav koji odgovara njihovim zahtjevima, kroz održavanje i ugradnju novih izdanja ERP softwera osigurano je da sustav kontinuirano potiče razvoj organizacije te se time osigurava kontinuirano poboljšavanje što je u skladu sa još jednim od osnovnih načela TQM. ERP sustav omogućava stvaranje i održavanje baze ažurnih i pouzdanih informacija o dobavljačima, te se te informacije koriste i u TQM pri ocjeni dobavljača. Za postizanje potpunog TQM u organizaciji od presudne je važnosti da organizacija može prikupiti, analizirati i procijeniti podatke proizvodnje, kriterije kontrole kvalitete, evidencije pritužbi kupaca na proizvode i usluga koje organizacija nudi te podatke o narudžbi. U današnjem ubrzanom proizvodnom okruženju to je gotovo nemoguće točno i pouzdano postići bez korištenja naprednog ERP sustava. Danas za organizacije koje prihvaćaju TQM kao ključni pristup poslovanju

koji prelazi jednostavno certificiranje, ulaganja u ERP softveru je nužna potreba. U cilju postizanja što većeg pozitivnog doprinosa TQM i ostvarivanju kontinuiranog poboljšanja odabrani ERP software mora biti fleksibilan i imati infrastrukturu koja odgovara zahtjevima organizacije te omogućuje brzu i laku primjenu i implementaciju novih poboljšanja u poslovnim procesima.

3. ZAKLJUČAK

Na temelju svega navedenog možemo zaključiti da poslovno informacijski sustav više nisu iznimka nego pravila u poduzećima koja žele biti konkurentna i učinkovita na globalnom tržištu. Nabava i implementacija ERP sustava je vrlo zahtjevan posao, ali ako se pravilno provede, poduzeću sigurno donosi učinkovitije, kvalitetnije i jeftinije poslovanje, veće povjerenje poslovnih partnera i bolju tržišnu poziciju. Dobro implementirani ERP postaje najbitnija infrastruktura poduzeća i neodvojivi dio njegove kulture poslovanja.

Razvoj informacijskih i komunikacijskih tehnologija, koji je potaknut razvojem mikroelektroničkih komponenti, računalnog hardvera i softverskih paketa, utjecao je na razvoj svih oblika računalnih aplikacija u poslovnim sustavima. Istodobno, poslovno okruženje postaje vrlo kompleksno, zbog rastućeg fenomena globalizacije, s funkcionalnim jedinicama koje zahtijevaju više podataka unutar funkcija i protoka podataka za odlučivanje, pravodobnu i efikasnu nabavu dijelova proizvoda, upravljanje zalihama, računovodstvo, upravljanje ljudskim resursima i distribuciju dobara i usluga. U tom kontekstu, menadžment u organizaciji treba efikasan informacijski sustav da bi povećao konkurentnost smanjivanjem troškova i boljom logistikom.

LITERATURA

- [1] Bosilj Vukšić, V., Kovačić, A. (2004), *Upravljanje poslovnim procesima*, Sinergija, Zagreb
- [2] Varga, M. et. al. (2007), *Informatika u poslovanju*, Element, Zagreb
- [3] Sheikh, K. (2003), *Manufacturing Resource Planning (MRP II): With Introduction to ERP, SCM and CRM*, McGraw Hill Profesional, New York
- [4] Toomey, J.W. (1996), *MRP II: Planning for Manufacturing Excellence*, Springer, New York.
- [5] Wight, O.W. (1993), *The Executive's Guide to Successful MRP II*, John Wiley and Sons, New York
- [6] Wallace, T.F., Krezmar, M.H. (2001), *ERP: Making It Happen*, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [7] Eskillson, H., Nystron, C., Windler, M. (2003), *ERP Systems Effects – A Comparison of Theory and Practice*, School of Economics and Commercial Law, Goteborg University
- [8] Rosemann, K.H., Gable, G.G. (2000), *What is ERP?*, Information System Frontiers, Vol. 2, No. 2, pp. 141-162.
- [9] Ptak, C.A., Schragenheim, E. (2003), *ERP: Tools, Tehniques, and Applications for Integrating the Supply*, CRC press, New York
- [10] Fertalj, K. et al. (2002), *Komparativna analiza programske potpore informacijskim sustavima u Hrvatskoj, verzija 1.1.*, Zagreb
- [11] Brumec, J. i Vrček, N. (2011), *Stanje i razvoj ERP sustava*, Sažetak predavanja, Fakultet organizacije i informatike, Zagreb
- [12] Vuković A., Džambas I., Blažević D. (2007), *Engineering review: Razvoj ERP koncepata i ERP sustava*, Faculty of Engineering/Faculty of Civil Engineering University of Rijeka, 2007.
- [13] Gajšak, M. (2004), *Projektiranje informacijskih sustava ERP*, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb
- [14] Sinković, G. (2011), *Poslovno informacijski sustavi (PIS) – Spec 02*, bilješke sa predavanja, Politehnika Pula, Pula
- [15] Elisabeth J. Umble, Ronald R. Haft, M. Michael Umble (2003), *Enterprise resource planning: Implementation procedures and critical success factors*, European journal of operational research, Elsevier (<http://www.student oulu.fi/~jolahti/accinfo/9%20ERP%20Implementation%20procedures.pdf>)
- [16] *Planiranje poslovnih resursa ERP*, (<http://www.scribd.com/doc/74643087/Planiranje-Poslovnih-Resursa-Erp>)
- [17] *Search manufacturing ERP*, (<http://searchmanufacturingerp.techtarget.com/>)
- [18] Raveendran, N.: *Enterprise Resource Planning*, (www.accel.com)
- [19] Koch, C.: *ABCs of ERP*, ERP Research Center, <URL: <http://www.cio.com>>
- [20] *Business.hr, Hrvatsko tržište poslovnih aplikacija u 2012.*, (<http://www.business.hr/ekonomija/hrvatsko-trziste-poslovnih-aplikacija-u-2012iskazalo-blagi-rast>)

RAZUMIJEVANJE KONTEKSTA LOGISTIČKO-DISTRIBUTIVNIH CENTARA

Understanding The Context Of Logistics And Distribution Centers

doc.dr.sc. Saša Petar
Dino Valeš, mag. ing. traff.

Sažetak

LDC sustavi su elementi makrologističkih sustava koji osim tehnologije, infrastrukture i suprastrukture uključuju i stručni kadar odgovoran za organizaciju i provođenje svih faza funkcija logističko-distributivnog centra. Logističko-distributivni centri se razlikuju po makro i mikro lokaciji, organizaciji, tehnologiji, razvijenosti i sl., ali svi imaju zajedničku funkciju – pružanje kompleksne logističke usluge. Osim standardnih skladišnih funkcija, poput nabave, skladištenja, upravljanje zalihama, manipulacijama, prijevozom i isporukom, suvremeni LDC-i pružaju i dodatne usluge koje povećavaju vrijednost robe i pružaju kompletnu logističku uslugu.

Cljučne riječi: Logistika, logističko-distributivni centri, distribucija

Abstract

Logistics and distribution centers are elements of macro-logistic systems that, in addition to technology, infrastructure and supra-structure, include the professional staff responsible for organizing and executing all phases of logistics and distribution center functions. Logistics and distribution centers differ in macro and micro location, organization, technology, development, etc., but all have a common function – providing a complex logistics service. In addition to standard warehousing functions, such as purchasing, warehousing, inventory management, handling, transportation and delivery, modern LDCs also provide additional services that add value to goods and provide complete logistics services.

Keywords: Logistics, logistics and distribution centers, distribution

1. UVOD

Logističko-distributivni centar (LDC) je sustav koji predstavlja značajan infrastrukturni element te organizacijsku i fizičku vezu od proizvodnje prema potrošnji. U samom središtu sustava je opskrbeni lanac, odnosno optimalna organizacija nesmetanog protoka robe od sirovine, preko proizvodnje, distribucije pa sve do krajnjeg potrošača, sa što manje zastoja te sa svim potrebnim informacijama.

LDC sustavi su elementi makrologističkih sustava koji osim tehnologije, infrastrukture i suprastrukture uključuju i stručni kadar odgovoran za organizaciju i provođenje svih faza funkcija logističko distributivnog centra.

Glavna odlika LDC-a je u tome što takvi centri zapravo predstavljaju privremena stajališta za robu kojoj se, uz skladištenje, određenim manipulacijama, kao što su: sortiranje, konsolidacija, dekonsolidacija, uzorkovanje robe, carinski postupci te drugim dodatnim uslugama, povećava vrijednost.

Skladišta u distribucijskom sustavu imaju različite uloge te se prema tome i formiraju cross docking sustavi, centri za sortiranje, LDC-i, konsolidacijski centri, skladišta gotovih proizvoda i poluproizvoda, skladišta sirovina te druge vrste skladišta.

Sam kontekst LDC-a je u racionalizaciji, optimizaciji i ubrzanju protoka robe. LDC-i se grade za potrebe trgovačkih i industrijskih poduzeća, uslužnih djelatnosti, pružatelja logističkih usluga i ostalih kompanija.

U LDC-ima se obavlja prihvata i otprema robe koja uključuje prekrcaj, skladištenje i čuvanje robe, formiranje pretovarnih jedinica, izradu prateće dokumentacije te niz dodatnih usluga vezanih uz transportna sredstva i robu.

2. DEFINICIJA LOGISTIČKO-DISTRIBUTIVNIH CENTARA

Logističko-distributivni centri predstavljaju jedan od najvažnijih dijelova logističke mreže. Realizacija robnih tokova je nezamisliva bez logističko-distributivnog centra, bilo da se radi o prostoru na urbanom području, nacionalnom ili globalnom. LDC se može definirati kao dio prometne infrastrukture, odnosno žarište protoka materijala u logističkom lancu [1].

U prijevodu, LDC je mjesto okupljanja i koncentracije robe u kojemu se vrše početne, završne i pretovarne operacije, tj. LDC je karika u procesu distribucije robe gdje dolazi do transformacije robnih i transportnih tokova.

Logističko-distributivni centri se razlikuju po makro i mikro lokaciji, organizaciji, tehnologiji, razvijenosti i sl., ali svi imaju zajedničku funkciju – pružanje kompleksne logističke usluge.

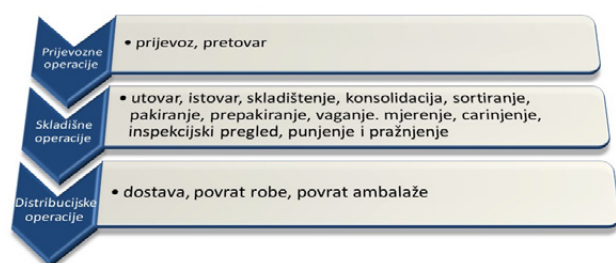
LDC u suvremenom dobu je tehnološki opremljen objekt u kojemu se roba ne samo čuva, već dorađuje i priprema za daljnju distribuciju do krajnjeg potrošača, a razvio se iz tradicionalne funkcije skladišta povećavajući broj funkcija uz primjenu nove tehnike i tehnologije te omogućujući visoku koncentraciju i brz protok robe na sve efikasniji i efektivniji način. Upravo je nova tehnika i tehnologija omogućila neprestanu optimizaciju procesa u logistici.

LDC-i se formiraju sa ciljem pružanja kompletne logističke usluge. Iako LDC-i nisu standardizirani, svi imaju neke zajedničke osobine kao što su prihvati i otprema robe, pretovar, skladištenje, izrada prateće dokumentacije i drugo. Neka od ključnih obilježja za njihovo uspješno funkcioniranje su multimodalnost, multifunkcionalnost, otvoren pristup lokaciji, manipulacije teretom, elektronska razmjena informacija, povezanost različitih sektora u cilju realizacije logističkih aktivnosti te ušteda troškova. LDC-i mogu biti mali (od 1 ha) i veliki (preko 200 ha).

Vrlo važna djelatnost LDC-a je skladištenje robe, a to podrazumijeva [2]:

- 1) uskladištenje robe i tovarnih jedinica,
- 2) pretovar robe u granicama na području skladišta,
- 3) pakiranje i raspakiranje robe,
- 4) obrada robe,
- 5) prerada robe,
- 6) komisioniranje,
- 7) skladištenje specijalnih roba (teški predmeti, žive životinje, smrznuta roba itd.).

Tablica 1. Operacije LDC-a
Izvor: Rad autora



Osim standardnih skladišnih funkcija, suvremeni LDC-i pružaju i dodatne usluge koje povećavaju vrijednost robe i pružaju kompletnu logističku uslugu [3].

3. CJELINE U LOGISTIČKO-DISTRIBUTIVNOM CENTRU

U LDC-ima prevladava koncept zaokružene cjeline koji se sastoji od [4]:

- 1) **Multimodalnosti** – postoji više razina integriranosti koje se određuju povezivanjem s različitim vidovima prometa, što je veći broj vidova prometa, odnosno povezanosti LDC-a to je veća razina integriranosti, odnosno oni LDC-i koji raspolažu sa više različitih vidova prometa klasificiraju se u više kategorije.
- 2) **Dostupnosti / otvorenosti** – označava pristup javnim institucijama i partnerima radi ugovaranja poslovnih suradnje.
- 3) **Multifunkcionalnosti** – LDC ima funkciju skladištenja i prijevoza, uključujući i distribucijske funkcije. Na taj način se osigurava funkcionalan i kvalitetan logistički tok.
- 4) **Međusektorska suradnja i integriranje poslovnih sektora s ciljem realizacije transportnih i logističkih aktivnosti.**
- 5) **Elektronička razmjena podataka** – electronic data interchange (EDI) očituje se kroz pristupačan i tehnološki moderan pristup upravljanju i nadziranju prijevoznih, skladišnih i distribucijskih procesa kroz kontrolne sustave uz koje se omogućuje i razmjena ključnih informacija elektroničkim putem unutar logističkog lanca.
- 6) **Manipulacija teretom** – širok spektar tehničko – tehnološke opreme namijenjene za manipuliranje teretom.
- 7) **Ušteda troškova** – nema dupliranja sustava.
- 8) **Dodatne usluge** – skup infrastrukturnih i tehničkih – tehnoloških elemenata koji su u funkciji sekundarne djelatnosti logističko – distribucijskog centra, tu uključujemo stanice za opskrbu gorivom, servisne stanice za kontejnere, sustavi za prijenos i pakiranje, carinski postupci, uzorkovanje robe i dr.

4. STRUKTURA SADRŽAJA LOGISTIČKO-DISTRIBUTIVNIH CENTARA

Logističko-distributivni centri grade se na način da LDC kao prometno čvorište u određenom geografskom području predstavlja infrastrukturni element oko kojeg su koncentrirani kontinuirani robni tokovi. Kad se transportna sredstva i robni tokovi iskoriste na optimalan način dolazi do racionalizacije logističkih tokova te se samim time optimiziraju fiksni troškovi. LDC-i su dijelovi logističke infrastrukture opskrbnog lanca u fazi distribucije. Roba se u takvim centrima čuva, dorađuje te priprema za daljnju distribuciju do kupca.

Struktura organizacije sadržaja LDC-a manifestira se na način da LDC kao veza između proizvodnje i pro-

daje osigurava tokove makrodistribucije, mikrodistribucije, tokove izvoza gotovih proizvoda i tokove prihvata i distribucije robe drugih proizvođača.

U LDC-ima se obavljaju sljedeće transformacije robnih tokova [5]:

- 1) Prihvat i otprema robe;
- 2) Konsolidacija / de-konsolidacija pošiljaka;
- 3) Cross docking;
- 4) Prekrcaj robe i transportnih sredstava;
- 5) Skladištenje i čuvanje robe;
- 6) Dorada, pakiranje, etiketiranje...;
- 7) Izrada prateće dokumentacije;
- 8) Formiranje tovarnih jedinica;
- 9) Lokalna dostava;
- 10) Povrat robe;
- 11) Ostale (sporedne) logističke funkcije;
- 12) Niz pratećih usluga vezanih uz transportna sredstva, robu i osoblje.

Skladišno poslovanje je veoma bitno u procesima logističkog toka te se stoga pridaje velika uloga organizaciji sadržaja LDC-a kao i ulozi koju ima prilikom transporta i manipulacije robe.

5. VRSTE LOGISTIČKO-DISTRIBUTIVNIH CENTARA

Logističko-distributivni centar je pojam koji se odnosi na sve terminale kojima je zadaća skup logističkih aktivnosti. U terminalima se odvijaju transformacije robnih tokova i kompleksne logističke aktivnosti. U prijevodu, terminal je postaja na kraju transportnog lanca u kojoj se odvijaju prihvat i manipulacije robe ili putnika, a opremljen je specijaliziranim uređajima. Logističko-distributivni centri prema svojoj funkciji mogu biti:

- 1) Tranzitni,
- 2) Sabirni,
- 3) Distributivni,
- 4) Sabirno-distributivni.

Tranzitni terminal je primjer intermodalnog terminala u kojem se odvijaju prekrcaji robe između dvije ili više prometnih grana (Huckepack itd.)¹. U tranzitnim terminalima transportna jedinica može koristiti različita transportna sredstva.



Slika 1. Tranzitni logistički centar
Izvor: Rad autora

Sabirni terminal ima više točaka dobave robe i jednu točku otpreme robe. Namjena im je prvenstveno okrupnjavanje i obrada materijala.



Slika 2. Sabirni logistički centar
Izvor: Rad autora

Distributivni terminal ima jednu točku dobave robe i više točaka otpreme robe. Primjer distributivnog centra su trgovci na veliko i malo.



Slika 3. Distributivni logistički centar
Izvor: Rad autora

Sabirno-distributivni terminal ima više točaka dobave robe i više točaka otpreme robe. Struktura sabirno-distributivnih centara je poprilično složena, a kao primjer može se navesti Hrvatska pošta d.d.



Slika 4. Sabirno-distributivni logistički centar
Izvor: Rad autora

6. PODJELA LOGISTIČKO-DISTRIBUTIVNIH CENTARA PO KATEGORIJAMA

Za transformaciju robnih tokova postoji čitava lepeza različitih naziva. Za mjesto transformacije koriste se nazivi poput terminala, centra, zone, čvora, luke, zone itd. Kod opisa određene funkcije koristi se riječ logistički, distributivni, teretni, robni itd. Međutim, najčešći pojam koji se koristi za sve terminale, tj. centre je - logistički centar. U nastavku su objašnjeni najučestaliji pojmovi.

Hub terminal je naziv za glavni terminal. To je mjesto gdje je najveća koncentracija tokova i najšira ponuda usluga logistike. Preko hub terminala se odvija transport između manjih terminala u okolici.

Gateway terminal je poseban oblik „hub and spoke“ terminala. Takvi terminali povezuju različite sustave. Odnose se na hubove preko kojih se vrši ulazak robnih tokova. Gateway terminal može predstavljati vezu između različitih grana transporta.

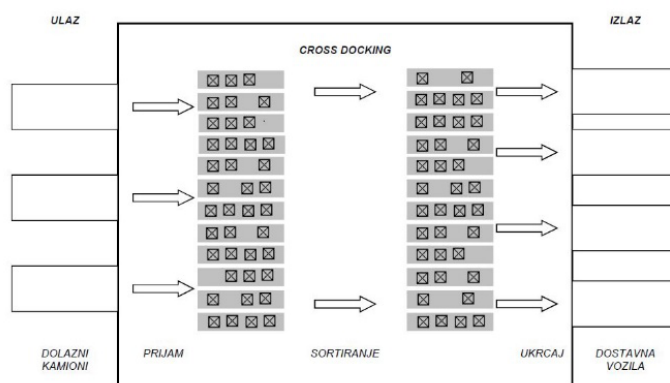
¹ Huckepack je specijalizirana tehnologija transporta za koju je karakterističan horizontalni i/ili vertikalni utovar te prijevoz cestovnih vozila i zamjenjivih sanduka zajedno s njihovim teretom na željezničkim vagonima [6]

Intermodalni terminal je terminal na kojemu se vrši prekrcaj intermodalnih jedinica² transporta sa jedne vrste transporta na drugu. Mogu biti unimodalni, bimodalni i trimodalni, a sve ovisi o broju vrsta transporta. U slučaju većeg broja vrsta transporta koristi se naziv – multimodalni terminali. Primjer trimodalnog terminala je kontejnerski terminal koji je smješten u luci te ima mogućnost prekrcaja na željeznički vagon.

Terminali određenih tehnologija intermodalnog transporta su terminali na kojima se odvijaju različite vrste transporta. Karakteristični su za luke, RTC-e i sl. Ovisno o intermodalnoj jedinici transporta dobivaju se specijalizirani terminali, npr. Ro-Ro terminal, Huckepack itd., a kao dominantna logistička aktivnost javlja se prekrcaj.

Robni terminal je namijenjen pojedinim vrstama robe poput robe namijenjene širokoj potrošnji, lako pokvarljive robe, prehrambene proizvode, rasute terete, tekuće terete itd. Robni terminali se nalaze u svim dijelovima logističkog lanca. Robni terminali se uglavnom mogu naći u industrijskim kompleksima, RTC-ima, u sklopu luka i sl.

Cross docking terminal je robno pretovarni terminal u kojemu nema dugotrajnog zadržavanja i čuvanja robe. Njegova uloga je ubrzati protok robe i eliminirati zalihe. Umjesto većeg broja pojedinačnih dostava, proizvedena se roba dovozi u cross docking terminal, te se preusmjerava prema različitim destinacijama. Za razliku od skladištenja, cross docking omogućava da robni tokovi ostanu neprekinuti [7].



Slika 5. Cross docking terminal
Izvor: [7]

Kamionski terminal je mjesto zaustavljanja i zadržavanja kamiona i vozača sa svim pratećim objektima.

Dry port, tj. „suha luka“ se odnosi na logističke aktivnosti u sklopu zaleđa pomorskih luka te je u vezi s većim brojem luka putem cestovne ili željezničke vrste transporta. Glavni zadatak dry port sustava je prikupljanje robe namijenjene za prekomorski transport na dužim relacijama te distribucija robe na lokalnoj, regionalnoj ili međunarodnoj razini.

Logistički park je područje na kojemu se nalaze razni pružatelji usluga logistike. U sklopu logističkog parka može se naći veliki broj distribucijskih centara te raznih vrsta terminala, skladišta, trgovačkih centara i dr.

Feeder terminal je sabirno-distributivni terminal kojemu je funkcija opskrbljivanje manjih terminala u okolici.

City logistički terminal se gradi na prostoru dobre prometne povezanosti, a u blizini je ili u sklopu grada. Takvi terminali povećavaju ulazno-izlazni protok robe.

7. ČIMBENICI PROMJENE KONTEKSTA

Pod kontinuiranim pritiskom procesa globalizacije logističko-distributivni centri postali su specijalizirane institucije u funkciji organizacije nesmetanog protoka dobara. Njihova misija poslovanja orijentirana je na javno davanje logističko-distribucijskih usluga u svrhu efikasne i efektivne opskrbe, kao i maksimalnog zadovoljenja potražnje kupaca [3].

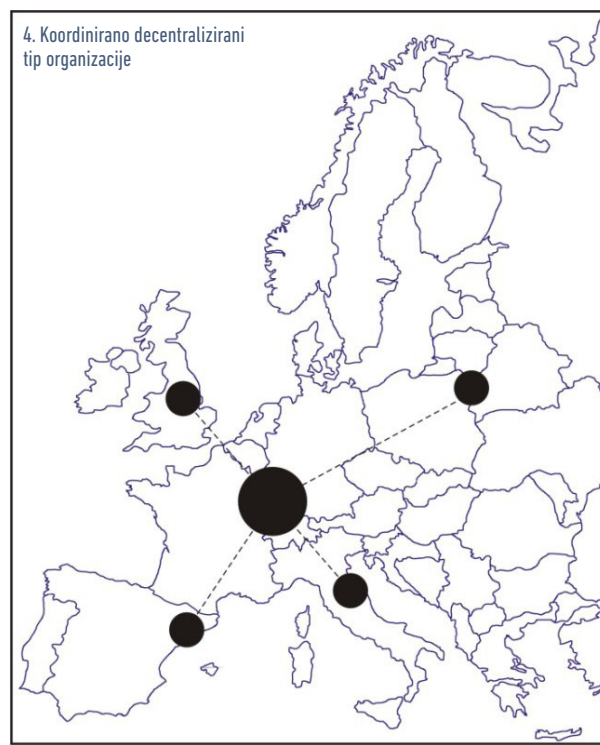
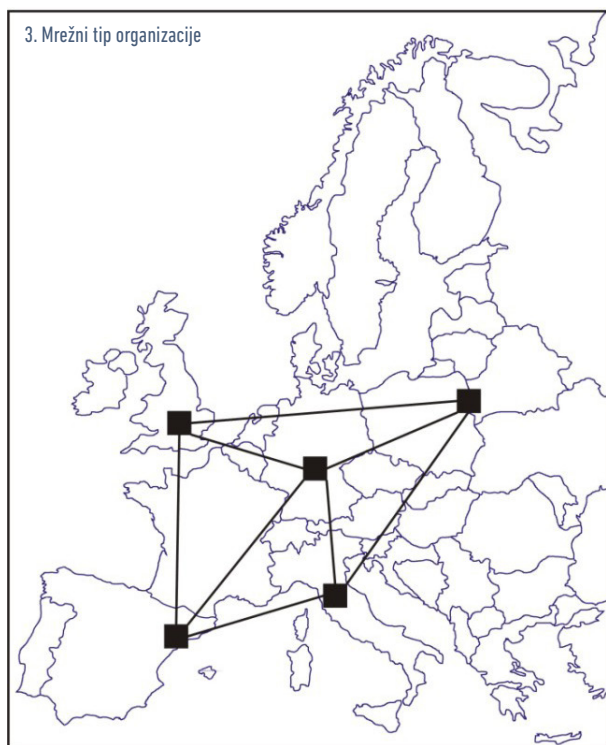
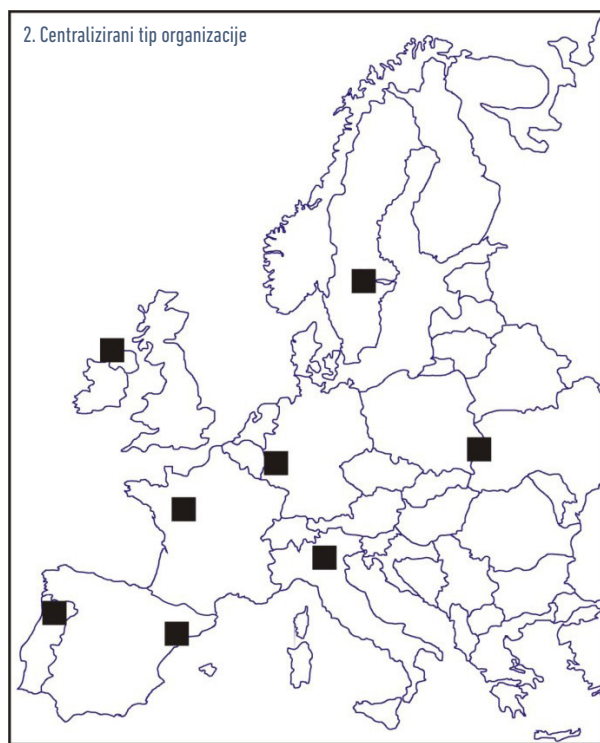
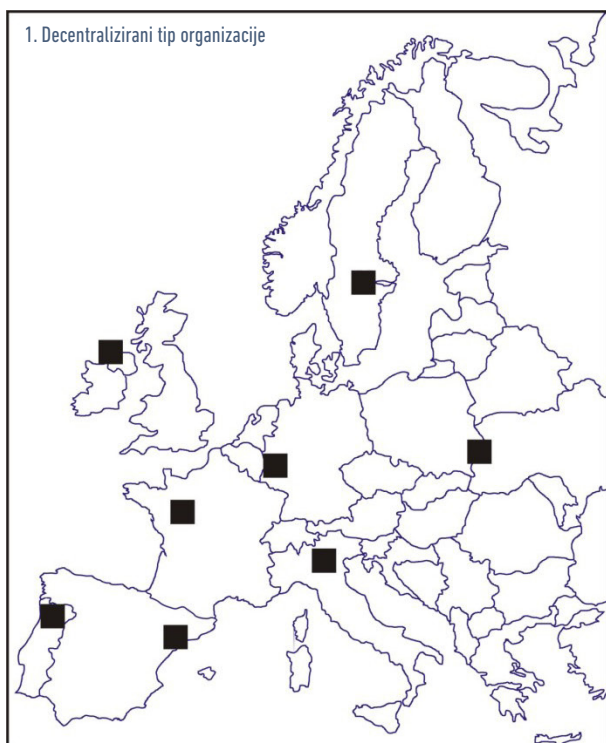
Usluge koje pruža LDC dijele se na prijevozne usluge u koje spada prijevoz i utovar, skladišne usluge koje se sastoje od utovara, istovara, skladištenja, konsolidacije, sortiranja i dr., te distribucijskih usluga, odnosno dostave i povrata robe i ambalaže. Kao što je već opisano, postoji nekoliko vrsta LDC-a s obzirom na njihovu dominantnu funkciju.

LDC-i su sastavni dio trgovinske infrastrukture. O formiranju LDC-a odluku donose potencijalni korisnici koji trebaju dati odgovore na ključna dva pitanja:

- 1) Koliko je distribucijskih centara potrebno?
- 2) Gdje locirati logističko-distributivne centre?

Ključni čimbenici kod donošenja odluka su potrošačka kretanja i ekonomska moć gospodarskih subjekata, geoprometna lokacija, radna snaga, cijena zemljišta i stupanj razvijenosti infrastrukture [9].

² Osnovne intermodalne transportne jedinice su kontejneri, poluprikolice te izmjenjivi transportni sanduci.



Slika 6. Modeli logističko-distributivnih centara
Izvor: [9]

U praksi, četiri su različita modela logističko-distributivnih centara:

- 1) **Decentralizirani tip organizacije** – karakterističan za nacionalne distribucijske centre, gdje svaka država ima svoj distribucijski centar koji opskrbljuje svoje područje
- 2) **Centralizirani tip organizacije** – jedan distribucijski centar koji se temelji na gospodarskoj snazi šireg okruženja

- 3) **Mrežni tip organizacije** – glavno obilježje ovakvog tipa organizacije je zajednička organiziranost logističkih poslova koji su smješteni u glavnom distribucijskom centru
- 4) **Koordinirano decentralizirani tip organizacije** – sastavljen iz više regionalnih centara, koji većinom čine jedno poduzeće

Među najvažnijim čimbenicima kod donošenja odluke o lokaciji logističko-distributivnog centra su prometna infrastruktura i prometna povezanost. Ukoliko je visok stupanj razvijenosti prometnog sustava povećava se i stupanj konkurentnosti, mogućnost snižavanja cijene proizvoda, produktivnost proizvodnje te se povećavaju gravitacijske zone.

Kod donošenja odluke potrebno je detaljno analizirati ciljano tržište, kapacitete i stupanj razvijenosti infrastrukture te mogućnosti kretanja robnih tokova. Raspoloživost kvalitetne radne snage i odnos kvalitete i troškova rada također igraju značajnu ulogu kod odabira lokacije logističkih centara. U obzir treba uzeti dostupnost i kvalitetu potencijalnih kooperanata, eventualni najam skladišta, koncesiju ili investiciju u izgradnju vlastitog skladišta, te uvjete pod kojima se ono može izgraditi.

Centralizacija ili decentralizacija LDC-a ima veliki utjecaj na efektivnost distribucije. Primjerice, ukoliko kupci ne zahtijevaju kratak rok isporuke, distribucijska mreža funkcionira sa manjim brojem LDC-a što rezultira većim stupnjem centralizacije zaliha, povećava se produktivnost i frekvencija isporuka, ali se i povećavaju troškovi skladištenja te uzrokuje veću gustoću prometa u užem području. Decentralizacija se uzima u obzir ukoliko kupci zahtijevaju kratak rok isporuke te se tada više LDC-a locira u blizini kupaca reducirajući na taj način prijevozne udaljenosti. Također se na taj način smanjuje količina zaliha, ali se povećavaju troškovi ukupnog kapaciteta. Veći broj lokacija rezultira nižom produktivnošću i frekvencijom isporuka i smanjuje se frekvencija ulaznih tokova robe, zbog čega ušteda na prijevoznim troškovima može biti neprimjetna.

Osim globalizacije, funkcije, vrste i modela formiranja i upravljanja LDC-om, ono što je od ključne važnosti za uspješno poslovanje je i sama lokacija LDC-a.

Razvoj LDC-a uvjetovan je promjenama u okruženju (kontekst) [11]:

- Promjene u strukturi proizvodnje i isporuke;
- Komunikacija uvjetovana novim tehnologijama;
- Napušta se koncept velike količine zaliha (visoki troškovi);
- Koncept minimizacije vrijednosti vezanog kapitala;
- Udio troškova logistike u proizvodnji 20-40 %;
- Rast troškova logistike;
- Zahtjevi kupaca/ korisnika (razvoj kvalitete kao koncepta);
- Otvaranje tržišta i pojava konkurencije.

LDC je u osnovi sustav koji proizvodi širok spektar različitih usluga namijenjenih za različite profile korisnika koji djeluju na različitim područjima logistike. Struktura proizvoda LDC-a može biti definirana u funkciji različitih područja logistike koja imaju svoja specifična obilježja. Tako se u sustavu logističkih usluga pojavljuju mnogobrojne uslužne djelatnosti [4].

Promjenom uvjeta u kojima je određeni LDC nastao mijenja se i njegova funkcija, dok se promjenom čimbenika kao što su globalizacija, proizvodnja, financije, komunikacija, kvaliteta i tehnologija mijenja sam kontekst razvoja LDC-a.

8. ZAKLJUČAK

Logistika predstavlja moćno oružje za postizanje konkurentne prednosti u tržišnoj utakmici te je vrlo važno za svako poduzeće da posebnu pažnju usmjeri upravo strateškom planiranju logistike. Kako bi logistika, kao iznimno značajan sektor svakog poslovnog subjekta, ispunila sve svoje zadaće neophodna je prilagodba trendovima modernog vremena.

Digitalizacija u mnogo čemu olakšava obavljanje većine poslova, ali se iz dana u dan otvaraju nove mogućnosti i novi načini praćenja i komunikacije, tako da ono što je jučer bilo novo danas je već zastarjelo.

Nužno je zaposlenike kontinuirano educirati, pratiti trendove, te sve procese logistike prilagođavati trenutnim tokovima. Na taj način mogu se ostvarivati željeni rezultati, što je i osnovni cilj logistike - postizanje izuzetne kvalitete proizvoda/usluge uz niske troškove i nisku maloprodajnu cijenu, zadovoljstvo kupca, educiranje potrošača te kao definitivni cilj ostvarenje planiranog profita i kontinuirani rast.

Među najvažnijim čimbenicima kod donošenja odluke o lokaciji logističko-distributivnog centra su prometna infrastruktura i prometna povezanost.

Ukoliko je visok stupanj razvijenosti prometnog sustava povećava se i stupanj konkurentnosti, mogućnost snižavanja cijene proizvoda, produktivnost proizvodnje, te se povećavaju gravitacijske zone.

Kod donošenja odluke potrebno je detaljno analizirati ciljano tržište, kapacitete i stupanj razvijenosti infrastrukture te mogućnosti kretanja robnih tokova.

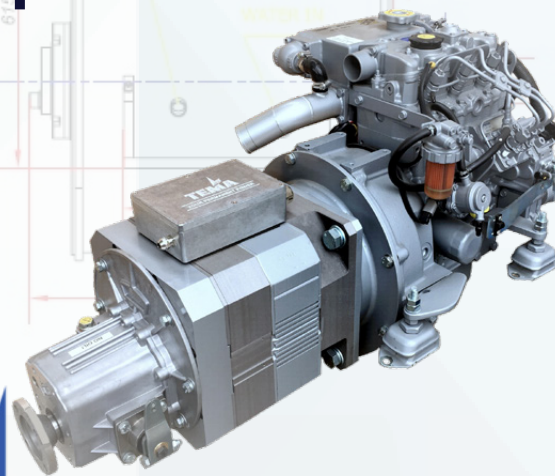
LITERATURA

- [1] I. Meidute, "Comparative Analysis of the Definitions of Logistics Centres", *Transport*, 20(3), 106.-110., 2005.
- [2] R. Zelenika, *Logistički sustavi*. Ekonomski fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2005.
- [3] Č. Ivaković., R. Stanković, M. Šafran, Špedicija i logistički procesi. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2010.
- [4] T.J. Mlinarić, *Robno transportni centri*. Fakultet prometnih znanosti, Zagreb, 2015.
- [5] K. Rogić, „Unutarnji transport i skladištenje, autorizirana predavanja“, Zagreb, 2016.
- [6] R. Zelenika, L. Jakomin, *Suvremeni transportni sustavi*. Ekonomski fakultet Rijeka, Tipograf d.d., Rijeka, 1995.

- [7] [B. Cicvarić](#), „Znate li što je cross-docking?“, 2016. [Na internetu] Dostupno: www.fpz.unizg.hr/prom/?p=2374 [pristupano 15.10.2019.]
- [8] [M. Šafran](#), „Planiranje logističkih procesa, autorizirana predavanja“ Dostupno: http://e-student.fpz.hr/Predmeti/P/Planiranje_logistickih_procesa/Materijali/plpl.pdf [pristupano 15.10.2019.]
- [9] B. Kesić, A. Jugović, N. Perko, „Potrebe i mogućnosti organizacije logističko-distribucijskog centra u riječkoj regiji“, stručni rad, Pomorski zbornik 42 (2004)1, 187-208, 2004.
- [10] S. Zečević, *Robni terminali i robno-transportni centri*. Saobraćajni fakultet, Beograd, 2006.
- [11] M. Drljača, „Upravljanje logističko-distributivnim centrima, autorizirana predavanja“, Sveučilište Sjever, Koprivnica, 2018.
- [12] B. Knežević, I. Habuš, N. Knego, „Distribucijski centar kao izvor poslovne učinkovitosti – Empirijski uvid“, Sveučilište u Osijeku, Ekonomski fakultet, Poslovna logistika u suvremenom menadžmentu, X/2010, Osijek, 2010.
- [13] D. Babić, „Upravljanje transportnim lancima, autorizirana predavanja“. Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2018.
- [14] J. Heather, F. Moura, T. Domingos, „Transport infrastructure project evaluation using cost-benefit analysis“, Department of Civil Engineering, Architecture and Georesources, Lisbon, 2013.



Marine electric / hybrid propulsion in permanent magnets technology 10kw - 1000kw per unit



TEMA

YOUR PERMANENT POWER



