

Analiza magnetopobudnih sila u multifaznim mašinama u sklopu integrisanih punjača za električna vozila

ALEKSANDAR R. MILIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički fakultet, Beograd

SLOBODAN N. VUKOSAVIĆ, Univerzitet u Beogradu

Elektrotehnički fakultet, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 629.3-835

DOI: 10.5937/tehnika1803391M

Rad se bavi analizom magnetopobudnih sila (MPS) u multifaznim mašinama u sklopu integrisanih punjača u toku brzog punjenja baterija u električnim vozilima (EV). Analitička razmatranja su pokazala da se primenom odgovarajuće topologije energetskog pretvarača i korišćenjem raspoloživih stepeni slobode može ostvariti brzo punjenje bez stvaranja obrtnog polja u multifaznoj mašini. Pokazano je da je ovakav režim rada moguće postići korišćenjem osnovnih elemenata vučnog sistema i to bez promene konfiguracije pri prelasku iz vučnog u režim punjenja. Izvršene su simulacije dve različite topologije integrisanih punjača koje sadrže električne mašine sa asimetričnim šestofaznim i asimetričnim devetofaznim statorskim namotajem. Kao rezultat simulacija dobijena je prostorno-vremenska raspodela rezultantnih MPS u mašinama. Na osnovu dobijenih rezultata formulisane su smernice za projektovanje motor-pretvaračke grupe za vuču i punjenje baterije EV.

Ključne reči: multifazne mašine, integrisani punjači, električna vozila, sistemi za brza punjenje baterija

1. UVOD

Automobili sa endotermičkim motorom sagorevaju fosilna goriva i emituju ugljen dioksid i druge štetne materije. Usled klimatskih promena i postepenog iscrpljivanja rezervi fosilnih goriva, u porastu je razvoj i komercijalna upotreba električnih vozila (EV). Problemi koji ograničavaju širu primenu EV vezani su za izvore električne energije u sklopu vozila i sisteme za punjenje. Punjač predstavlja deo sistema za punjenje koji se jednim svojim delom, ili u potpunosti, nalazi u sklopu EV.

Punjač koji se nalazi u okviru EV naziva se on-board, dok se kod off-board verzije jedan deo punjača nalazi u sklopu stanice za punjenje EV. Off-board sistemi omogućavaju punjenje baterije većim snagama i izvođenje galvanske izolacije u sklopu stanice za punjenje, istovremeno smanjujući gabarit, težinu i cenu onog dela punjača koji se nalazi u EV [1]. Sa druge strane, on-board sistemi pružaju manju zavisnost korisnika od infrastrukture [2]. On-board sistemi se mogu

realizovati korišćenjem integrisanih ili klasičnih topologija punjača [3].

Prihvatljivost EV za tipičnog korisnika zavisi od brzine punjenja. U idealnom slučaju, punjenje ne bi trebalo da traje značajno duže od prosečnog zadržavanja klasičnih vozila na benzinskim pumpama. Brzo punjenje podrazumeva veliku snagu koja se preuzima iz trofaznih sistema naizmeničnog napona ili sistema jednosmernih struja i napona [3]. U slučaju primene on-board sistema, brza punjenja su moguća jedino korišćenjem integrisanih punjača i trofaznog naizmeničnog sistema napajanja.

Integrisani punjači koriste elemente vučnog sistema u sklopu punjača EV. Funkciju ispravljača najčešće obavlja vučni inverter, dok namotaji vučnog motora preuzimaju ulogu filterskih prigušnica. Između jednosmernih sabirnica invertora i baterije EV koristi se čoper prikazan na slici 1, koji može obavljati pretvaranje u oba smera, i koji usklađuje napon invertora i napon baterije. Opisana realizacija integrisanog punjača oslanja se na okolnost da se režim električne vuče i režim punjenja ne preklapaju. Korišćenjem istih elemenata za potrebe vuče i punjenja smanjuje se ukupan broj elemenata električnog sistema EV. Vozilo je lakše, jeftinije, dok sistem za punjenje zauzima manje prostora. Kako se svi elementi punjača nalaze u EV, smanjuju se zahtevi korisnika za infrastrukturom za

Adresa autora: Aleksandar Milić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

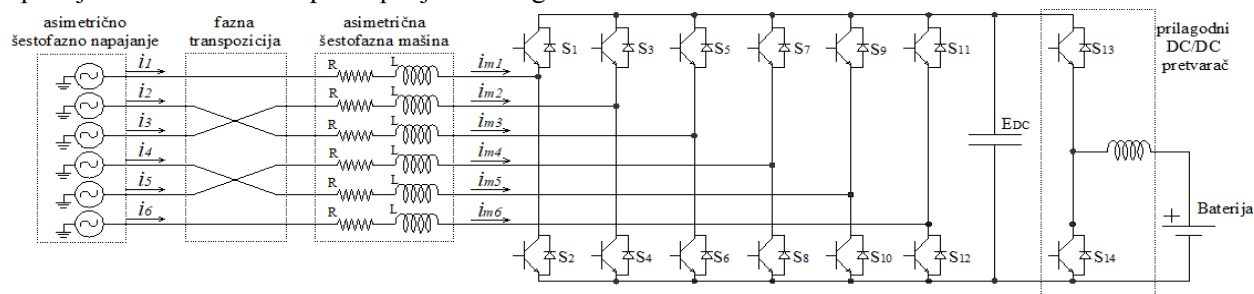
e-mail: milic.aleksandar@etf.ac

Rad primljen: 20.03.2018.

Rad prihvaćen: 18.05.2018.

punjenje. Sa druge strane, elementi vučnog sistema su predviđeni za velike snage, pa je njihovim korišćenjem u punjaču moguće postići velike brzine punjenja. Takođe, korišćenjem vučnog invertora kao aktivnog ispravljača u ulaznom stepenu punjača omogućava

proces punjenja sa jediničnim faktorom snage i minimalnim harmonijskim izobličenjima. Na taj način integrisani punjači rešavaju gotovo sve probleme koje unose klasične topologije punjača.



Slika 1 - Topologija integrisanog punjača sa šestofaznom mašinom sa asimetričnim statorskim namotajem

Ipak, integrisani punjači unose svoje probleme kao što su relativno složena hardverska i softverska implementacija i potreba za poluprovodničkim prekidačima za velike struje. Najveći nedostatak integrisanih punjača je stvaranje neželjenog obrtnog polja u električnoj mašini (tj. vučnom motoru) i posledičnog elektromagnetskog momenta tokom brzog punjenja baterije EV.

Namotaji vučnog motora se tokom punjenja koriste kao prigušnice u okviru ulaznog filtra integrisanog punjača. Krajevi faznih namotaja se priključuju na trofaznu mrežu. Usled uspostavljanja trofaznog sistema struja u namotajima mašine dolazi do stvaranja obrtnog polja. Kao posledica obrtnog polja stvara se momenat koji može pokrenuti rotor mašine i delove prenosnika koji su spregnuti sa rotorom. Neželjena rotacija prouzrokuje nepotrebno habanje mehaničkih delova, buku i smanjenje ukupne efikasnosti sistema. Problem je moguće rešiti primenom kvačila i odvajanjem mašine od ostatka mehaničkog sistema, čime se formirani momenat ne prenosi na elemente prenosnika niti na točkove vozila [4]. Postoje i topologije sa mehaničkim kočnicama koje rotor drže u stanju mirovanja i ne dozvoljavaju rotaciju [5]. Ipak, mirovanje rotora u obrtnom polju dovodi do uvećanja gubitaka na rotoru i velikih struja magnećenja. Ovo dovodi do smanjenja efikasnosti sistema za punjenje, a dodatni mehanički elementi smanjuju njegovu pouzdanost i povećavaju cenu. Proces brzog punjenja bez stvaranja obrtnog polja može se postići i primenom specijalnih mašina. Posebna realizacija statorskih namotaja može dovesti do poništavanja fluksa u pojedinim fazama na način koji smanjuje ili eliminiše obrtno magnetsko polje [6]. Ipak, da bi se ovo realizovalo, potrebno je izvršiti rekonfiguraciju hardvera pri prelasku iz vučnog u režim punjenja.

Takođe, potrebna je i specijalna mašina sa izvodima na sredini faznih namotaja, kao i pretvarač sa 12 prekidača. Brzo punjenje se može ostvariti i korišćenjem sinhronne mašine sa pobudnim namotajem,

čiji su krajevi u režimu punjenja otvoreni [7]. Mane ovog sistema su potreba za hardverskom rekonfiguracijom pri prelasku između radnih režima i potreba za pobudnim sistemom.

Može se zaključiti da primenom trofaznih mašina u integrisanim punjačima EV nije moguće ostvariti brzo punjenje bez stvaranja obrtnog polja u mašini. Ovaj proces je moguć uz korišćenje dodatnih ili specijalnih elemenata vučnog sistema ili uz izmene u topologiji. Predmet razmatranja u ovom radu je analiza i projektovanje multifaznih mašina u integrisanim punjačima. U drugom poglavlju data su analitička razmatranja mogućih primena multifaznih mašina u okviru brzih punjača. U trećem poglavlju su data analitička razmatranja i rezultati simulacija posmatranih sistema. Zaključci su dati u poglavlju IV.

2. ANALIZA MULTIFAZNIH INTEGRISANIH PUNJAČA

Integrisani punjači sa trofaznim mašinama se tokom brzog punjenja EV napajaju trofaznim simetričnim sistemom napona. Analiza ovih punjača pojednostavljuje se primenom transformacija kao što su Parkova i Klarkina. Kada se u punjaču koriste multifazne mašine i pretvarači, tada je fazni pomeraj napona u pojedinim namotajima zavisao od načina izvođenja statorskog namotaja. Stoga, statorski namotaj određuje i sistem napona koji neće dovesti do stvaranja obrtnog polja u režimu brzog punjenja.

Analiza n -faznog punjača sprovodi se transformacijom osnovnog sistema i posmatranjem uprošćenog modela namotaja i magnetskog kola. Transformacije koriste odgovarajuće n -dimenzione matrice određene konfiguracijom namotaja statora, brojem faza i brojem izolovanih zvezdišta integrisane mašine. Svaka mašina i svaki statorski namotaj ima odgovarajuću transformacionu matricu. Primenom transformacija na n -faznu mašinu dobija se sistem jednačina prikazan u radu [8] koji u potpunosti opisuje njeno ponašanje. Iz

sistema jednačina [8] može se videti da pored struja osnovnog $d-q$ sistema, koje postoje i kod standardne trofazne mašine, postoje i dodatne komponente struje koje nastaju usled prisustva većeg broja faza. Dobijeni strujni parovi ($i_d - i_q$, $x_k - y_k$, $k=1, 2, 3, \dots$) mogu se izraziti u formi kompleksnih brojeva, koji predstavljaju prostorne vektore. Svaki prostorni vektor opisuje jednu ravan sa dve komponente struje. Iz sistema [8] može se videti da je magnetska sprega između statora i rotora opisana isključivo jednačinama $d-q$ sistema.

Primenom navedenih transformacija na sistem od 6 faznih struja dobijaju se u opštem slučaju dve međusobno normalne ravni i dve nulte komponente struje, pri čemu stvaranje obrtnog polja određuje isključivo ravan koja sadrži $d-q$ komponente struje [7]. U motorom režimu rada nulte komponente struje se ne mogu uspostaviti ako su zvezdišta izolovana, dok će u slučaju gde su zvezdišta spojena doći do uspostavljanja jedne nulte komponente struje. Druga $x-y$ ravan ne doprinosi stvaranju obrtnog polja. Komponente $x-y$ ravni predstavljaju dodatne stepene slobode. Isti rezultat transformacije, dve međusobno normalne ravni, dobija se i transformisanjem sistema od 5 faznih struja. Razlika se ogleda u broju nulnih komponenti struje. U opštem slučaju [7], petofazni sistem daje rezultat transformacija sa samo jednom nultom komponentom struje. Prednost petofaznog sistema je što za isti broj dodatnih stepena slobode koristi jednu granu manje u pretvaraču, dok se prednost šestofaznog sistema ogleda u uvećanju ukupne snage zbog prisustva dodatne faze.

Za brzo punjenje baterije EV bez stvaranja obrtnog polja u mašini potrebno je modifikovati struje $d-q$, odnosno $\alpha-\beta$ sistema. Ukoliko vektor struje $\alpha-\beta$ sistema ima samo realnu (ili samo imaginarnu) komponentu, tada u mašini ne postoje uslovi za stvaranje obrtnog magnetskog polja niti momenta. Polje u mašini je tada pulsacione prirode. Uz to, vrednosti strujnih komponenti dodatnih $x-y$ ravni tada postaju različite od nule. Potrebna modifikacija struja $\alpha-\beta$ ravni postiže se adekvatnim zadavanjem struja osnovnog multifaznog

sistema. Potrebne jačine faznih struja se određuju iz transformacione matrice za posmatranu mašinu.

Na slici 1 data je topologija integrisanog punjača koja u sebi sadrži mašinu sa asimetričnim šestofaznim statorskim namotajem. Namotaj ove mašine može se predstaviti kao dve trofazne zvezde prostorno pomerene za ugao od 30° . Namotaji u okviru svake zvezde su prostorno pomereni za 120° tako da je za potrebe razvijanja vučnog momenta na krajeve mašine potrebno dovesti sistem struja koji je opisan jednačinama (1). Da bi se postigao proces brzog punjenja EV bez stvaranja obrtnog polja u mašini, prema [8], potrebno je izvršiti faznu transpoziciju kao što je prikazano na slici 1. Tada se u namotaje dovodi sistem jednačina struja (2).

$$\begin{aligned} i_1 &= I \sin(\omega t) & i_4 &= I \sin(\omega t - \pi/6) \\ i_2 &= I \sin(\omega t - 4\pi/6) & i_5 &= I \sin(\omega t - 5\pi/6) \\ i_3 &= I \sin(\omega t - 8\pi/6) & i_6 &= I \sin(\omega t - 9\pi/6) \end{aligned} \quad (1)$$

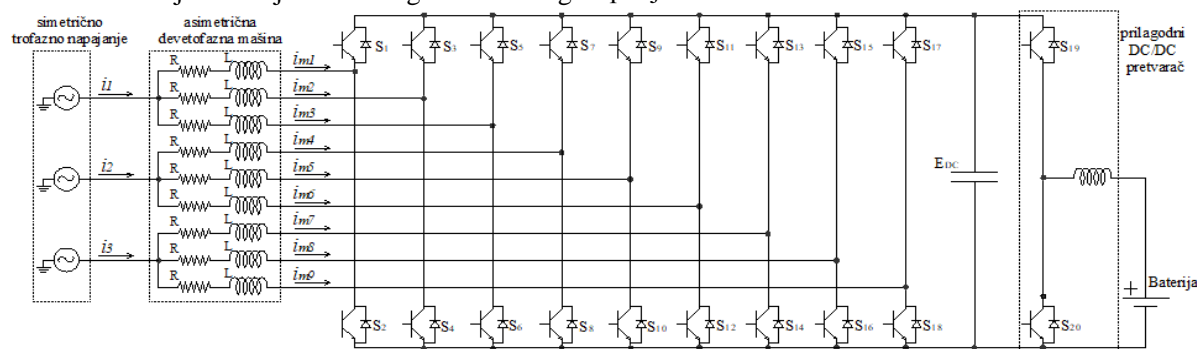
$$\begin{aligned} i_{m1} &= i_1 & i_{m4} &= i_5 \\ i_{m2} &= i_3 & i_{m5} &= i_4 \\ i_{m3} &= i_2 & i_{m6} &= i_6 \end{aligned} \quad (2)$$

Kada se na sistem jednačina (2) primeni odgovarajuća transformaciona matrica za mašinu sa šestofaznim asimetričnim namotajem iz [9], dobija se raspregnuti sistem jednačina (3).

$$\begin{aligned} i_\alpha &= 0 & i_x &= \sqrt{6}I \cos(\omega t) \\ i_\beta &= 0 & i_y &= \sqrt{6}I \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

Iz sistema (3) može se zaključiti su struje $\alpha-\beta$ sistema jednake nuli i da ne postoje uslovi za stvaranje obrtnog magnetskog polja u mašini. Punjenje EV se obavlja u potpunosti pomoću struja dodatnog $x-y$ sistema koje imaju učestanost ω i amplitudu $\sqrt{6} \cdot I$.

Dodatni stepen slobode koji postoji u šestofaznoj mašini sa asimetričnim namotajem iskorišćen je kako bi se postiglo brzo punjenje EV pomoću integrisanog punjača.



Slika 2 - Topologija integrisanog punjača sa devetofaznom mašinom sa asimetričnim statorskim namotajem

Gotovo identična analiza može se primeniti i na punjač prikazan na slici 2, koji u sebi integriše devetofaznu mašinu sa asimetričnim namotajem. Namotaj statora ove mašine može se posmatrati kao tri trofazne zvezde prostorno pomerene za ugao od 20° . Namotaji u zvezdama su prostorno pomereni za 120° . Za postizanje procesa brzog punjenja bez stvaranja obrtnog polja u mašini [8], na tri izolovana zvezdišta ove mašine potrebno je dovesti trofazni sistem struja (4). Tada u namotajima mašine postoje struje prikazane sistemom (5). Ako se na sistem struja (5) primeni transformaciona matrica iz [9] za devetofaznu mašinu sa asimetričnim statorkim namotajem, dobija se raspregnuti sistem struja (6).

$$\begin{aligned} i_1 &= I \sin(\omega t) \\ i_2 &= I \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i_3 &= I \sin(\omega t - 4\pi/3) \\ i_{m1} &= i_1/3 & i_{m4} &= i_2/3 & i_{m7} &= i_3/3 \\ i_{m2} &= i_1/3 & i_{m5} &= i_2/3 & i_{m8} &= i_3/3 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} i_{m3} &= i_1/3 & i_{m6} &= i_2/3 & i_{m9} &= i_3/3 \\ i_\alpha &= 0 & i_{x1} &= I \left[2/3 \cos(\omega t) + \sqrt{3}/3 \sin(\omega t) \right] \\ i_\beta &= 0 & i_{y1} &= -I\sqrt{3}/3 \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} i_{x2} &= 0 & i_{x3} &= 0 \\ i_{y2} &= 0 & i_{y3} &= 0 \end{aligned}$$

Iz sistema struja (6) može se videti da za razliku od ranije analizirane šestofazne mašine ovde postoje tri dodatna stepena slobode (tri dodatna prostorna vektora). Kao i u ranije pruženoj analizi, struje osnovne α - β ravni imaju nulte vrednosti, dok struje ravni x_1 - y_1 imaju vrednosti različite od nule. Preostali prostorni vektori su jednaki nuli i mogu se iskoristiti za dalja poboljšanja sistema za punjenje.

Na osnovu sistema (3) i (6) može se zaključiti da je primenom odgovarajuće topologije pretvarača i multifazne mašine u integrisanom punjaču moguće postići brzo punjenje baterije EV bez stvaranja obrtnog polja u mašini, bez korišćenja dodatnih komponenti i bez rekonfiguracija hardvera između vučnog i režima za punjenje. U slučaju primene devetofazne topologije punjača, prikazane na slici 2, koristi se trofazni simetrični izvor i nema zahteva za prevezivanjem zvezdišta. Šestofazna topologija punjača zahteva dodatno prevezivanje zvezdišta i asimetrični šestofazni izvor napajanja (slika 1), koji se prema [10] može napraviti od simetričnog trofaznog izvora korišćenjem odgovarajućeg tronamotajnog transformatora. Ova topologija ima prednost u korišćenju manjeg broja prekidača snage.

3. ANALIZA MAGNETOPOBUDNIH SILA

Ranije je analitičkim razmatranjima pokazano da sistemi prikazani na slikama 1 i 2 imaju komponente vektora α - β ravni jednake nuli, i da postoje dodatni x - y vektori koji se mogu iskoristiti za potrebe brzog punjenja baterije EV pri kojem ne dolazi do stvaranja obrtnog magnetskog polja u mašini integrisanog punjača. U nastavku rada su simulacijama proverene teorijske tvrdnje da se adekvatnom realizacijom napajanja može postići brz proces punjenja bez stvaranja obrtnog polja. Sprovedene simulacije omogućavaju proučavanje fizičkih pojava u električnoj mašini koja se koristi u okviru integrisanog punjača.

Simulacije ovde podrazumevaju proračun prostorno-vremenske raspodele MPS u električnim mašinama na osnovu pretpostavljenih faznih struja i geometrije mašine. Na osnovu prostorno-vremenske raspodele MPS može se izvesti zaključak o prisustvu i jačini pulsacionih i obrtnih komponenti magnetskog polja u električnoj mašini.

U ovom radu, određivanje MPS podrazumeva proračun magnetskog polja u konačnom broju tačaka duž obima mašine, i to u konačnom broju ekvidistantnih trenutaka u okviru jednog perioda promene statorkih struja. Za broj tačaka u prostoru uzet je broj žlebova. U oba sistema razmatrana je mašina sa 36 žlebova na statoru, pa je MPS određivana u 36 tačaka, u zoni svakog pojedinačnog žleba.

Simulacije su sprovedene pod pretpostavkom da se u sistemima nalaze asinhronne mašine sa kaveznom rotorom i da je statorki namotaj realizovan kao jednoslojni sa jednim provodnikom po žlebu i bez skraćenog navojnog koraka. Rad pretvaračke grupe, preko koje se energija prenosi od mašine do baterije, nije analiziran u ovom radu.

Dodatno se pretpostavlja da je mrežna struja idealno prostoperiodična. Dakle, pretpostavlja se da u svakom žlebu postoji prostoperiodična struja koja ne sadrži više harmonike. Bez gubitka opštosti, polazi se od pretpostavke da u namotajima postoji struja jačine 1 A i frekvencije 50 Hz.

Za napajanje sistema prikazanih na slikama 1 i 2 koriste se sistemi jednačina struja (2) i (5), respektivno. U proračunu je usvojena pretpostavka da se magnetsko polje stvara pod uticajem statorkih struja, dok se uticaj drugih struja ili stalnih magneta može zanemariti. Nisu uvaženi efekti zasićenja u gvožđu mašine, uticaj vihornih struja i reakcije kaveznog rotora na raspodelu polja u mašini. Kao rezultat simulacija dobijaju se talasi rezultatnih MPS koji postoje mašinama u sistemima prikazanim na slikama 1 i 2 tokom procesa brzog punjenja, odnosno pri primenjenom trofaznom napajanju. Rezultati su dobijeni na osnovu proračuna sprovedenih u programskom alatu Matlab.

Proračun sadrži tri koraka. Najpre su navojci statora definisani i grupisani u fazne navojne funkcije. Dalje su navojne funkcije množene odgovarajućim faznim strujama. Sabiranjem ovako formiranih faznih MPS, dobijene su resultantne MPS u mašinama. Tačnost simulacija je proverena primenom istog postupka na poznatom sistemu, monofazno napajanoj trofaznoj mašini. Svaki od koraka je detaljnije predstavljen u nastavku teksta.

U prvom koraku je za svaki od faznih namotaja utvrđena navojna funkcija, tj. funkcija koja opisuje prostornu raspodelu provodnika (žlebova) i koja direktno utiče na talasni oblik MPS, sadržaj viših harmonika. Najpre su definisani navojci u mašini. Uvažavajući način formiranja statora sa punim navojnim korakom, navojak čine provodnici u dijametralno postavljenim žlebovima. Postojanje struja u ovako definisanom navojku dovodi do pravougaone promene MPS duž obima statora, koja se predstavlja izrazom (7). Svaki navojak statora je definisan izrazom (7) u kojem je v oznaka faze, i oznaka navojka u posmatranom faznom navojnom pojasu, dx korak ožlebljenja statora, $k = f(v, i)$ pomeraj navojka i posmatrane faze v , a x ugaoni pomeraj koji uzima diskretne vrednosti. Pretpostavljeno je da se u svakom žlebu mašine nalazi jedan provodnik. U opštem slučaju za N provodnika po žlebu, dobijene rezultate je potrebno pomnožiti faktorom N .

$$U_{vi} = N \cdot \text{square}(x - kdx) \quad (7)$$

Za obe analizirane mašine definisano je osamnaest navojnih kontura koje doprinose ukupnom polju u mašini. Navojne konture su fazno pomerene za ugao koji odgovara žlebnom rastojanju $k \cdot dx$. Fazna navojna funkcija dobija se sabiranjem navojnih doprinosa posmatranog navojnog pojasa uvažavanjem međusobnog prostornog pomeraja između navojaka (8). Jednoj fazi je u slučaju šestofazne mašine dodeljeno 6 žlebova (3 navojka, $z = 3$), a 4 žleba po fazi je dodeljeno u slučaju devetofazne mašine (2 navojka, $z = 2$).

$$W_v = \sum_{i=1}^z U_{vi} \quad (8)$$

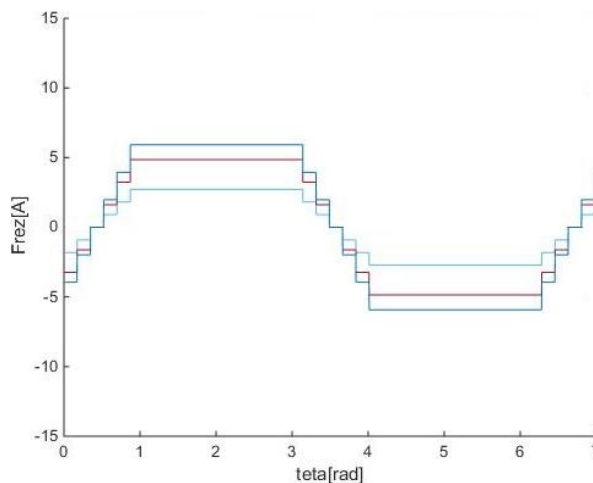
U drugom koraku, fazne MPS su dobijene množenjem faznih navojnih funkcija sistemima prostoperiodičnih struja (2) i (5), pri čemu svaka fazna navojna funkcija W_v ima odgovarajuću faznu struju i_{mv} , kao što je prikazano izrazom (9). Navojna funkcija W_v opisuje prostornu raspodelu MPS faze v , dok su promene faznih MPS u vremenu uvažene promenama faznih struja i_{mv} u vremenu. Kako je pri proračunu MPS izvršena diskretizacija po vremenu, fazne navojne funkcije se za svaki od analiziranih trenutaka množe odgovarajućim vrednostima struje. Usled promene jačina struja u vremenu menjaju se navojni

doprinosi, pa i fazne MPS. Uvažavanjem u izrazu (9) promene faznih struja u vremenu, dobijaju se vrednosti faznih MPS u 36 tačaka duž obima statora za svaki od analiziranih trenutaka.

$$F_v(t) = W_v \cdot i_{mv}(t) \quad (9)$$

Na slici 3 prikazana je familija talasnih oblika jedne fazne MPS kod šestofazne mašine. Fazne MPS imaju identične talasne oblike, međusobno fazno pomerene usled prostornog pomeraja žlebova.

Prikazani talasni oblici predstavljaju promenu jedne fazne MPS duž obima statora ($0-2\pi$), u tri definisana trenutka. Svaki talasni oblik odgovara jednoj jačini struje, odnosno jednom trenutku u vremenu. Talasni oblici su dobijeni primenom funkcije *plot* (x, F_v) u programskom alatu Matlab.



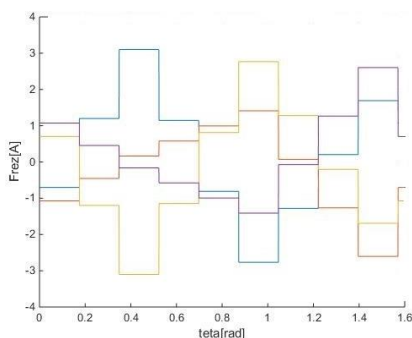
Slika 3 - Talasni oblik proizvoljne fazne MPS u tri definisana trenutka

Posmatrajući sliku 3, može se zaključiti da polje ne putuje duž obima statora već da samo pulsira usled promene jačine fazne struje u vremenu. Promene jačine struje u vremenu u posmatranom navojnom pojasu menjaju amplitudu oscilovanja fazne MPS, ali ne i relativni udeo viših harmonika u talasnom obliku MPS.

Dakle, način motanja statorskog namotaja i broj žlebova na statoru određuje harmonijski sastav MPS, dok jačina struje i broj provodnika po žlebu određuju amplitudu harmonika u spektru. Stepennasta promena MPS posledica je konačnog broja statorskih žlebova. Usled uvažanih zanemarenja može se videti da je jačina magnetskog polja u oblasti zupca konstantna.

U poslednjem koraku proračuna dobijena je resultantna MPS u mašini sabiranjem svih doprinosa faznih MPS. Resultantne MPS u šestofaznoj i devetofaznoj mašini se dobija kada parametar n u izrazu (10) uzima vrednost 6 i 9, respektivno. Uvažavanjem u izrazu (10) promene faznih struja u vremenu, dobijaju se vrednosti

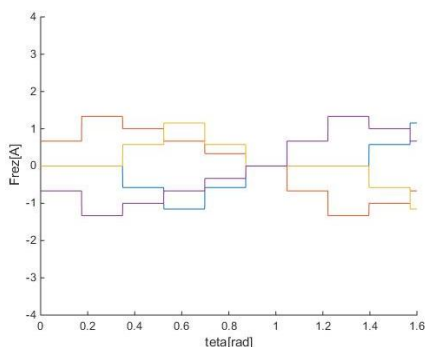
rezultantne MPS u 36 tačaka duž obima statora za svaki od analiziranih trenutaka u proračunu.



Slika 4 - Rezultantna MPS u mašini sa asimetričnim šestofaznim statorskim namotajem u sklopu punjača na slici 1 u 4 analizirana trenutka

$$F_{na}(t) = \sum_{v=1}^n W_v \cdot i_{mv}(t) \quad (10)$$

Talasni oblici prikazani na slikama 4 i 5 predstavljaju prostorno-vremensku raspodelu rezultantnih MPS u električnim mašinama datim na slikama 1 i 2. Odnosno, predstavljene su promene jačine magnetskog polja duž obima statora u 4 analizirana trenutka (5 ms, 10 ms, 15 ms, 20 ms).

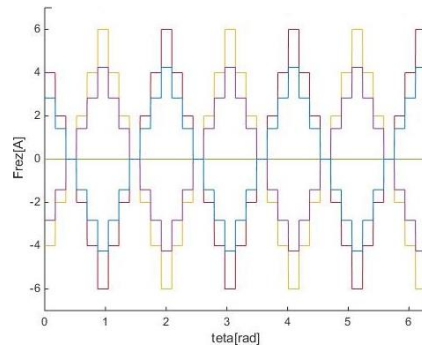


Slika 5 - Rezultantna MPS u mašini sa asimetričnim devetofaznim statorskim namotajem u sklopu punjača na slici 2 u 4 analizirana trenutka

Može se videti sa slika 4 i 5 da kao posledica konačnog broja žlebova po obimu statora, rezultantno polje u mašini sadrži prostorne harmonike višeg reda. Rezultantne MPS se mogu predstaviti kao sume direktnih i inverznih komponenti polja, odnosno kao sume obrtnih i pulsacionih polja. Kumulativno dejstvo kod šestofazne mašine, slika 4, je takvo da postoje oscilacije MPS usled delovanja više obrtnih polja, u direktnom ili inverznom smeru rotacije, ali da ne postoje uslovi za stvaranje obrtnog polja koje bi dovelo do značajnijeg elektromagnetskog momenta. U slučaju devetofazne mašine, slika 5, može se zaključiti da rezultantna MPS u vremenu ima dominantno pulsacioni karakter sa manjim sadržajem obrtnih polja, pa ni u drugom slučaju ne postoje uslovi za stvaranje većeg elektromagnetskog momenta. Dakle, u kumulativnom

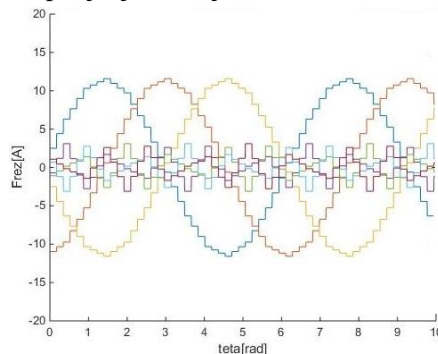
efektu u električnim mašinama u oba integrisana punjača postoje pulsacione promene polja koje nastaju kao posledica struja x-y ravni koje se koriste za punjenje baterije EV, i uz uvažene pretpostavke ne postoje uslovi za stvaranje elektromagnetskog momenta. Stoga, uklonjen je najveći nedostatak integrisanih punjača i stvorena mogućnost da se mašina u datim režimima rada koristi kao filterska prigušnica na ulazu u aktivni ispravljač.

U cilju provere predstavljenog proračuna, izvršena je simulacija poznatog sistema, integrisanog punjača sa monofazno napajanom trofaznom asinhronom mašinom [11]. Naime, u električnoj mašini u sklopu analiziranog punjača postoje pulsacione promene polja usled napajanja mašine nultim komponentama struje, pri čemu ne postoje uslovi za stvaranje većeg elektromagnetskog momenta. Simuliranjem sistema iz [11], prema ranije predstavljenom proračunu uz sve uvažene pretpostavke i zanemarenja, dobijen je talasni oblik prikazan na slici 6.

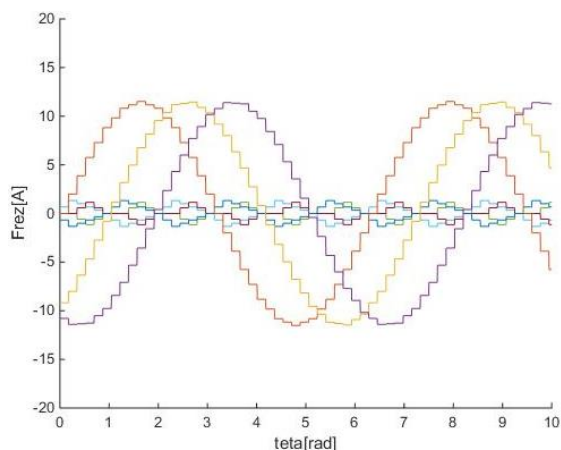


Slika 6 - Rezultantna MPS u monofazno napajanoj trofaznoj asinhronoj mašini sa uzemljenim zvezdištem

Dobijeni talasni oblici potvrđuju ispravnost priloženog simulacionog postupka, ali i ranije iznetih teorijskih tvrdnji. Sa slike 6 se može primetiti i da su pulsacije polja značajne, što dovodi do uvećanih gubitaka u bakru i gvožđu mašine. Takođe, veliki nedostatak ovakvog trofaznog punjača je to što podržava isključivo spora punjenja baterije EV.



Slika 7 – Poređenje rezultantnih MPS u mašini sa asimetričnim šestofaznim statorskim namotajem u režimima punjenja i pražnjenja baterije



Slika 8 – Poređenje rezultantnih MPS u mašini sa asimetričnim devetofaznim statorskim namotajem u režimima punjenja i pražnjenja baterije

Na slikama 7 i 8 predstavljeno je poređenje talasnih oblika rezultantnih MPS u električnim mašinama u režimima punjenja baterije i vučnom režimu (pražnjenje baterije). U oba radna režima posmatrani su identični sistemi sa jednim provodnikom po žlebu i strujom jačine 1A. Na slikama se mogu jasno uočiti putujuća (obrotna) polja, koja postoje u režimu vuče i koja imaju znatno veće amplitude od komponenti polja koja postoje u režimu punjenja baterije. Takođe, može se uočiti da su oscilacije polja manje kod devetofazne topologije punjača, što dovodi do veće energetske efikasnosti pri režimu punjenja baterije. Nedostatak devetofazne topologije se ogleda u korišćenju šest dodatnih prekidača snage u pretvaračkoj grupi.

4. ZAKLJUČAK

Primena integrisanih punjača rezultuje uvećanom snagom i skraćenim vremenom punjenja, manjom cenom, težinom i zapreminom onog dela punjača koji se nalazi u vozilu, kao i jednostavnijom infrastrukturu. Glavni nedostatak integrisanih punjača je stvaranje elektromagnetskog momenta i gubitaka u mašini tokom procesa brzog punjenja. U radu su predstavljene dve topologije integrisanih punjača, sa asimetričnim šestofaznim i devetofaznim statorskim namotajem mašina, koje ne dovode do stvaranja neželjenog obrtnog polja.

Simulacijama predstavljenih topologija dobijene su prostorno-vremenske raspodele rezultantnih MPS u električnim mašinama. Utvrđeno je da se u datim uslovima ne stvara obrtno magnetsko polje. U svrhu verifikacije predloženog simulacionog modela, izvršena je simulacija monofazno napajanog integrisanog punjača sa trofaznom asinhronom mašinom. Pored toga, prostorno-vremenska raspodela MPS je određena i predstavljena i za pomenuti sistem.

Kao glavne prednosti multifaznih topologija u odnosu na klasične trofazne navedene su veća energetska

efikasnost i veće ostvarive brzine punjenja. Poređenjem priloženih multifaznih topologija, iz dobijenih rezultata se može zaključiti da kod topologije sa asimetričnim devetofaznim statorskim namotajem mašine energiju za punjenje EV prenose nulte komponente struje i da su pulsacije polja u mašini vrlo male. Takođe, kod topologije sa devetofaznom mašinom ne zahteva se promena veze zvezdišta, što je slučaj kod topologije sa šestofaznom mašinom. Ipak, devetofazna topologija punjača zahteva više prekidača u pretvaraču tako da je preporučljiva za veće snage punjenja. Topologija sa mašinom sa asimetričnim šestofaznim statorskim namotajem ima neznatno veće pulsacije polja i prenos energije koji se deli na veći broj prostorno-vremenskih harmonika MPS. Pored toga, topologija integriše jednostavniji pretvarač što olakšava hardversku i softversku implementaciju, pa se može koristiti za manje snage punjenja. Predstavljene topologije ne koriste dodatne komponente van elemenata vučnog sistema i ne zahtevaju rekonfiguraciju hardvera pri prelasku iz vučnog u režim punjenja. Uz primenu harmonijske analize prostorno-vremenske raspodele MPS, dobijeni talasni oblici se mogu koristiti za određivanje obrtnih i pulsacionih komponenti magnetskog polja radi boljeg upoznavanja fizičkih pojava u mašini. Tako dobijen harmonijski sastav MPS se može upotrebiti za projektovanje električne mašine i za poboljšanje performansi procesa brzog punjenja u predstavljenim sistemima.

LITERATURA

- [1] S. Haghbin, K. Khan, S. Lundmark, M. Alakula, O. Carlson, M. Leksell, and O. Wallmark, "Integrated chargers for EV's and PHEV's: Examples and new solutions," in *Proc. Int. Conf. Electrical Machines*, pp. 1–6, 2010.
- [2] L. Solero, Nonconventional on-board charger for electric vehicle propulsion batteries, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 144–149, Jan. 2001.
- [3] Yilmaz, M., Krein, P.T, Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles', *IEEE Trans. Power Electron.*, 28, (5), pp. 2151–2169, 2013.
- [4] S. Haghbin, S. Lundmark, M. Alakula, and O. Carlson, An isolated high-power integrated charger in electrified vehicle applications, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 4115–4126, Nov. 2011.
- [5] F. Lacressonniere and B. Cassoret, Converter used as a battery charger and a motor speed controller in an industrial truck, in *Proc. EPE*, pp. 1–7, 2005.
- [6] De Sousa, L, Silvestre, B, Bouchez, B, A combined multiphase electric drive and fast battery charger for

- electric vehicles. *Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. VPPC*, pp. 1–6, 2010.
- [7] Subotic I, Bodo N, Lev, E, Dumnic B, Milicevic D, Katic V, et al. Overview of fast on-board integrated battery chargers for electric vehicles based on multiphase machines and power electronics. *IET Electr. Power Appl.*, Vol. 10, Iss. 3, pp. 217–229, 2016.
- [8] Levi E, Jones M, Vukosavic S.N, et al. A novel concept of a multiphase, multimotor vector controlled drive system supplied from a single voltage source inverter, *IEEE Trans. Power Electron.*, 19, (2), pp. 320–335, 2004.
- [9] Levi E, Bojoi R, Profumo F, et al. Multiphase induction motor drives – a technology status review, *IET Electric Power Appl.*, 1, (4), pp. 489–516, 2007.
- [10] I. Subotic, E. Levi, M. Jones, and D. Graovac, An integrated battery charger for EVs based on an asymmetrical six-phase machine, *IEEE Industrial Electronics Society Conf. IECON*, Vienna, Austria, pp. 7242–7247, 2013.
- [11] G. Pellegrino, E. Armando, and P. Guglielmi, An integral battery charger with power factor correction for electric scooter, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 3, pp. 751–759, Mar. 2010.

SUMMARY

ANALYSIS OF THE MAGNETOMOTIVE FORCE IN THE MULTIPHASE MACHINES WITHIN INTEGRATED BATTERY CHARGERS FOR THE ELECTRIC VEHICLES

In this paper we discuss magnetomotive force (MMF) in the multiphase machines during fast charging of batteries in electric vehicles (EV). Analytical considerations show that using an adequate topology of power converter and additional levels of freedom one can achieve a fast charging without creating any revolving magnetic field within the machine. They also show that this regime can be achieved by using only the elements of the traction system and without changing the configuration between charging and traction regimes. The simulation models have been developed for the relevant configurations of the stator asymmetrical winding in six-phase and nine-phase integrated electrical machines within the charging system of an EV. As the result, the time-space distribution of the magnetic field in charging mode is obtained. Based on the results, suggestions are given for the design of an integrated traction / charging system within electric vehicles.

Key words: *Multiphase machines, electrical vehicles, integrated chargers, fast battery charger*

Međulaboratorijska ispitivanja kod širokopojasnih merenja elektromagnetskih polja

BRANISLAV D. VULEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd

LJUBIŠA S. ČIČKARIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd

SAŠA D. MILIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd

MIRJANA M. MARČETA, W-line d.o.o., Laboratorija W-line, Beograd

Stručni rad

UDC: 537.8.08

DOI: 10.5937/tehnika1802239V

U radu su prikazani rezultati međulaboratorijskih ispitivanja kod širokopojasnih merenja jačine električnog polja visokih učestanosti, sa ciljem da se potvrdi tehnička kompetentnost laboratorija učesnica. Isti treba da posluži kao polazni okvir za buduća razmatranja i poboljšavanja metoda međulaboratorijskih ispitivanja u ostalim oblastima vezanim za ispitivanja nivoa nejonizujućih zračenja kojima su ljudi izloženi u svom okruženju.

Ključne reči: *izlaganje ljudi, nejonizujuća zračenja, jačina električnog polja, visoke učestanosti, međulaboratorijska ispitivanja*

1. UVOD

Zahvaljujući brzom razvoju novih tehnologija, mernih uređaja i njihovog povezivanja u merne sisteme, prvih petnaest godina XXI veka karakteriše pojava različitih pristupa merenjima u svim oblastima čovekovog bitisanja. Ovo posebno implicira potrebu za usaglašavanjem mernih metoda. Zbog toga se dužna pažnja poklanja standardizaciji i harmonizaciji mernih metoda.

Poseban podsticaj za razvoj mernih metoda, tehnika i standarda iz oblasti ispitivanja nivoa elektromagnetskih polja proizilazi iz njihovog potencijalno negativnog uticaja na ljudsko zdravlje. Ubrzani razvoj i sve šira primena bežične telekomunikacione tehnologije, bežičnog interneta, mobilne telefonije, televizije, bežičnog prenosa podataka, vojnih i industrijskih komunikacionih sistema pokreće razvoj mernih metoda, tehnika, i instrumenata. Postoji veliki broj naučnih radova, studija i standarda koji pokrivaju oblasti merenja elektromagnetnih polja celog opsega učestanosti, od ultra-niskih (mHz) do ultra-visokih (THz) [1 - 5].

Merenja koja se vrše u okviru ispitivanja nivoa elektromagnetskih polja (EMF) predstavljaju najmanje precizna merenja u fizici, posebno kada se posmatra okruženje sa većim brojem izvora. Samim tim, značaj standardizacije dobija na važnosti.

U okviru tehničkih zahteva, standarda SRPS ISO/IEC 17025:2006 [6], pod tačkom 5.9.1 apostrofira se da: „Laboratorija mora da poseduje procedure za upravljanje kvalitetom radi praćenja valjanosti obavljenih ispitivanja i etaloniranja“.

To praćenje treba da se planira, preispituje i obuhvati učešće u programima međulaboratorijskih ispitivanja (MLI) ili programima ispitivanja osposobljenosti (Proficiency Testing, PT), čiji se opšti zahtevi definišu u standardu SRPS ISO/IEC 17043:2011 [7]. Pri tome, odabrane metode provere treba da odgovaraju vrsti i obimu preduzetog posla.

Osnovni cilj MLI jeste potvrda tehničke kompetencije laboratorija učesnica pod kojom se, između ostalog, podrazumeva:

- Utvrđivanje i praćenje sposobnosti laboratorija za obavljanje određenih ispitivanja;
- Uočavanje problema u laboratorijama, kao i iniciranje aktivnosti za njihovo prevazilaženje;
- Utvrđivanje sposobnosti zaposlenih;
- Uspostavljanje efektivnosti i uporedivosti novih metoda ispitivanja i

Adresa autora: Branislav Vulević, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Beograd, Koste Glavinića 8a

e-mail: banevul@gmail.com

Rad primljen: 05.02.2018.

Rad prihvaćen: 13.03.2018.

- Stvaranje dodatnog poverenja kod korisnika usluga laboratorije.

Svrha ovog rada je da ukaže na značaj MLI uz predstavljanje jednog primera iz prakse, kojim se ilustruje sprovođenje MLI vezano za slučaj širokopoljnih merenja jačine električnog polja visokih učestanosti u skladu sa standardom CENELEC EN 50492 [8], odnosno odgovarajući domaći standardi SRPS EN 50492:2010 i SRPS EN 50492:2010/ A1:2014 [9].

2. LABORATORIJE UČESNICE, MERNA OPREMA I AMBIJENTALNI USLOVI

U okviru MLI opisanog u ovom radu, izvršeno je poređenje rezultata merenja jačine električnog polja visokih učestanosti u zatvorenom prostoru (sala za sastanke). Učesnice navedenog MLI bile su dve akreditovane laboratorije – Laboratorija 1 (skraćenica: WL) i Laboratorija 2 (skraćenica: INT).

Laboratorije učesnice MLI raspolagale su opremom za izotropno, širokopoljno merenje jačine električnog polja visokih učestanosti, koje zadovoljavaju zahteve standarda CENELEC EN 50492 [8]. Oznake i nazivi merne opreme prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Osnovni podaci o mernoj opremi

Laboratorija	Merna oprema opseg frekvencija	Serijski broj
WL	WaveControl, SMP + Sonda WPF8 100 kHz – 8 GHz	11SM0117 (uređaj)
		12WP040171 (sonda)
INT	NARDA, NBM 550 + Sonda EF 0691 100 kHz – 6 GHz	H-0300 (uređaj)
		H-0477 (sonda)

Režim rada oba merna instrumenta podešen je tako da je jednim setom merenja obuhvaćeno kontinualno merenje u trajanju od 2 minuta pri čemu se memorišu minimalna, srednja i maksimalna efektivna (RMS) vrednost jačine električnog polja visokih frekvencija na svake 3 sekunde.

Uslovi okoline tokom merenja:

- temperatura okoline: $24^{\circ}\text{C} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$;
- vlažnost vazduha: $23\% \pm 3,5\%$.

Merenja temperature i vlažnosti vazduha vršena su termohigrometrom TROTEC BC15 Multi Measure (serijski broj 09121314).

3. IZVOR EMF, LOKACIJA I SCENARIO TOKOM MERENJA

Kao referentni izvor elektromagnetskih polja visokih učestanosti korišćen je signal-generator Keysight Technologies N9310A i direkciona antenna 489-DB koji su povezani kablom Keysight Technologies N6314A,

čiji su osnovni podaci prikazani u tabeli 2. Pozicije opreme tokom merenja prikazane su na slici 1.

Tabela 2. Osnovni podaci referentnog izvora EMF

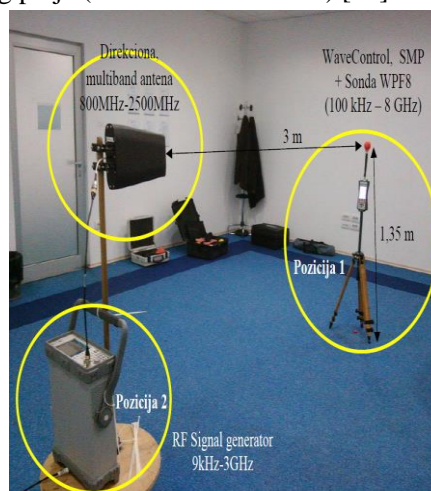
Element izvora polja	Naziv (Serijski broj)
RF Signal generator 9kHz-3GHz	Keysight Technologies N9310A (CN0116A944)
Direkciona, multiband antenna 489-DB 800MHz-2500MHz	Keysight Technologies N9910X-820 (N/A)



Slika 1 – Pozicije opreme tokom merenja

Sva merenja vršena su u jednoj tački (pozicija 1) u zatvorenoj prostoriji na visini 1,35 m od poda, za unapred zadate ulazne snage i frekvencije generisanog signala (nemodulisani CW signal).

„Pozicija 2“ predstavlja položaj referentnog izvora EMF tokom merenja a određena je prethodnim proračunom sa ciljem da se „Pozicija 1“ nalazi u zoni dalekog polja (Fraunhofer-ova zona) [10].



Slika 2 – Položaj izvora EMF i merne opreme WL

Na slikama 2 i 3, prikazani su položaji opreme laboratorija učesnica tokom MLI.



Slika 3 – Položaj izvora EMF i merne opreme INT

Pojedinačna ispitivanja (za svaku laboratoriju) podeljena su na dva dela:

1. Linearnost:

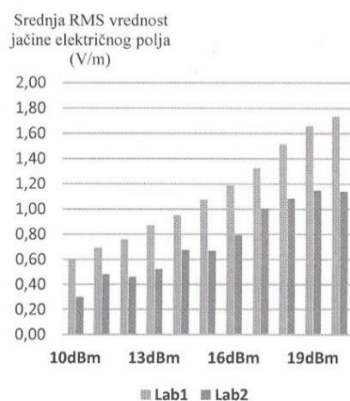
- Referentna učestanost: 1500 MHz;
- Promena izlazne snage generatora od 10 dBm do 20 dBm, sa korakom od 1 dBm (ukupno: 11 setova rezultata);
- 2. Frekvencijski odziv:
- Izlazna snaga signal-generatora: 20 dBm;
- Promena frekvencije (800, 1.000, 1.200, 1.500, 1.700, 2.000 i 2.500 MHz) – ukupno: 7 setova rezultata.

Kao što je ranije navedeno, kod podešavanja režima rada mernih uređaja, jedan set merenja obuhvata kontinualno merenje u trajanju od 2 minuta pri čemu se na svake 3 sekunde memorišu minimalna, srednja i maksimalna (RMS) vrednost jačine električnog polja visokih frekvencija. Dakle, u jednom setu merenja dobijemo 3 x 40 vrednosti.

4. PRIKAZ REZULTATA MERENJA

Rezultati merenja su klasifikovani prema sledećim metrološkim karakteristikama:

- Linearnost: U tabeli 3 i na slici 4 dat je uporedni prikaz izmerenih srednjih RMS vrednosti jačine električnog polja za obe laboratorije za učestanost 1500 MHz i promenu izlazne snage signal-generatora od 10 dBm do 20 dBm, sa korakom 1 dBm.



Slika 4 - Linearnost pri frekvenciji od 1500 MHz

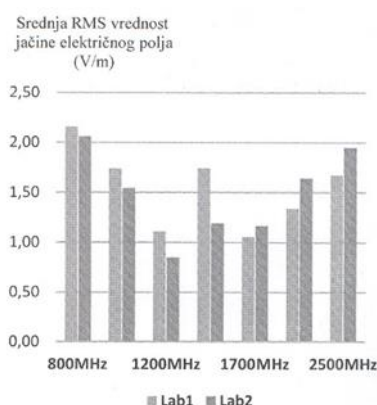
Tabela 3. Prikaz rezultata - linearnost

P (dBm)	E _{lab} [V/m]	
	Lab1 (E _{SRI})	Lab2 (E _{SRII})
10	0.60	0.30
11	0.69	0.48
12	0.76	0.46
13	0.87	0.52
14	0.95	0.67
15	1.07	0.67
16	1.19	0.79
17	1.33	1.01
18	1.51	1.08
19	1.66	1.15
20	1.74	1.14

Frekvencijski odziv: U tabeli 4 i na slici 5 dat je uporedni prikaz izmerenih srednjih RMS vrednosti jačine električnog polja za obe laboratorije za izlaznu snagu signal-generatora 20 dBm (100 mW) i promenu frekvencije signala.

Tabela 4. Prikaz rezultata - frekvencijski odziv

f (MHz)	E _{lab} [V/m]	
	Lab1 (E _{SRI})	Lab2 (E _{SRII})
800	2.15	2.06
1000	1.74	1.54
1200	1.11	0.85
1500	1.74	1.19
1700	1.05	1.16
2000	1.34	1.64
2500	1.67	1.95



Slika 5 – Frekvencijski odziv za izlaznu snagu signal-generatora 20 dBm (100 mW)

5. MERNA NESIGURNOST

Dva bitna faktora koja doprinose proširenoj mernoj nesigurnosti kod određivanja jačine električnog polja visokih učestanosti su:

- Etaloniranje uređaja i sonde - podaci dobijeni od proizvođača merne opreme i uverenje o etaloniranju od nezavisne akreditacione laboratorije;
- Ponovljivost merenja (isti uslovi merenja – bliskost slaganja između rezultata uzastopnih merenja iste merene veličine).

Jedan tipičan primer koji daje smernice i ilustruje način (kriterijum) određivanja budžeta merne nesigurnosti za širokopojasnu mernu opremu dat je u radu navedenom u literaturi [11]. Prema navedenom kriterijumu, relativne proširene merne nesigurnosti kod laboratorija učesnica iznosile su za Laboratoriju 1 i Laboratoriju 2, 41,2% i 44,7% respektivno.

U tabelama 5 i 6 prikazane su vrednosti za proširenu nesigurnost rezultata laboratorija učesnica. U pitanju su vrednosti prikazane u tabeli 3 i tabeli 4, pomnoženi sa koeficijentima 0,412 i 0,447 tj. odgovarajućim vrednostima relativne proširene merne nesigurnosti laboratorija učesnica.

Tabela 5. Proširena nesigurnost rezultata iz tabele 3

P (dBm)	U_{lab} [V/m]		
	Lab 1 (U_I)	Lab 2 (U_{II})	U_{ref} [V/m]
10	0.25	0.13	0.19
11	0.29	0.21	0.25
12	0.31	0.21	0.26
13	0.36	0.23	0.30
14	0.39	0.30	0.35
15	0.44	0.30	0.37
16	0.49	0.35	0.42
17	0.55	0.45	0.50
18	0.62	0.48	0.55
19	0.68	0.50	0.59
20	0.72	0.51	0.61

Tabela 6. Proširena nesigurnost rezultata iz tabele 4

f (MHz)	U_{lab} [V/m]		
	Lab 1 (U_I)	Lab 2 (U_{II})	U_{ref} [V/m]
800	0.89	0.92	0.90
1000	0.72	0.69	0.70
1200	0.46	0.38	0.42
1500	0.72	0.53	0.62
1700	0.43	0.52	0.48
2000	0.55	0.73	0.64
2500	0.69	0.87	0.78

6. OCENA DOBIJENIH REZULTATA

Prema standardu ISO/IEC 17043 [7] i sličnom primeru navedenom u literaturi [12] koji je vezan za MLI dve akreditovane laboratorije, za ocenjivanje performansi laboratorija koristi se E_n broj koji se izračunava na osnovu sledećeg izraza:

$$E_n = \frac{E_{SR_i} - E_{ref}}{\sqrt{U_i^2 + U_{ref}^2}} \quad (1)$$

S obzirom na to da tačna vrednost jačine polja nije i ne može biti poznata, postavlja se pitanje koje bi vrednosti E_{ref} i U_{ref} trebalo usvojiti. Imajući u vidu činjenicu da su obe laboratorije vršile merenja „praktično istovremeno“ i na istom mernom mestu, opravdano je da se za dodeljenu vrednost usvoji „srednja vrednost“ rezultata merenja obe laboratorije:

$$E_{ref} = \frac{E_{SRI} + E_{SRII}}{2} \quad (2)$$

Pri čemu su:

E_{SR_i} - izračunata srednja vrednost jačine električnog polja laboratorije i ;

E_{ref} - dodeljena vrednost jačine električnog polja (usvojena tačna vrednost);

U_i - proširena merna nesigurnost rezultata laboratorije i (tabele 5 i tabele 6);

U_{ref} - proširena merna nesigurnost dodeljene vrednosti (tabele 5 i tabele 6).

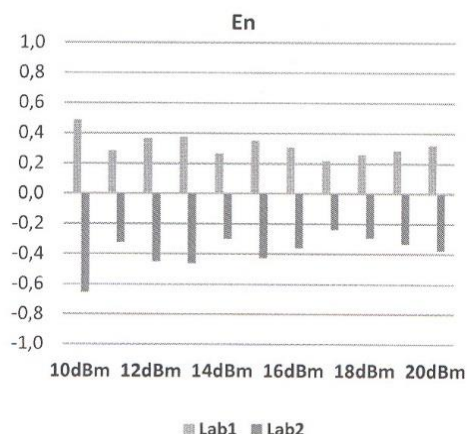
Za proširenu nesigurnost rezultata (iz tabele 5 i tabele 6) dodeljene vrednosti, usvojena je srednja vrednost proširenih mernih nesigurnosti obe laboratorije:

$$U_{ref} = \frac{U_I + U_{II}}{2} \quad (3)$$

Kriterijumi za ocenjivanje su sledeći:

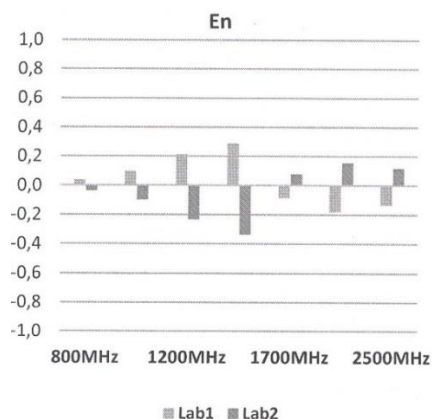
$|E_n| < 1$ - zadovoljavajuće performanse

$|E_n| \geq 1$ - nezadovoljavajuće performanse i znak da se preduzmu određene korektivne mere.



Slika 6 – Grafički prikaz E_n brojeva - linearnost

Na slikama 6 i 7 grafički su prikazani odgovarajući E_n brojevi dobijeni tokom ispitivanja linearnosti i frekvencijskog opsega, respektivno.



Slika 7 – Grafički prikaz E_n brojeva - frekvencijski odziv

6. ZAKLJUČAK

Cilj svakog MLI je, pre svega, da se na osnovu analize dobijenih rezultata prema zadatim kriterijumima utvrdi prihvatljivost rezultata i tako potvrdi tehnička kompetentnost laboratorija učesnica.

Na osnovu dobijenih rezultata u toku MLI, lako se dolazi do zaključka da su vrednosti E_n broja manje od 1 za obe laboratorije. Ovo nedvosmisleno ukazuje na činjenicu da su svi dobijeni rezultati korektni. To istovremeno znači da su tokom sprovođenja MLI postignuti zadovoljavajući rezultati u odnosu na postavljena pravila iz dogovorenog protokola. Obe laboratorije ovu analizu mogu koristiti kao polaznu osnovu za svoje buduće interne analize.

7. ZAHVALNICA

Ovaj rad urađen je u okviru projekta TR 33024 koji je finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks – SCENIHR, Health Effects of Exposure to EMF, The SCENIHR 9th plenary meeting on 27 January 2015.
- [2] Moradi M, Naghidi N, Hemmati H, Asadi-Samani M, Bahmani M. Effect of Ultra High Frequency Mobile Phone Radiation on Human Health, *Electron Physician*, Vol. 8 No. 5, p.p. 2452-2457, 2016.

- [3] Fayed I, Bedda M, Electromagnetic Radiation and its effects on human beings: Survey and Environmental Recommendations, 15th Scientific Symposium for Hajj, Umrah and Madinah visit - Scientific Portal for 1436AH, 2015.
- [4] Telecom Regulatory Authority of India, Information paper on Effects of Electromagnetic Field Radiation from Mobil Towers and Handsets. Dostupno na: http://www.trai.gov.in/sites/default/files/EMF_Information_Paper_30.07.2014.pdf
- [5] Hanna SA, Motai Y, Varhue W, Titcomb S. Measurement evaluations of static and low frequency magnetic fields in the near field region, *Measurement*, Vol. 44, p.p. 1412- 1421, 2011.
- [6] SRPS ISO/IEC 17025:2006 "Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje", Institut za standardizaciju Srbije.
- [7] SRPS ISO/IEC 17043:2011 "Ocenjivanje usaglašenosti – Opšti zahtevi za ispitivanje osposobljenosti", Institut za standardizaciju Srbije.
- [8] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Basic standard for in-situ measurement of electromagnetic fields strength related to human exposure in vicinity of base stations. *CENELEC EN 50492*, 2008.
- [9] Institut za standardizaciju Srbije, SRPS EN 50492:2010, Službeni glasnik 31/10, Beograd, 2014.
- [10] Sambo Y. A, Heliot F, Imran M. A, A Survey and Tutorial of Electromagnetic Radiation and Reduction in Mobile Communication Systems, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 17, No. 2, p.p. 790 – 802, 2014.
- [11] Vulević B, Određivanje jačine električnog polja visokih učestanosti primenom širokopojasnih merenja, *Tehnika*, Vol.72, No.5, p.p. 701–706, 2017.
- [12] Kovačević M. A, Munić N, Nikolić V, Međulaboratorijsko poređenje merenja napona smetnji na mrežnim priključcima, *Zbornik radova ETRAN 2017, Sesija MLI. Metrologija i merne metode*, Kladovo, Srbija, rad ML1.1, 5-8. Jun 2017.

SUMMARY

INTERLABORATORY TESTING FOR BROADBAND ELECTROMAGNETIC FIELD MEASUREMENTS

This paper presents the results of interlaboratory testing for broadband measurement of the high-frequency electric field strength, with the aim of confirming the technical competence of participating laboratories. The purpose of this paper is to provide the initial measuring framework for future consideration and improvement of interlaboratory testing methods. The presented metrological framework can have its practical application in other areas related to the testing of non-ionizing radiation levels that people are exposed to in environment.

Key words: *human exposure, non-ionizing radiation, electric field strength, high frequency, interlaboratory testing*

Sistemi emitovanja i standardi satelitske televizijske transmisije u Evropi

BRANIMIR S. JAKŠIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

VLADIMIR D. MAKSIMOVIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

JELENA M. TODOROVIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

MILE M. PETROVIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

PETAR LJ. SPALEVIĆ, Univerzitet u Prištini,

Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica

Pregledni rad

UDC: 621.397.2:629.783(4)

DOI: 10.5937/tehnika1806827J

U ovom radu su razmatrane karakteristike satelitske televizijske transmisije u regionu Evrope. Dat je pregled razvoja satelitske televizije kroz karakteristike: sistemi emitovanja - analogni i digitalni (SDTV, HDTV, UHD TV), frekvencijski opseg (C, Ku, Ka), standardi za emitovanje (DVB-S, DVB-S2), dostupnost TV servisa u formi Free-to-air (FTA) i PAY TV, kao i dostupnost TV servisa prema satelitskim pozicijama. Takođe, dati su podaci koji se odnose na pružaoce satelitske TV transmisije. Prikupljeni podaci su predstavljeni tabelarno i grafički za period od 1996. do 2018. godine. Na osnovu prikazanih rezultata izvršena je analiza razvoja satelitske televizijske transmisije na osnovu karakteristika emitovanja.

Ključne reči: satelit, C opseg, Ku opseg, DVB-S, SDTV, HDTV, UHD TV, FTA, PAY

1. UVOD

Distribucija televizijskog signala sa pratećim servisima do krajnjih korisnika se isporučuje kroz različite platforme: satelitska, zemaljska, kablovska i IPTV (Internet Protocol Television). Za razliku od drugih oblika distribucije TV signala, korišćenje satelita ima značajne prednosti za emitovanje i distribuciju TV programa, koje se ogledaju u velikoj zoni pokrivanja teritorije, nepotrebnoj izgradnji mreže predajnika i repetitora, mogućnosti prenosa većeg broja kanala istim satelitom, međusobnom povezivanju udaljenih TV studija, mogućnošću međunarodnih prenosa i razmene programa [1]. Zbog mnogo većeg tehničkog kapaciteta u odnosu na druge oblike transmisija, satelitska transmisija bila je idealna za razvoj HDTV (High Definition Television). Nedostaci satelitskog TV prenosa se mogu ogledati u slabljenju TV signala usled

solarnih geomagnetskih bura i usled ekstremno loših vremenskih prilika.

Na jednoj poziciji može se nalaziti jedan satelit ili više njih koji su grupisani na tom mestu. Pozicije satelita u geostacionarnoj orbiti označavaju se stepenima ($^{\circ}$) u odnosu na grinički meridijan (0°). Sateliti istočno pozicionirani od Griniča, pored broja stepeni, imaju oznaku E (east), a zapadno pozicionirani oznaku W (west) [2, 3].

Tabela 1. Frekvencijski opsezi za satelitsku TV

Band	Frekvencijski opseg (GHz)	
	Downlink	Uplink
C	3.70 - 4.20	5.925 - 6.425
Ku	10.70 - 12.75	14.0 - 14.5
Ka	17.7 - 21.2	27.5 - 31.0

TV signali prenose se do zemaljske satelitske stanice odakle se distribuiraju uplink frekvencijama prema satelitu. Signali koji dospeju do satelita idu u upravljačku jedinicu transpondera gde se obrađuju, pojačavaju, pretvaraju u opseg downlink frekvencija.

Adresa autora: Branimir Jakšić, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica, Kneza Miloša 7

e-mail: branimir.jaksic@pr.ac.rs

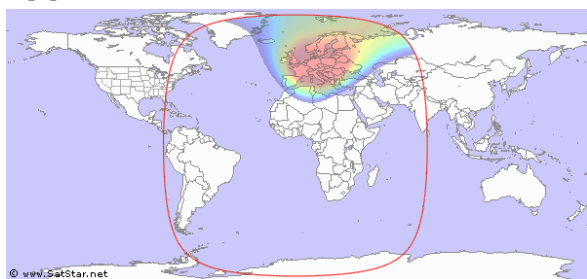
Rad primljen: 21.09.2018.

Rad prihvaćen: 06.12.2018.

Nakon toga se takvi signali usmeravaju antenom prema površini Zemlje gde se onda korišćenjem parabolične antene ostvaruje njihov prijem [4, 5]. Frekvencije koje se koriste u satelitskoj TV transmisiji prikazane su u tabeli 1.

Najzastupljeniji opseg za emitovanje satelitskih TV programa je Ku opseg. Njegova karakteristika je da daje vrlo jak signal ali na relativno maloj teritoriji. Za razliku od Ku opsega, C opseg pokriva znatno veći deo površine, ali sa znatno slabijim signalom, tako da je za prijem signala iz C opsega potrebna antena od minimalno 3 metra u prečniku. C opseg je kao preteča Ku opsegu zastupljen na svim kontinentima, a najmanje ga ima u Evropi [6]. Osim ova dva opsega, za distribuciju TV programa koristi se i Ka opseg koji je zastupljen u USA za neke DTH (Direct-To-Home) usluge [7]. DTH tehnologija se odnosi na proces emitovanja satelitskog TV signala i drugih servisa koji su namenjeni isključivo za kućni prijem sa personalnim antenama.

Predajna antena na satelitu ne emituje podjednako signal u svim pravcima, već je usmerena na užu oblast što predstavlja tzv. servisnu zonu (footprint) određenog transpondera na komunikacionom satelitu. Na slici 1 dat je footprint satelita koji pokriva region Evrope [8]. Region Australija, Azija i Rusija pokrivaju sateliti na satelitskim pozicijama od 180° E do 73° E, regione Evropa i Afrika od 73° E do 61° W i regione Severna Amerika i Južna Amerika od 61° W do 160° W [9].



Slika 1 - Footprint satelita u Ku opsegu za region Evropu

U ovom radu razmatrana je satelitska TV transmisija za region Evrope koji uključuje i područje Severne Afrike i Bliskog istoka. Cilj rada je da se kroz broj TV servisa predstavi kakav je bio trend razvoja satelitske televizije u Evropi u pogledu sistema emitovanja (analogni i digitalni), frekvencijskog opsega (C, Ku, Ka), standarda za emitovanje (DVB-S, DVB-S2), dostupnosti TV servisa u formi slobodne i plaćene TV, kao i dostupnosti TV servisa prema satelitskim pozicijama.

2. METODOLOGIJA

Podaci predstavljeni u ovom radu su prikupljeni sa web stranica: Lyngsat [9], N2YO [17], SatBeams [18]

i TBS Satellite [19] koji se svakodnevno ažuriraju podacima o sadržaju satelitskih transpondera. Pružaju podatke o TV i radio kanalima, tipu emitovanja (analogni i digitalni), DVB-S standardima, tipu kodiranja, kompresionim standardima, kao i o neophodnim parametrima za prijem TV signala. Preko navedenih sajtova moguće prikupiti podatke za svaki satelit na različitoj orbitalnoj poziciji.

Kako bi se prikupili podaci za prethodne periode korišćen je servis Wayback Machine (<https://web.archive.org/>) preko kojeg je moguće pristupiti sadržaju web stranice u periodu od 1996. godine do danas. Podaci su prikupljeni za svaku godinu od 1996. Podaci se odnose na 31. decembar za svaku godinu, osim za 2018. gde se stanje odnosi na 1. septembar.

Podaci su razvrstani u nekoliko kategorija:

- prema sistemu emitovanja (analogni, digitalni SDTV, HDTV i UHD TV);
- prema frekvencijskom opsegu emitovanja (C opseg, Ku opseg);
- prema digitalnom standardu emitovanja (DVB-S i DVB-S2);
- prema tipu emitovanja (slobodno ili kodirano);
- prema orbitalnoj poziciji satelita sa kojeg se emituje TV signal;
- prema pripadnosti satelitskoj kompaniji za emitovanje.

3. SISTEMI EMITOVANJA I REZOLUCIJA

Prvi satelitski televizijski prenos je bio u analognom formatu. Osnovna karakteristika analogne distribucije je da je jedan TV kanal koristio jednu frekvenciju, odnosno jedan satelitski transponder. Ovakav način distribucije je imao za posledicu emitovanje manjeg broja TV kanala u odnosu na digitalni prenos [10]. Za razliku od analognog, digitalni prenos signala omogućava veći broj programa uz digitalni kvalitet slike i tona. Dolaskom digitalne tehnologije, broj slobodnih frekvencija na jednom transponderu se znatno povećao, a sa tim i broj televizijskih i radio kanala, kao i ostalih vidova komunikacije, znatno je povećan [11]. Ovo je za posledicu imalo direktan uticaj na razvoj DTH usluga [12].

Razvojem digitalnih telekomunikacija omogućeno je pored standardne digitalne TV (SDTV - Standard Definition Television) korišćenje i televizije visoke rezolucije HDTV. HDTV je tehnologija koja nudi kvalitet slike i zvuka značajno višeg u odnosu na tradicionalne tehnologije prikaza slike i zvuka [13]. Poslednjih godina pored HDTV javlja se prva televizija Ultra visoke definicije (UHD TV - Ultra High Definition Television) koja uključuje 4K UHD TV i 8K UHD TV sa dva puta većim, odnosno četiri puta većim brojem piksela u odnosu na HDTV [14].

Zbog zahteva velikog protoka za prenos televizijskog signala u svojoj nekomprimovanoj formi razvijeno je nekoliko algoritama za kompresiju video signala: MPEG-2 (Moving Picture Experts Group), MPEG-4/H.264 [15] za HDTV i HEVC (High Efficiency

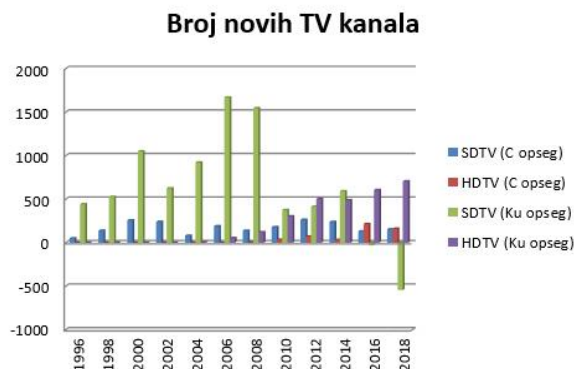
Video Coding)/H.265 [16] za UHDTV. U Tabeli 2 dat je pregled broja TV kanala u Evropi za različite sisteme emitovanja (analogni, digitalni u SDTV, HDTV i UHDTV formatu) kao u različitim opsezima (C, Ku i Ka).

Tabela 2. Broj TV kanala u Evropi

Standard	1996.	1998.	2000.	2002.	2004.	2006.	2008.	2010.	2012.	2014.	2016.	2018.
Analogni (C)	85	79	70	42	34	20	2	0	0	0	0	0
Analogni (Ku)	241	221	203	111	83	57	48	40	0	0	0	0
SDTV (C)	52	191	449	690	772	963	1102	1282	1547	1787	1920	2075
SDTV (Ku)	443	970	2021	2646	3569	5239	6785	7161	7575	8167	8138	7598
SDTV (Ka)	0	0	0	0	0	0	0	0	4	38	38	47
HDTV (C)	0	0	0	0	0	0	3	38	111	144	360	522
HDTV (Ku)	0	0	0	0	6	60	182	487	957	1468	2086	2794
HDTV (Ka)	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	2	2
UHDTV (C)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4
UHDTV (Ku)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	35	45
UHDTV (Ka)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Prvi satelitski digitalni TV servisi su započeli sa emitovanjem sredinom devedesetih godina XX veka. Pre toga satelitski TV servisi su isključivo bili analogni. Satelitska TV transmisija je najpre bila namenjena razmeni TV sadržaja između TV kuća sa različitim kontinenta da bi tokom 1980-ih lansiranjem satelita opremljenih transponderima u Ku opsegu započela komercijalna upotreba satelita za distribuciju TV kanala do krajnjih korisnika. Svoj vrhunac analogna satelitska TV je doživela sredinom devedesetih godina prošlog veka, od kada broj analognih TV kanala opada da bi nakon 2010. godine analogno TV emitovanje bili potpuno obustavljeno.

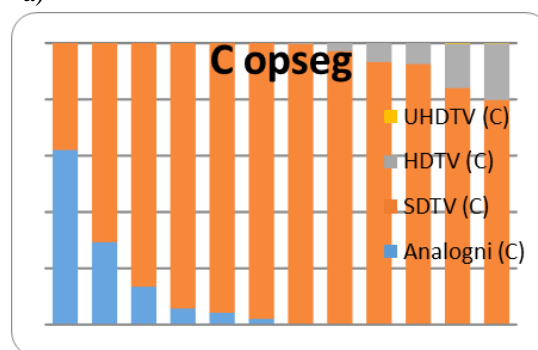
Broj digitalnih servisa je u neprikidnom porastu, najpre, u SDTV formatu, a zatim u HDTV formatu. Od 2014. godine putem satelita su započeli sa emitovanjem i prvi UHDTV kanali. Poslednjih godina je primetna stagnacija SDTV servisa a znatni porast HDTV servisa. Najveći broj TV kanala se emituje u Ku opsegu dok je C i Ka opseg manje zastupljen.



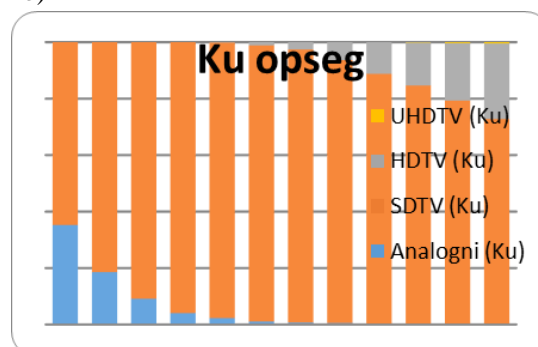
Slika 2 - Broj novih kanala u C i Ku opsegu

Na slici 2 dat je grafik promene broja novih TV kanala u C i Ku opsegu. Broj novih SDTV kanala poslednjih godina se smanjuje, da bi tokom 2018. njihov broj bio znatno umanjen.

a)



b)



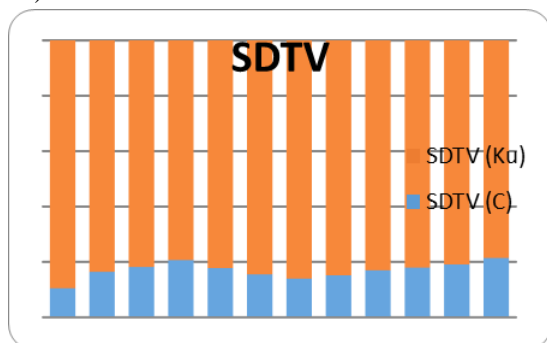
Slika 3 - Udeo analognih i digitalnih SDTV, HDTV i UHDTV kanala u: a) C opsegu i b) Ku opsegu

Na slici 3 dat je udeo u % analognih i digitalnih SDTV, HDTV i u UHDTV kanala u C opsegu i Ku opsegu. Najveći udeo imaju SDTV kanali i u C opsegu

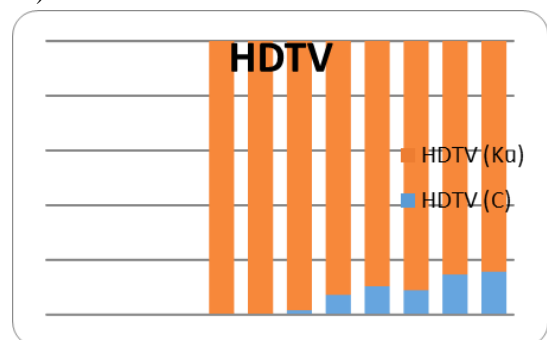
i Ku opsegu. Analogni TV kanali su znatno bili zastupljeniji u C opsegu u odnosu na Ku opseg. HDTV kanali su više zastupljeniji u Ku opsegu. Iz datih podataka se može videti da se zastupljenost SDTV kanala smanjuje u oba opsega i da je povećanje HDTV kanala iz godine u godinu veće.

Na slici 4 dat je udeo u % TV kanala iz C opsega, Ku opsega i Ka opsega u odnosu na ukupan broj SDTV i HDTV kanala. Najviše deo SDTV kanala se emituje u Ku opsegu (više od 80%). Emitovanje HDTV kanala je, takođe, najviše zastupljeno u Ku opsegu (blizu 90%).

a)



b)



Slika 4 - Udeo TV kanala iz C i Ku opsega u odnosu na ukupan broj: a) SDTV i b) HDTV kanala

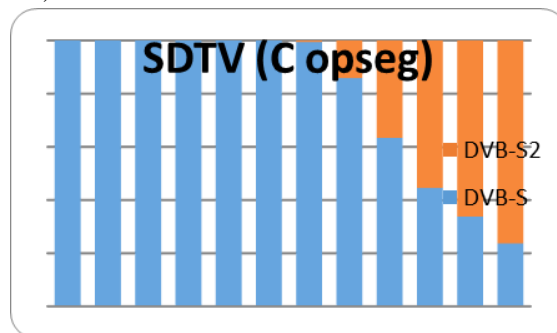
4. STANDARDI ZA EMITOVANJE

U analognoj transmisiji je bilo dostupno nekoliko standarda za emitovanje TV kao što su PAL, SECAM i NTSC [6]. DVB-S (Digital Video Broadcasting – Satellite) je najstariji DVB standard koji je predložen od strane DVB Projekta [20]. Razvijen je tokom 1993. godine. Druga generacija ovog standarda DVB-S2, u poređenju sa DVB-S, donosi oko 30% bolje performanse što u kombinaciji sa MPEG-4 (H.264) kompresijom pruža mogućnost da se HDTV program emituje sa istim protokom koji je pre bio potreban za SDTV [21, 22].

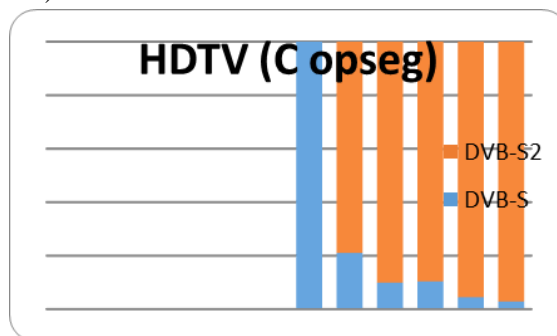
Na slici 5 i slici 6 prikazan je udeo digitalnih standarda emitovanja za SDTV i HDTV u C opsegu i Ku opsegu, respektivno. Za emitovanje SDTV kanala u C i Ku opsegu je bio najzastupljeniji DVB-S standard, da

bi vremenom primat preuzeo DVB-S2 standard. Tokom 2018. godine se blizu 80% SDTV kanala u C opsegu emituje u DVB-S2 standardu, dok u Ku opsegu više od 50%. Za emitovanje HDTV kanala koristi se DVB-S2 standard (više od 95%).

a)

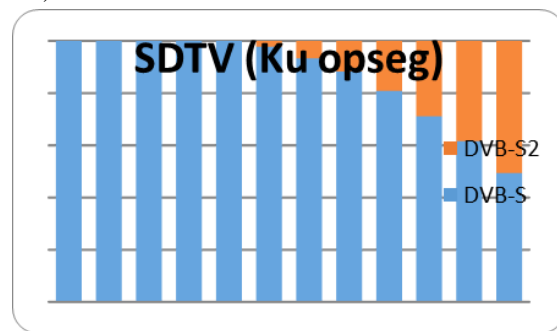


b)

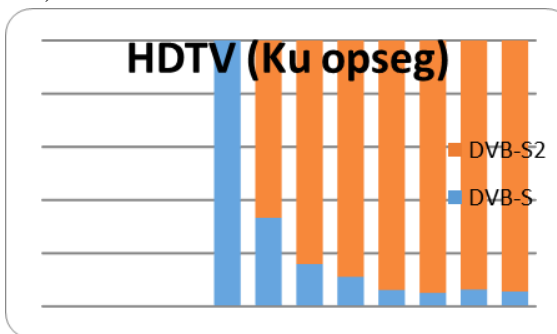


Slika 5 - Udeo digitalnih standarda emitovanja u C opsegu za: a) SDTV i b) HDTV

a)



b)



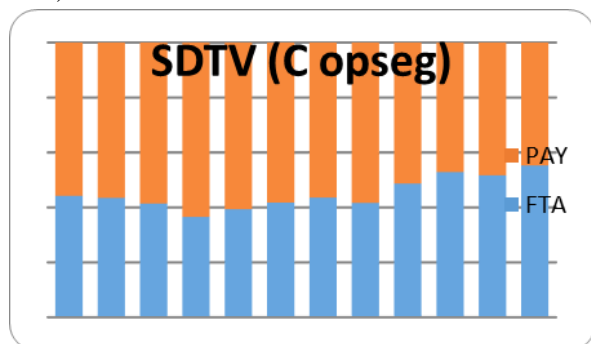
Slika 6 - Udeo digitalnih standarda emitovanja u Ku opsegu za: a) SDTV i b) HDTV

5. SLOBODNA I PLAĆENA TV

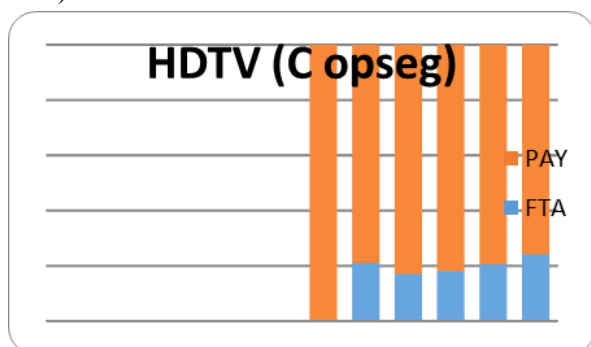
TV programi se mogu svrstati u grupu onih koji se mogu slobodno gledati bez plaćanja pretplate - FTA (Free-to-Air) i na grupu kodiranih koji se mogu pratiti samo preko sistema sa dekoderom, što podrazumeva plaćanje - PAY TV. Plaćanje pretplate se realizuje posredstvom kupovine dekoder kartice koja se ubacuje u dekoder.

Na slici 7 i slici 8 prikazan je udeo FTA TV i PAY TV za SDTV i HDTV u C opsegu i Ku opsegu, respektivno. Sa datih slika se može videti da je u C opsegu veća zastupljenost FTA SDTV (60%) dok u Ku opsegu FTA SDTV kanala je oko 40%. Većina HDTV kanala i u C opsegu i u Ku opsegu se emituje u formi PAY TV. Procenat FTA HDTV kanala je oko 20%.

a)

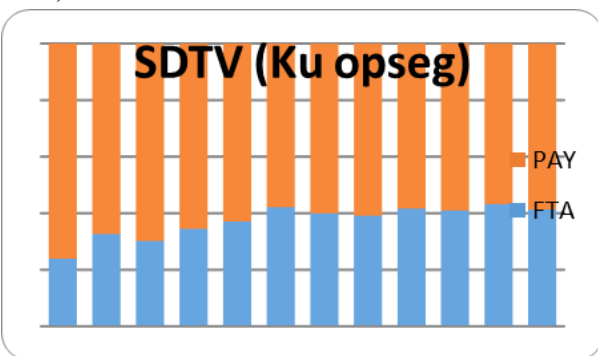


b)

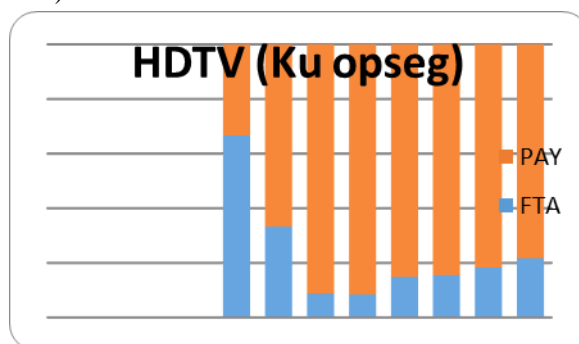


Slika 7 - Udeo FTA TV i PAY TV u C opsegu za: a) SDTV i b) HDTV

a)



b)



Slika 8 - Udeo FTA TV i PAY TV u Ku opsegu za: a) SDTV i b) HDTV

6. SATELITSKA TV TRANSMISIJA PREMA SATELITSKIM POZICIJAMA

U tabeli 3 dat je pregled broja HDTV kanala, a u tabeli 4 broj SDTV kanala u Ku opsegu prema satelitskim pozicijama, respektivno.

Tabela 3. Broj HDTV kanala u Ku opsegu

Pozicija	2006.	2008.	2010.	2012.	2014.	2016.	2018.
70.5° E	0	0	0	0	0	0	1
62° E	0	0	0	0	2	3	5
56° E	0	0	0	0	30	28	30
53° E	0	0	0	0	0	3	7
52.5° E	0	0	0	3	3	3	6
52° E	0	0	0	0	0	8	14
46° E	0	0	0	0	7	1	3
45° E	1	1	0	8	14	19	16
42° E	0	4	13	35	75	129	141
40° E	0	0	0	0	0	2	0
39° E	0	3	11	20	27	26	31
36° E	1	8	9	42	66	81	93
33° E	0	0	1	0	0	0	11
31.5° E	0	0	1	10	44	46	52
30.5° E	0	0	2	3	0	3	6
28.2° E	13	32	53	80	106	126	134
26° E	0	3	18	41	88	125	191
23.5° E	6	8	46	61	62	83	100
21.5° E	0	0	0	0	0	1	7
19.2° E	10	23	68	159	240	342	421
16° E	0	7	7	27	52	98	154
13° E	10	26	76	149	172	242	350
10° E	0	0	1	3	3	6	9
9° E	0	16	40	51	84	96	156
7° E	4	7	14	33	45	52	100
5° E	3	6	17	57	52	64	98
3° E	0	0	2	0	3	2	5
0.8° W	7	14	36	48	93	147	208

Pozicija	2006.	2008.	2010.	2012.	2014.	2016.	2018.
4° W	0	7	17	22	40	58	51
5° W	3	3	6	14	30	96	123
7° W	0	0	24	47	87	111	149
8° W	0	0	0	0	4	39	60
12.5° W	0	1	1	5	1	1	3
15° W	0	0	2	3	5	5	4
20° W	0	0	0	0	0	1	2

Pozicija	2006.	2008.	2010.	2012.	2014.	2016.	2018.
22° W	0	0	0	0	1	1	1
24.5° W	0	0	0	0	1	4	0
27.5° W	0	0	3	4	5	6	6
30° W	1	13	19	32	26	28	46
Ukupno	59	182	487	957	1468	2086	2794

Tabela 4. Broj SDTV kanala u Ku opsegu

Pozicija	1996.	1998.	2000.	2002.	2004.	2006.	2008.	2010.	2012.	2014.	2016.	2018.
72° E	0	0	0	0	3	5	3	0	0	0	0	0
70.5° E	0	0	0	0	3	16	2	2	2	0	28	4
68.5° E	21	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66° E	0	0	0	0	0	0	0	1	3	2	1	3
62° E	4	0	2	9	18	25	28	26	41	92	80	87
60° E	0	0	5	0	0	0	0	0	0	7	14	13
57° E	18	31	0	4	4	4	3	5	4	8	3	1
56° E	0	0	0	0	0	0	0	0	8	32	57	64
53° E	0	0	0	7	14	26	36	40	52	43	45	51
52.5° E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	83	111
52° E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
48° E	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46° E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	20	23
45° E	0	0	0	1	4	3	6	81	97	100	120	143
42° E	0	11	23	62	89	178	251	273	351	448	391	295
40° E	0	0	0	4	1	25	29	23	0	0	39	2
39° E	0	0	0	0	42	147	170	214	188	206	214	228
36° E	0	0	49	61	65	141	238	273	348	385	452	497
33° E	0	0	0	0	1	20	50	10	24	10	13	14
31.5° E	0	8	15	0	0	3	36	47	158	193	201	225
30.5° E	0	0	4	11	21	34	26	27	31	0	20	19
28.2° E	18	40	270	400	476	587	660	604	594	634	590	577
26° E	14	15	112	122	149	283	355	388	326	325	426	341
23.5° E	10	65	22	39	78	179	218	225	156	148	129	159
21.5° E	0	1	11	1	2	7	15	20	15	30	22	30
19.2° E	138	257	336	383	463	613	753	662	693	634	513	495
16° E	8	8	22	34	84	188	281	333	337	507	541	566
13° E	115	225	470	554	727	925	1026	963	847	905	784	646
10° E	5	13	13	13	11	20	23	37	44	56	38	34
9° E	0	0	0	0	0	0	144	221	296	268	196	239
7° E	1	1	72	104	98	129	132	142	163	170	173	112
5° E	4	28	71	111	139	227	368	352	302	364	355	355
3° E	0	0	0	0	0	0	0	1	43	51	52	39
1.9° E	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73
0.8° W	7	65	115	122	257	327	425	606	462	578	523	526
3° W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5

Pozicija	1996.	1998.	2000.	2002.	2004.	2006.	2008.	2010.	2012.	2014.	2016.	2018.
4° W	1	16	96	135	177	256	329	343	393	425	343	180
5° W	1	6	9	9	14	23	75	111	138	164	144	112
7° W	0	0	93	181	240	364	466	639	880	774	791	646
8° W	0	0	17	26	39	90	107	44	38	71	320	303
11° W	0	0	3	8	6	3	0	8	25	23	19	16
12.5° W	0	0	1	0	22	36	67	64	45	44	55	55
14° W	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	1
15° W	0	0	18	31	49	42	51	49	40	38	19	13
18° W	19	15	4	6	1	3	7	5	0	0	0	0
20° W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	4	6
22° W	0	2	2	2	18	15	11	8	8	6	6	5
24.5° W	0	0	0	0	0	3	27	32	27	25	28	8
27.5° W	29	32	6	0	21	7	4	13	11	10	11	11
30° W	26	98	109	185	219	261	331	269	385	279	269	243
31.5° W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
37° W	4	21	9	10	2	0	0	0	0	0	0	0
43.1° W	0	7	9	10	11	21	24	0	0	0	0	0
45° W	0	5	5	1	1	3	3	0	0	0	0	0
Ukupno	443	970	2021	2646	3569	5239	6785	7161	7575	8167	8137	7597

Najveći broj SDTV kanala u Evropi se emituje sa pozicija 13° E, 7° W, 28.2° E, 16° E, 0.8° W, 36° E i 19.2° E, a HDTV kanali sa 19.2° E, 13° E, 0.8° W, 26° E i 9° E. Sa najpopularnijih pozicija 13° E (Eutelsat) i 19.2° E (SES Astra) evidentno je smanjene SDTV kanala, ali uz povećanje HDTV servisa.

7. SATELITSKI TV OPERATERI

U tabeli 5 dat je pregled satelitskih kompanija čiji signali pokrivaju područje Evrope, kao i broj SDTV i HDTV kanala koji se distribuiraju u 2018. godini. Najveći broj satelita je u vlasništvu konzorcijuma Eutelsat koji su raspoređeni na 14 pozicija, a zatim SES Astra koja koristi 8 satelitskih pozicija. Najveći broj SDTV kanala distribuira Eutelsat - 38%, a zatim SES Astra - 24%. Ostali značajni operateri su Telenor, RS-CC Kosmicheskiy Svyaz, Arabsat i Intelsat. Takođe, najveći broj HDTV kanala distribuira Eutelsat - 41%, a zatim SES Astra - 29%.

Tabela 5. Pregled satelitskih operatera

Operater	Satelitska pozicija	SD	HD
Eutelsat	70.5° E, 36° E, 33° E, 21.5° E, 16° E, 13° E, 10° E, 9° E, 7° E, 3° E, 5° W, 7° W, 8° W, 12.5° W	2856	1134
SES Astra	57° E, 31.5° E, 28.2° E, 23.5° E, 19.2° E, 5° E, 20° W, 22° W	1823	808
Telenor	0.8° W	494	206

Operater	Satelitska pozicija	SD	HD
RS-CC	56° E, 53° E, 40° E, 36° E, 11° W, 14° W	374	73
Arabsat	30.5° E, 26° E	360	197
Intelsat	66° E, 62° E, 60° E, 45° E, 0.8° W, 24.5° W, 27.5° W, 31.5° W	303	29
Turksat	42° E	295	141
Hispasat	30° W	243	46
Helas Sat	39° E	228	31
Nilesat	7° W	201	51
Spacecom	4° W	180	51
YahSat	52.5° E	111	6
Bulgaria Sat	1.9° E	73	0
AzerSpace	46° E	23	3
Türkmen Älem	52° E	15	14
Telstar	15° W	13	4
ABS	3° W	5	0

Satelitske kompanije iznajmljuju satelitske transpondere (frekvencije) TV kućama, DTH kompanijama ili drugim telekomunikacionim kompanijama. Prve, analogne frekvencije su bile izrazito skupe, tako da su samo najprofitabilnije TV kuće mogle iznajmljivati satelitske frekvencije. Uvođenje digitalnih tehnologija za emitovanje i naprednih kompresija video

protoka omogućena je znatna ušteda u kapacitetu satelitskog transpondera, čime su cene zakupa satelitskih frekvencija znatno smanjene što i potvrđuje neprekidan rast satelitskih TV usluga.

8. ZAKLJUČAK

Satelitska TV transmisija je jedan od najzastupljenijih oblika transmisije TV signala do krajnjih korisnika. Tokom 1990-ih godina analogna satelitska TV transmisija je zamenjena naprednim digitalnim sistemima emitovanja. U ovom radu prikazane su karakteristike satelitske digitalne TV sa aspekta broja TV servisa za različite opsege, standarde, formate emitovanja i satelitske pozicije za područje Evrope. Na osnovu izloženih rezultata može se zaključiti da satelitski TV operateri uvećavaju broj TV servisa. Može se primetiti da je u poslednje vreme primetan pad SDTV servisa i da se operateri okreću ka distribuciji servisa u HD formatu. DTH operateri uglavnom koriste Ku opseg za emitovanje TV servisa do krajnjih korisnika pa se broj SDTV i HDTV kanala najviše emituje baš u Ku opsegu. C opseg se uglavnom koristi za pokrivanje većih geografskih područja.

Najpopularnije satelitske pozicije za emitovanje TV kanala u Evropi su 13° E i 19.2° E, na kojima se nalaze sateliti konzorcijuma Eutelsat i SES Astra. Zbog svoje prednosti u iskorišćenju bitskog protoka, sve veći broj TV kanala se emituje korišćenjem DVB-S2 standarda. Tokom 2018. godine započeli su testovi i naprednijeg DVB-S2X standarda tako da se u narednom periodu može očekivati tendencija prelaska na najnoviji standard emitovanja pre svega HDTV kanala kao i još veće povećanje satelitskih TV operatera i broja usluga.

Od 2014. godine započelo je emitovanje TV kanala u UHD TV formatu. Zbog svoje specifičnosti, satelitska transmisija ima veliki potencijal u emitovanju TV kanala u UHD formatu, pre svega zbog većeg frekvencijskog opsega, a samim tim i bitskog protoka u odnosu na druge oblike transmisije. Zato se narednih godina očekuje ekspanzija TV kanala u UHD formatu.

LITERATURA

- [1] Maral G. and Bousquet M, *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology*, 5th Edition, John Wiley & Sons Ltd., New York, 2009.
- [2] Valenti, MC. *Modern Digital Satellite Television: How It Works*, 2011. [Citirano, 01.09.2018.] Dostupno na: <http://www.csee.wvu.edu/~mvalenti/documents/USNA2011.pdf>
- [3] Martin D. H, Anderson P. R. and Bartamian L, *Communication Satellites*, 5th Edition, The Aerospace Press, El Segundo, California, 2006.
- [4] Petrovic M, *Televizija*, Faculty of Technical Sciences, Kosovska Mitrovica, 2007.
- [5] Wittig M, Satellite switchboard in the sky: past, present and future, *Elektrotechnik & Informationst.*, Vol. 131, No. 6, pp. 130-149, 2014.
- [6] Wu Y, Hirakawa S, Reimers U. H. and Whitaker J, Overview of Digital Television Development Worldwide, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 94, pp. 8-21, 2006.
- [7] Dulac S. P, Satellite Direct-to-Home, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 94, No. 1, pp. 158-172, 2006.
- [8] TV Satellites. [Citirano, 01.09.2018.] Dostupno na: <http://www.satstar.net/satellites.html>
- [9] TV Satellites. [Citirano, 01.09.2018.] Dostupno na: <http://www.lyngsat.com/>
- [10] Alencar M. S, *Digital TV Systems*, Cambridge University Press, UK, 2009.
- [11] Haykin S. *Telecommunication Systems and Technology Vol.1: Analog and digital transmission of data*. [Citirano, 01.09.2018.] Dostupno na: <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C05/E6-108-06.pdf>
- [12] Jaksic B, Petrovic M, Spalevic P, Milosavljevic B, Smilic M, Direct-to-Home Television Services in Europe, *Proceedings of International Scientific Conference of IT and Business - Synthesis 2016*, Belgrade, Serbia, pp. 237-245, 2016.
- [13] Jaksic B, Petrovic M, Jaksic K, Milosevic I. and Marinkovic I, Development of satellite high-definition television in Europe, *Current Science*, Vol. 111, No. 6, 1037-1044, 2016.
- [14] Jaksic B, Petrovic M, Milosevic I, Ivkovic R. and Bjelovic S, UHD TV into Terrestrial and Satellite Systems, *Proceedings of International Scientific Conference UNITECH* Gabrovo, Bulgaria, 2015, pp. II112-II118, 2015.
- [15] Pechard S, Carnec M, Callet ML, and Barba D, From SD to HD television: effects of H.264 distortions versus display size on quality of experience, *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, Atlanta, USA, pp. 409-412, 2006.
- [16] Cox G, *An Introduction to Ultra HDTV and HEVC*, Report by ATEME, Paris, France, July 2013. [Citirano, 01.09.2018.] Dostupno na: (http://ateme.com/-IMG/pdf/2013_an_introduction_to_uhdtv_hevc.pdf)
- [17] TV Satellites. [Citirano, 01.09.2018.] Dostupno na: <http://www.n2yo.com/satellites/?c=34>
- [18] TV Satellites. [Citirano, 01.09.2018.] Dostupno na: <https://www.satbeams.com/satellites>

- [19] Geostationary telecommunication satellites. [Citirano, 01.09.2018.] Dostupno na: https://www.tbs-satellite.com/tse/online/mis_telecom_geo.html
- [20] European Telecommunications Standards Institute (ETSI), Digital Video Broadcasting (DVB): Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television, Sophia Antipolis, France, 2009.
- [21] Mignone V, Vazquez-Castro A, and Stockhammer T. The Future of Satellite TV: The Wide Range of Applications of the DVB-S2 Standard and Perspectives, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 99, No. 11, pp. 1905-1921, 2011.
- [22] Vazquez-Castro A, Vieira F. DVB-S2 full cross-layer design for QoS provision, *IEEE Comm. Magazine*, Vol. 50, pp. 128-135, 2012.

SUMMARY

BROADCASTING SYSTEMS AND STANDARDS OF SATELLITE TELEVISION TRANSMISSION IN EUROPE

In this paper the characteristics of satellite television transmission in the region of Europe are considered. An overview of the development of satellite television is given through the characteristics: broadcasting systems - analog and digital (SDTV, HDTV, UHD TV), frequency band (C, Ku, Ka), broadcasting standards (DVB-S, DVB-S2), the availability of TV services in the form of Free-to-air (FTA) and PAY TV, as well as the availability of TV services to satellite positions. Also, data are provided relating to satellite TV transmission providers. The collected data are presented by table and graphics for the period from 1996 to 2018. From the obtained results an analysis of the development of satellite television transmission was performed based on the characteristics of broadcasting.

Key words: satellite, C band, Ku band, DVB-S, SDTV, HDTV, UHD TV, FTA, PAY

Izmena putnika na međumesnim linijama

MIROSLAV M. BOŽOVIĆ, Visoka tehnička škola

strukovnih studija u Kragujevcu, Kragujevac

PAVLE V. GLADOVIĆ, Univerzitet u Novom Sadu,

Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Stručni rad

UDC: 656.11.072

DOI: 10.5937/tehnika1803407B

Funkcionisanje linija međumesnog javnog transporta putnika zasniva se na organizaciji linije kroz pojedinačne polaske i usklađivanje sa karakteristikama transportnih zahteva, definisanih u prostoru i vremenu. Bitna karakteristika tog usklađivanja jeste izmena putnika. Izmjena putnika ima značajnog uticaja i na ekonomske faktore funkcionisanja linije, pa je od značaja njeno kvantifikovanje. Do sada je u literaturi iz ove oblasti za kvantifikovanje izmene putnika i definisanje odgovarajućeg koeficijenta, korišćen pristup kojim se ne dobijaju precizni rezultati. U radu je prezentiran novi postupak definisanja koeficijenta izmene putnika, a rezultati su provereni na konkretnim primerima.

Ključne reči: međumesne linije, izmena putnika, koeficijent

1. UVOD

Međumesni, odnosno međugradski, drumski transport putnika karakteriše njegova prisutnost i odvijanje u različitim prostornim, vremenskim i organizacionim uslovima, što daje mogućnost njegovog diferenciranja na više načina. Sa aspekta organizacije i značaja za okruženje posebno je bitno diferenciranje javnog putničkog transporta na linijski i vanlinijski. Vanlinijski transport je definisan specifičnim potrebama koje ne postoje u kontinuitetu u precizno određenim uslovima. Dakle, isti nastaje i realizuje se od slučaja do slučaja. Linijski oblik javnog međumesnog transporta putnika relativno je stabilna kategorija, gde se organizacija linije kroz pojedinačne polaske usklađuje sa karakteristikama prevoznih zahteva. To usklađivanje je posledica zahteva putnika (korisnika), čija je važna karakteristika, pored ostalog, i potreba za prevozom na različitim dužinama, što se manifestuje pojavom izmene putnika na liniji.

Veličina izmene putnika direktno utiče na prihode sa linije, pa je od interesa da ista bude adekvatno kvantifikovana. Međutim, u praksi je uočeno da se, ukoliko se primenjuje postojeći način kvantifikovanja izmene putnika na međumesnim linijama, dobijaju vrednosti koje nisu potpuno tačne. Takođe, logično je očekivati da na vrednost izmene putnika ima uticaja i

prosečna dužina vožnje jednog putnika. Primena postojećih obrazaca za kvantifikovanje izmene putnika preko ove veličine, takođe ne daje tačne vrednosti. Zbog toga je važno detaljnije i preciznije istražiti i kvantifikovati navedenu pojavu.

2. O IZMENAMA PUTNIKA U POSTOJEĆOJ LITERaturi

Pregledom postojeće literature može se konstatovati da je opisana pojava izmene putnika na međumesnim, odnosno međugradskim, linijama definisana odgovarajućim koeficijentom kao faktorom kvantifikacije te pojave. Tako, u jednom od najstarijih izvora, koji je publikovan u većem broju izdanja [1], objašnjava se izmena putnika na liniji i način njene kvantifikacije na sledeći način: „Izmjena putnika na liniji određuje se koeficijentom izmene putnika, koji je jednak broju prevezenih putnika za svaku vožnju između krajnjih stanica linije po jednom putničkom mestu.

Koeficijent izmene putnika na liniji utvrđuje se odnosom dužine linije prema srednjem rastojanju putovanja (transporta) jednog putnika, ili odnosom ukupnog broja prevezenih putnika na liniji u toku vožnje između krajnjih stanica prema prosečnoj ispunjenosti vozila u toku iste vožnje“. Prema istom izvoru, koeficijent izmene putnika iznosi:

$$\eta_{sm} = \frac{K_l}{K_{sp1}} \quad (1)$$

$$\eta_{sm} = \frac{P_\lambda}{p \cdot \gamma} \quad (2)$$

Adresa autora: Miroslav Božović, Visoka tehnička škola strukovnih studija, Kragujevac, Kosovska 8

e-mail: borjanin@gmail.com

Rad primljen: 22.10.2017.

Rad prihvaćen: 30.05.2018.

gde su: K_l (km) – dužina linije; K_{spl} (km) – srednje rastojanje transporta jednog putnika; P_l – ukupan broj prevezenih putnika u toku vožnje između krajnjih stanica linije; p – ukupan broj putničkih mesta vozila; γ – koeficijent ispunjenosti vozila.

U [2] navodi se da se „u toku poluobrtu vozila na međustanicama linije vrši izmena putnika, jer jedan deo putnika izlazi, a na njihova mesta ulaze drugi putnici“. Dalje se navodi: „Koeficijent izmene putnika u međugradskom autobuskom saobraćaju definisan je odnosom ukupnog broja prevezenih putnika u poluobrtu P_λ prema prosečnom broju prevezenih putnika po jednoj deonici linije za obim prevoza $q_{\lambda Q}$ “, odnosno,

$$\eta_{sm} = \frac{P_\lambda}{q_{\lambda Q}} \quad (3)$$

U nastavku se u istom izvoru napominje da se u literaturi iz ove oblasti često sreće definicija po kojoj se „... koeficijent izmene putnika može izračunati i odnosom dužine linije prema srednjem rastojanju prevoza jednog putnika“. Na osnovu toga je:

$$\eta_{sm} = \frac{K_l}{K_{sP_1}} \quad (4)$$

Međutim, takođe se napominje da se ovim odnosom dobijaju rezultati koji nisu tačni i veći su od stvarnih vrednosti. Nema objašnjenja zašto je to tako, ali se definišu slučajevi dobijanja graničnih vrednosti ove veličine.

I u novijim izvorima takođe se opisuje pojava izmene putnika na liniji međumesnog prevoza. U [3] se navodi: „Iz činjenice da putnici na jednoj liniji u jednom poluobrtu putuju na različitim relacijama i da oni koji izlaze na pojedinim stanicama oslobađaju jedan broj mesta za putnike koji na tim stanicama ulaze, proizilazi definicija izmene putnika. Ova izmena putnika izražava se koeficijentom izmene putnika (η_{sm}) koji pokazuje koliko se puta u toku vožnje u jednom poluobrtu (u jednom smeru) izmene putnici na liniji“. U nastavku istog izvora opisuju se pojave najveće i najmanje vrednosti koeficijenta izmene putnika i daje se objašnjenje njihovog nastajanja. U ovom izvoru se, dalje, kaže: "Koeficijent izmene putnika se izračunava kao količnik između ukupnog broja prevezenih putnika u jednom poluobrtu (P_λ) i prosečnog broja prevezenih putnika po jednoj deonici linije za obim prevoza ($q_{\lambda Q}$)", odnosno,

$$\eta_{sm} = \frac{P_\lambda}{q_{\lambda Q}} = \frac{P_\lambda}{q \gamma_\lambda} \quad (5)$$

U datom obrascu veličine q i γ_λ su kapacitet autobusa i presečan koeficijent statičkog iskorišćenja kapaciteta u toku poluobrtu, respektivno.

U literaturi koja se odnosi na gradski linijski masovni transport putnika definisan je pojam izmene

putnika i dat je način njegovog kvantifikovanja. Tako, u [4] se kaže: „...koeficijent izmene putnika se može iskazati kao odnos između ukupnog broja prevezenih putnika u jedinici vremena i onog broja putnika koji nije imao direktnu izmenu putnika“.

U istom izvoru se navodi da ovaj koeficijent „predstavlja odnos između ukupnog broja prevezenih putnika i maksimalnog realizovanog protoka na liniji u posmatranom času“. Takođe se daje „model za proračun koeficijenta izmene putnika (η) u smeru linije (sm):

$$\eta_{sm} = \frac{P_{sm}}{\max[Z_{sm,s}]} \quad (6)$$

gde je: P_{sm} – ukupan broj putnika u smeru linije (sm), $Z_{sm,s}$ – protok putnika u smeru linije (sm) i stajalištu (s)".

Pored navedenog načina, u [5] je dat i drugi model za izračunavanje koeficijenta izmene putnika na gradskim linijama, korišćenjem dužine linije (L), srednje dužine vožnje (l_{srv}) i neravnomernosti protoka putnika tokom jednog časa (n_p), odnosno:

$$\eta_{sm} = \frac{L}{l_{srv} \cdot n_p} \quad (7)$$

Definisanje izmene putnika i način kvantifikovanja iste na gradskim linijama uvažava činjenicu da je u pitanju masovni prevoz putnika, i da se organizacijom linije i većim brojem polazaka na liniji u jedinici vremena usklađuju prevozne sposobnosti iste sa prevoznim zahtevima.

U izvorima koji se odnose na organizovanje prevoza putnika na međumesnim linijama na sličan način se definiše pojava izmene putnika. Kvantifikovanje ove pojave formulisano je na dva načina: odnosom broja prevezenih putnika na poluobrtu i prosečnog broja putnika u vozilu, ili iz odnosa dužine linije i srednjeg rastojanja prevoza jednog putnika.

Pri tome se ne definiše jasno pojam izmene putnika na međumesnim linijama, odnosno ne određuje se na koje putnike se odnosi izmena. Iz toga proizilaze i slabosti u načini kvantifikovanja ove pojave. Te slabosti se manifestuju u činjenicama da:

- rezultati, dobijeni na jedan ili drugi način, nisu tačni,
- rezultati dobijeni na navedene načine nisu međusobno saglasni (nisu identični).

Zbog toga je neophodno revidirati navedene stavove i jasno definisati izmenu putnika na međumesnim linijama i način njenog kvantifikovanja.

3. DEFINISANJE IZMENE PUTNIKA NA LINIJI

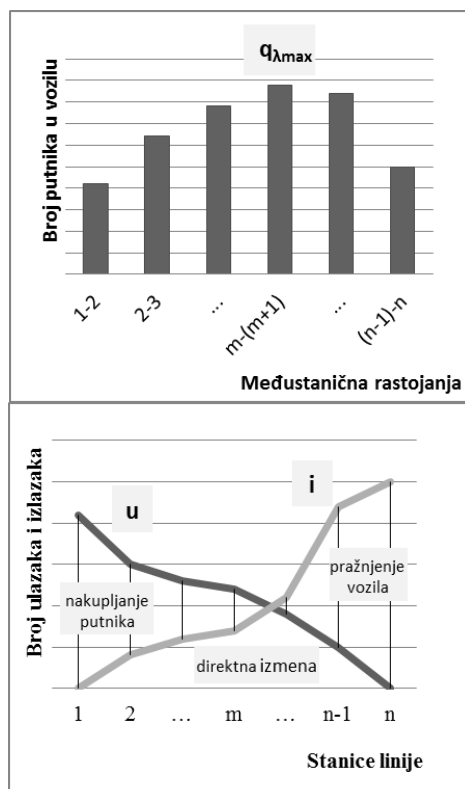
Putnici duž linije se prevoze na različitim rastojanjima. Deo putnika izlazi iz vozila na stanicama i oslobađa mesta putnicima koji ulaze u vozilo na tim

stanicama. Tada se vrši direktna izmena putnika. Međutim, nemaju svi putnici direktnu izmenu. Jedan broj putnika nema izmenu, odnosno, oni se prevoze na određenoj deonici, a umesto njih u vozilo ne ulaze drugi putnici (vrši se nakupljanje putnika u vozilu). To podrazumeva da ukupan broj putnika koji se preveze na poluobrtu linije (P_λ) čine putnici koji imaju direktnu izmenu (P_{sm}) i putnici koji nemaju direktnu izmenu, odnosno, može se reći, imaju indirektnu izmenu (P_{in}):

$$P_\lambda = P_{sm} + P_{in} \quad (8)$$

Direktnu izmenu imaju samo oni putnici na mesto kojih, pri napuštanju vozila, ulaze novi putnici. Putnici koji nemaju direktnu izmenu nakupljaju se u vozilu duž linije. Drugim rečima, oni povećavaju opterećenje (popunjenost) vozila. Najmanje na jednom međustaničnom rastojanju popunjenost vozila dostiže maksimalnu vrednost. Nakon toga vozilo počinje da se prazni, odnosno posle tog međustaničnog rastojanja broj putnika koji napušta vozilo veći je od broja putnika koji ulaze u isto. Krajnji rezultat je da je broj ukupno prevezenih putnika, u opštem slučaju, veći od maksimalnog broja putnika koji je popunjavao vozilo.

Broj putnika koji je maksimalno popunjavao vozilo ($q_{\lambda max}$), odnosno broj putnika na maksimalno opterećenom međustaničnom rastojanju linije, odgovara broju putnika koji nisu imali direktnu izmenu (P_{in}), a koji su se nakupljali u vozilu (slika 1).



Slika 1 - Odnos ulazaka i izlazaka i nakupljanja putnika u vozilu

Ova veličina dobija se kao razlika kumulativnog broja ulazaka (u) i kumulativnog broja izlazaka (i) putnika do stanice u kojoj nastaje maksimalno nakupljanje (m), odnosno:

$$P_{in} = q_{\lambda max} = \sum_1^m u_i - \sum_1^m i_i \quad (9)$$

Odnos broja ukupno prevezenih putnika (P_λ) i broja putnika koji nisu imali direktnu izmenu (P_{in}) daje veličinu koja pokazuje koliko puta su zaposedana korišćena mesta u vozilu.

Time se definiše koeficijent izmene putnika (η_{sm}), odnosno:

$$\eta_{sm} = \frac{P_\lambda}{P_{in}} = \frac{P_\lambda}{q_{\lambda max}} = \frac{\sum_1^n u_i}{q_{\lambda max}} = \frac{\sum_1^n u_i}{\sum_1^m u_i - \sum_1^m i_i} \quad (10)$$

Dakle, veličina izmene putnika može se kvantifikovati količnikom ukupnog broja prevezenih putnika na poluobrtu i broja putnika koji nisu imali direktnu izmenu, a koji odgovara broju putnika na maksimalno opterećenom međustaničnom rastojanju.

Logično je očekivati da je veličina izmene putnika na liniji povezana sa srednjom dužinom vožnje jednog putnika. Da bi se ta veza uspostavila može se poći od relacije za transportni rad na liniji:

$$P_\lambda \cdot K_{sp1} = L \cdot q_{\lambda U} \quad (11)$$

Veličina $q_{\lambda U}$ predstavlja prosečan broj putnika po kilometru linije. Zamenom za P_λ u navedenoj relaciji važi:

$$\eta_{sm} \cdot q_{\lambda max} \cdot K_{sp1} = L \cdot q_{\lambda U} \quad (12)$$

Iz navedenog sledi da se koeficijent izmene putnika može izraziti odnosom dužine linije (L) i srednje dužine vožnje jednog putnika (K_{sp1}), ali se mora korigovati koeficijentom neravnomernosti broja putnika po kilometru linije ($\psi_{\lambda U}$), odnosno:

$$\eta_{sm} = \frac{L}{K_{sp1} \cdot \frac{q_{\lambda max}}{q_{\lambda U}}} = \frac{L}{K_{sp1} \cdot \psi_{\lambda U}} \quad (13)$$

$$\psi_{\lambda U} = \frac{q_{\lambda max}}{q_{\lambda U}} \quad (14)$$

Ukoliko je poznat kapacitet vozila (q), koji se na međumесnim linijama izražava brojem mesta za sedenje (uključujući i mesta vozača), koeficijent izmene putnika može se izraziti uzimanjem u obzir koeficijenta iskorišćenja kapaciteta vozila (γ) na maksimalno opterećenom međustaničnom rastojanju linije (γ_{max}), odnosno:

$$\eta_{sm} = \frac{P_\lambda}{q \cdot \gamma_{\lambda max}} \quad (15)$$

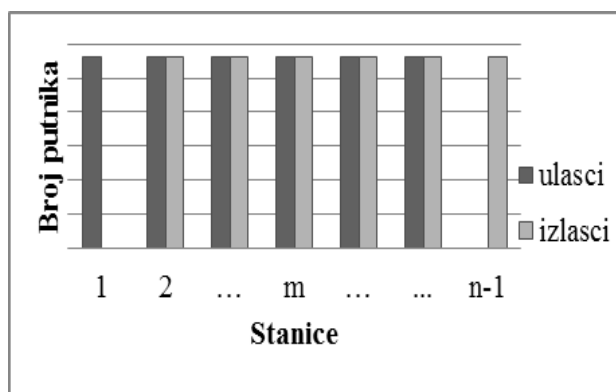
Veličina izmene putnika na međumесnim linijama definisana prema modelima (10), (13) i (15), daje tačne i međusobno usaglašene rezultate.

4. GRANIČNE VREDNOSTI IZMENE PUTNIKA

Granične vrednosti, odnosno minimalna i maksimalna vrednost koeficijenta izmene putnika mogu da nastanu u specifičnim situacijama. Te vrednosti se retko realizuju u praksi, odnosno uglavnom nastaju u posebnim uslovima i namenama linija.

4.1. Maksimalna izmena putnika

Maksimalna vrednost koeficijenta izmene putnika jednaka je broju međustaničnih rastojanja ($n-1$) na poluobrtu linije. Takva situacija nastaje kada se na svakoj stanici vrši potpuna izmena putnika (slučaj kada na stanicama ulazi i izlazi uvek isti broj putnika, (slika 2).



Slika 2 – Potpuna izmena putnika na stanicama linije

Putnici koji nemaju direktnu izmenu se tako prevoze samo na jednom (poslednjem) međustaničnom rastojanju linije. Tada je:

$$P_{in} = \frac{1}{n-1} \cdot P_{\lambda} = q_{\lambda i} = q_{\lambda max} \quad (16)$$

$$\eta_{sm} = \frac{P_{\lambda}}{P_{in}} = \frac{P_{\lambda}}{\frac{1}{n-1} P_{\lambda}} = \frac{(n-1) \cdot q_{\lambda i}}{q_{\lambda i}} = n - 1 \quad (17)$$

Vrednost srednje dužine vožnje jednog putnika je:

$$K_{sp1} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} q_{\lambda i} \cdot l_i}{P_{\lambda}} = \frac{q_{\lambda} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} l_i}{(n-1) \cdot q_{\lambda}} = \frac{L}{n-1} \quad (18)$$

Pošto je tok putnika na svim međustaničnim rastojanjima duž linije ravnomeran (vrednost koeficijenta neravnomernosti protoka jednaka je jedinici: $\psi_{\lambda U} = 1$), to je koeficijent izmene putnika jednak:

$$\eta_{sm} = \frac{L}{K_{sp1} \cdot \frac{q_{\lambda max}}{q_{\lambda U}}} = \frac{L}{\frac{L}{n-1} \cdot 1} = n - 1 \quad (19)$$

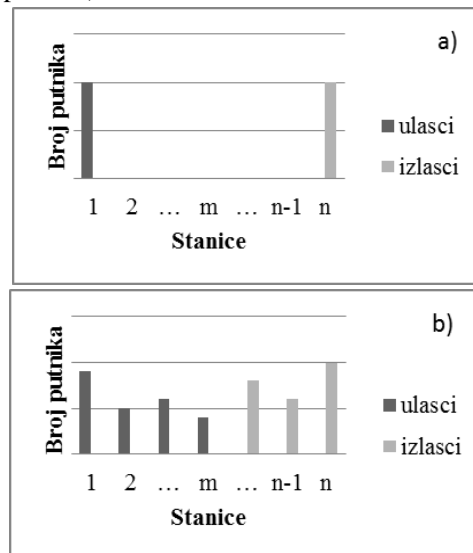
4.2. Minimalna izmena putnika

Minimalna vrednost koeficijenta izmene putnika nastaje u uslovima kada ne postoji direktna izmena istih ($P_{sm}=0$). Tada je minimalna vrednost koeficijenta izmene putnika jednaka jedinici:

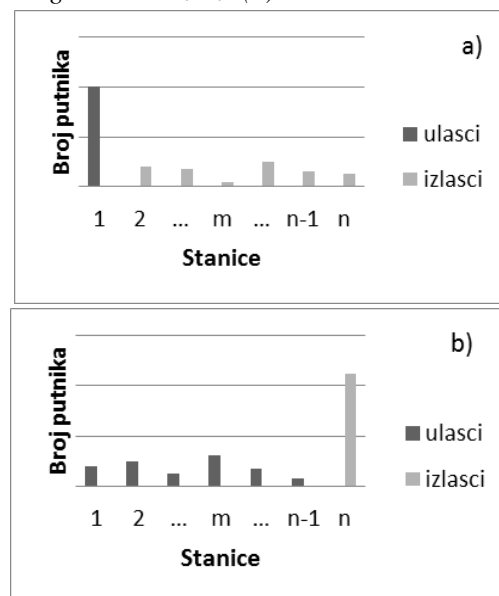
$$\eta_{sm} = \frac{P_{\lambda}}{P_{in}} = \frac{P_{\lambda}}{P_{\lambda} - P_{sm}} = \frac{P_{\lambda}}{P_{\lambda}} = 1 \quad (20)$$

Navedeni slučaj vrednosti koeficijenta izmene putnika nastaje u nekoj od navedenih situacija, odnosno (slike 3-4):

- kada se svi putnici prevoze na istom broju međustaničnih rastojanja (na primer, od početka do kraja kod direktnih linija);
- kada na jednom delu linije putnici samo ulaze u vozilo, a na drugom delu linije samo izlaze (obavlja se nakupljanje a zatim distribucija putnika);



Slika 3 - Minimalna izmena putnika kada se svi putnici prevoze od početka do kraja linije (a) i kada na jednom delu linije putnici samo ulaze a na drugom samo izlaze (b)



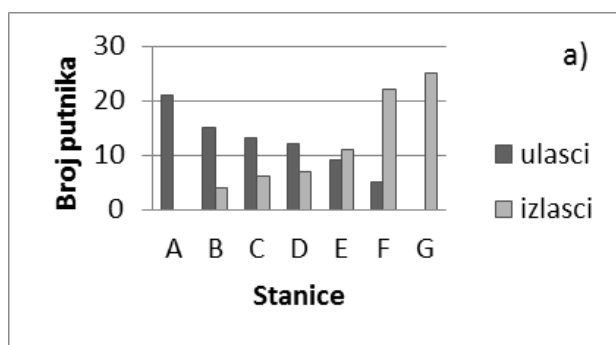
Slika 4 Minimalna izmena putnika kada svi putnici ulaze na jednoj stanici a potom izlaze duž linije (a) i kada putnici ulaze duž linije a potom svi izlaze na jednoj stanici (b)

- kada putnici ulaze samo na jednoj stanici (na primer, na prvoj) a izlaze na ostalim stanicama linije (kada se realizuje distribucija putnika);
- kada putnici duž linije samo ulaze a svi izlaze na jednoj stanici (na primer, na poslednjoj, kada je u pitanju nakupljanje putnika).

Na osnovu navedenog, vrednosti koeficijenta izmene putnika nalaze se u intervalu:

$$1 \leq \eta_{sm} \leq n - 1 \quad (21)$$

Vrednosti ovog koeficijenta, na linijama koje nemaju navedene specifičnosti, ukazuju i na karakter linije i prevoženja putnika koji je koriste. Manja vrednost koeficijenta izmene putnika upućuje da na liniji dominiraju vožnje na dužim relacijama, odnosno na vožnje sa manjom zastupljenošću lokalnih putnika.



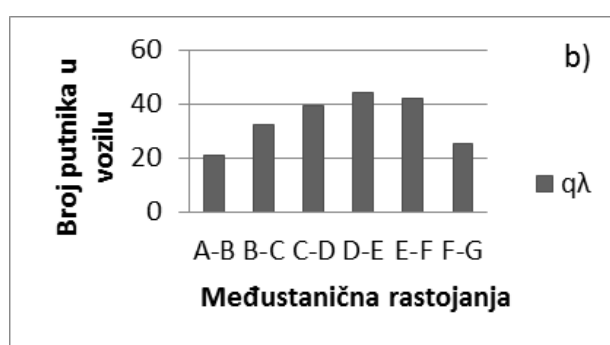
5. PRIMERI ODREĐIVANJA VELIČINE KOEFICIJENTA IZMENE PUTNIKA

Razmatrana je linija čije su prostorne karakteristike i broj putnika tabelarno specificirani. U primeru su date, za različite polaske, različite mogućnosti odnosa ulazaka i izlazaka putnika na pojedinim stanicama.

Na osnovu toga izračunate su vrednosti koeficijenta izmene putnika primenom veličina maksimalno opterećenog međustaničnog rastojanja linije ($q_{\lambda max}$) i vrednosti srednje dužine vožnje jednog putnika (K_{sp1}).

Primer 1

Primer 1 odnosi se na tipičnu situaciju kada se vozilo na jednom delu poluoobrta popunjava, dostiže maksimalnu popunjenost ($q_{\lambda max}$), a potom se prazni (tabela 1, slika 5).



Slika 5 - Dijagrami ulazaka i izlazaka (a) i promene broja putnika u vozilu (b) – primer 1

Primer pokazuje slaganje dobijenih rezultata koeficijenta izmene putnika (η_{sm}) izračunatih na predložene načine, odnosno izračunate korišćenjem veličine

maksimalnog opterećenja vozila ($q_{\lambda max}$) i veličine srednje dužine vožnje jednog putnika (K_{sp1}).

Tabela 1. Karakteristični elementi linije – primer 1.

Poluoobrta linije A-B-C-D-E-F-G														
Stanice	A		B		C		D		E		F		G	
l_i (km)		25		34		19		38		40		32		Σ 188
U (put)	21		15		13		12		9		5		-	Σ 75
I (put)	-		4		6		7		11		22		25	Σ 75
q_{λ} (put)		21		32		39		44		42		25		
$l_i \cdot q_{\lambda i}$ (pkm)		525		1088		741		1672		1680		800		Σ 6506
$K_{sp1} = \sum_{i=1}^{n-1} q_{\lambda i} \cdot l_i / P_{\lambda} = 86,75 \text{ (km)}; \quad q_{\lambda U} = \sum_{i=1}^{n-1} q_{\lambda i} \cdot l_i / L = 34,61 \text{ (put)}; \quad \psi_U = q_{\lambda max} / q_{\lambda U} = 1,27$ $\eta_{sm} = P_{\lambda} / q_{\lambda max} = 1,71 \quad \eta_{sm} = L / K_{sp1} \cdot \psi_U = 1,71$														

Legenda: l (km) – dužina međustaničnog rastojanja linije; U (put) – broj ulazaka putnika; I (put) – broj izlazaka putnika; q_{λ} (put) – broj putnika u vozilu na međustaničnom rastojanju lini

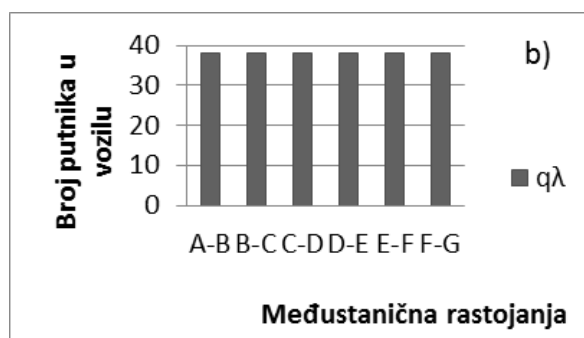
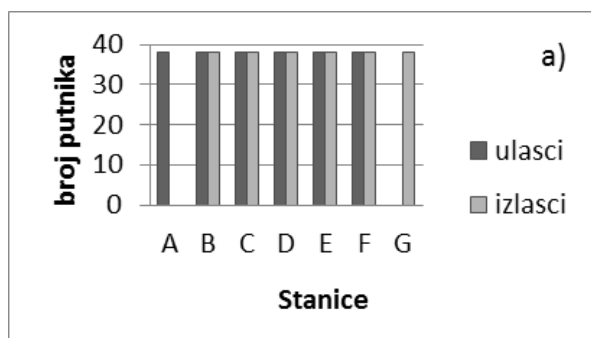
Primer 2

U drugom primeru (tabela 2, slika 6) prikazan je slučaj potpune izmene putnika na svim stanicama linije.

Veličina izmene putnika dobija maksimalnu vrednost (jednaku broju međustaničnih rastojanja linije) uz potpuno slaganje rezultata izračunatih na predložene načine.

Tabela 2. Karakteristični elementi linije – primer 2

Poluobrta linije A-B-C-D-E-F-G															
Stanice	A		B		C		D		E		F		G		
l_i (km)		25		34		19		38		40		32		Σ	188
U (put)	38		38		38		38		38		38		-	Σ	228
I (put)	-		38		38		38		38		38		38	Σ	228
q_{λ} (put)		38		38		38		38		38		38			
$l_i \cdot q_{\lambda i}$ (pkm)		950		1292		722		1444		1520		1216		Σ	7144
$K_{sp1} = \sum_{i=1}^{n-1} q_{\lambda i} \cdot l_i / P_{\lambda} = 31,33 \text{ (km)}; q_{\lambda U} = \sum_{i=1}^{n-1} q_{\lambda i} \cdot l_i / L = 38,00 \text{ (put)}; \psi_U = q_{\lambda max} / q_{\lambda U} = 1,00$ $\eta_{sm} = P_{\lambda} / q_{\lambda max} = 6,00 \quad \eta_{sm} = L / K_{sp1} \cdot \psi_U = 6,00$															



Slika 6 - Dijagrami ulazaka i izlazaka (a) i promene broja putnika u vozilu (b) - primer

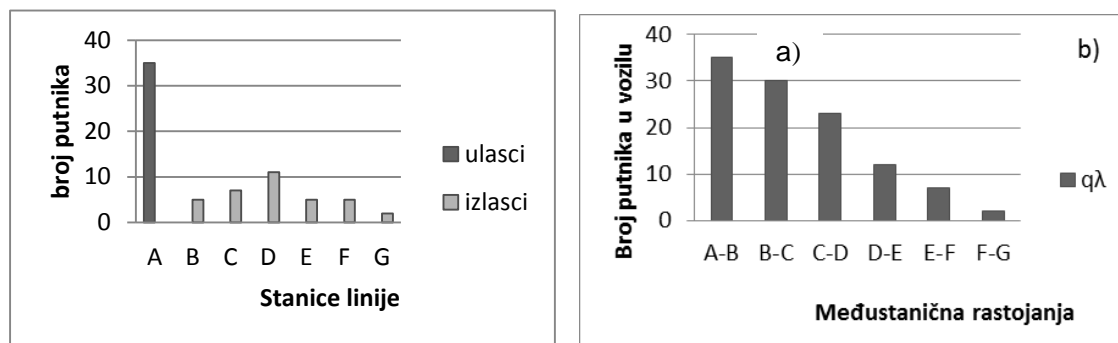
Primer 3

Treći primer predstavlja situaciju sa minimalnom vrednošću koeficijenta izmene putnika (situacija

bez direktno izmene putnika) u uslovima distribucije putnika na liniji (tabela 3, slika 7). Slaganje vrednosti koeficijenta izmene putnika izračunate na predložene načine je potpuno.

Tabela 3. Karakteristični elementi linije – primer 3.

Poluobrta linije A-B-C-D-E-F-G															
Stanice	A		B		C		D		E		F		G		
l_i (km)		25		34		19		38		40		32		Σ	188
U (put)	35		-		-		-		-		-		-	Σ	35
I (put)	-		5		7		11		5		5		2	Σ	35
q_{λ} (put)		35		30		23		12		7		2			
$l_i \cdot q_{\lambda i}$ (pkm)		835		1020		437		456		280		64		Σ	2892
$K_{sp1} = \sum_{i=1}^{n-1} q_{\lambda i} \cdot l_i / P_{\lambda} = 82,63 \text{ (km)}; q_{\lambda U} = \sum_{i=1}^{n-1} q_{\lambda i} \cdot l_i / L = 15,38 \text{ (put)}; \psi_U = q_{\lambda max} / q_{\lambda U} = 2,28$ $\eta_{sm} = P_{\lambda} / q_{\lambda max} = 1,00 \quad \eta_{sm} = L / K_{sp1} \cdot \psi_U = 1,00$															



Slika 7 - Dijagrami ulazaka i izlazaka (a) i promene broja putnika u vozilu (b) – primer 3

6. ZAKLJUČAK

Veličina izmene putnika na međumesnim linijama je važna karakteristika na koju prevoznici posebno obraćaju pažnju u procesu planiranja i registovanja tih linija.

Uočeno je da način na koji je ova karakteristika do sada kvantifikovana ne daje precizne – potpuno tačne rezultate. Zbog toga je, u ovom radu, analizirana pojava izmene putnika na međumesnim linijama i karakteristike veličina koje je determinišu.

Dokazani su načini na koje treba veličinu izmene kvantifikovati, odnosno na koje načine je moguće izračunavati koeficijent izmene putnika. Dobijeni rezultati se mogu primenjivati na svim linijama koje funkcionišu tako da se organizacija linije kroz pojedinačne polaske usklađuje sa prevoznim zahtevima putnika.

LITERATURA

- [1] Đokić, L. *Organizacija drumskog transporta*, Građevinska knjiga, Beograd, 1979.

- [2] Topenčarević Lj, *Organizacija i tehnologija drumskog transporta*, Građevinska knjiga, Beograd, 1987.
- [3] Gladović P, *Tehnologija drumskog saobraćaja*, FTN Izdavaštvo, Novi Sad, 2010.
- [4] Tica S, *Sistemi transporta putnika – Elementi tehnologije, organizacije i upravljanja*, Saobraćajni fakultet, Beograd, 2016
- [5] Banković R, *Organizacija i tehnologija javnog gradskog putničkog prevoza*, Saobraćajni fakultet, Beograd, 1994.
- [6] Gladović P, *Zbirka rešenih zadataka iz tehnologije drumskog transporta*, PC program, Beograd, 2000.
- [7] Jovanović I. *Zbirka rešenih zadataka iz organizacije i eksploatacije drumskog transporta*, Saobraćajni fakultet, Beograd, 1997.
- [8] Filipović S. *Optimizacije u sistemu javnog gradskog putničkog prevoza*, Saobraćajni fakultet, Beograd, 1995.

SUMMARY

CHANGE OF THE PASSENGERS ON THE INTERCITY LINES

Functioning of lines of the intercity public passenger transports based on the harmonization of transport requirements and organization within the individual departures, defined in space and time. An important feature of this harmonization is the change of passengers. Change of passengers as a significant impact on the economic factors of the functioning of the line, so its quantification is important. So far, in the literature in this field for the quantification of passenger changes and the definition of an appropriate coefficient, the approach that has been used does not produce accurate results. The paper presents a new procedure for defining the passenger change coefficient, and the results were verified on concrete examples.

Key words: Intercity lines, change of the passengers, coefficient.

Uticaj niskotarifnog prevozioca na cene karata tradicionalnog prevozioca na interkontinentalnim letovima

JOVANA G. KULJANIN, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

MILICA Đ. KALIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

NEMANJA M. MIJOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Saobraćajni fakultet, Beograd

MANUEL RENOLD, Zurich University of Applied Science, Zurich, Switzerland

Pregledni rad

UDC: 656.73.032

DOI: 10.5937/tehnika1801115K

Aviokompanija Norwegian Airlines je među prvim aviokompanijama u svetu započela sa primenom niskotarifnog modela poslovanja na dugolinijskim letovima. Niske cene karata koje je uspela da ponudi na svojim interkontinentalnim letovima ozbiljno su ugrozile tradicionalne aviokompanije nateravši ih da počnu da primenjuju različite kontrastrategije kako bi smanjile konkurentski pritisak. Empirijski rezultati dobijeni primenom regresione analize na liniji koja povezuje London i Njujork ukazuju da prisustvo niskotarifnog prevozioca Norwegian ima, iako mali, statistički značajan uticaj na smanjenje cene karata British Airways-a koji je dugo godina bio dominantan prevozioc na ovoj liniji. Takođe, rezultati modela naglašavaju značaj primene strategije povećanja broja sedišta u putničkoj kabini od strane British Airways-a koja se pokazala kao efikasan poslovni alat koji kroz realtivno mala ulaganja u kratkom vremenskom periodu daje dobre rezultate.

Ključne reči: konkurencija, novi tipovi vazduhoplova, niskotarifni model poslovanja na dugolinijskim linijama

1. UVOD

Kada je 2013. godine aviokompanija Norwegian Airlines ponudila jeftine tarife na transatlantskoj ruti ka Njujorku iz Osla i ubrzo nakon toga iz Stokholma, niko nije zaista ozbiljno mogao da poveruje u izvodljivost ovakvog poduhvata. S obzirom na početni uspeh koji je imao na ovim linijama iz Norveške, Norwegian je istu strategiju narednih godina počeo da primenjuje i sa aerodroma u Londonu (2014), Parizu (2016) i Barseloni (2017). Na taj način, Norwegian je postao jedan od pionira među aviokompanijama koji je uspeo da prenese niskotarifni model poslovanja na dugolinijski saobraćaj i tako postane ozbiljan konkurent mnogim vodećim aviokompanijama u Evropi, među kojima su i oni najveći prevozioci poput British Airways-a i Air France-KLM. Ova aviokompanija trenutno spada u vodeće evropske aviokompanije po bro-

ju linija koje povezuju evropski i američki kontinent [1] i u ponudi ima sedam destinacija na području Sjedinjenih Američkih Država (Njujork, Los Anđeles, San Francisco, Boston, Las Vegas, Orlando, Majami) i dve destinacije u Karipskom zalivu (Portoriko i Sent Kroj).

Ovakva ekspanzija mreže kompanije Norwegian Airlines je u velikoj meri podržana kupovinom i eksploatacijom vazduhoplova nove generacije čija tehnologija omogućava značajno manju potrošnju goriva i velike dolete koji omogućavaju povezivanje jako udaljenih parova gradova širom planete.

Ovde se u prvom redu misli na vazduhoplov tipa Boeing 787-900 koji ima 294 sedišta u putničkoj kabini, što je znatno manji kapacitet u poređenju sa vazduhoplovima sličnog doleta (A340, B777, B747).

Uvođenjem linija sa manjih aerodroma koji su u neposrednoj blizini velikih habova ka popularnim turističkim destinacijama koje generalno karakteriše velika tražnja i politikom pružanja nižih cena svojih usluga, Norwegian je podstakao velike aviokompanije, poput British Airways-a na razvijanje kontrastrategija koje bi omogućile smanjenje konkurentskog pritiska.

Adresa autora: Jovana Kuljanin, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305
e-mail: j.kuljanin@sf.bg.ac.rs

Rad primljen: 18.01.2018.

Rad prihvaćen: 05.02.2018.

Istraživanja su pokazala da je cena karte za Njujork kompanije Norwegian Airlines u nekim periodima godine i do 30% niža u odnosu na cenu karte kompanije British Airways, što daje mogućnost ovoj niskotarifnoj aviokompaniji da privuče deo putnika svog konkurenta (i to posebno onaj cenovno osetljivi) i time direktno ugrozi njegove prihode.

Cilj rada je da se empirijski utvrdi uticaj Norwegian Airlines na cene karata koje je British Airways ponudio svojim putnicima na tržištu putovanja između Londona i Njujorka, kao jedne od naprometnijih interkontinentalnih linija na svetu. Imajući u vidu da ovakav model poslovanja ima tendenciju da ozbiljno ugrozi i druge velike aviokompanije širom Evrope sa čijih aerodroma ova niskotarifna aviokompanija obavlja svoje dugolinijske letove, rezultati ovog istraživanja mogli bi da posluže u cilju sagledavanja mogućih efekata, koji ovakav relativno nov koncept poslovanja, može da ima na tradicionalne aviokompanije. Nakon uvodnog dela, u drugom poglavlju dat je detaljan pregled promenljivih koji utiču na cene karata aviokompanije British Airways. U trećem delu detaljno je opisana specifikacija modela i rezultati analize. U poslednjem, četvrtom delu, data su zaključna razmatranja sa pravicima budućih istraživanja.

2. PREDLOŽENI MODEL

2.1. Izbor promenljivih

U ovom radu je razmatrana cena karte prevozioca British Airways (CenaBAW) kao zavisna promenljiva na čije vrednosti utiče niz faktora (promenljivih) koji će detaljno biti opisani u ovom poglavlju. Ova promenljiva je razmatrana na liniji koja spaja dve velike svetske metropole London i Njujork i na kojoj je prisutno nekoliko evropskih i američkih avioprevozioca.

Godišnji broj putnika na ovoj ruti u 2012. godini iznosio je oko dva miliona, od čega je 1.2 miliona predstavljalo lokalnu potražnju sa dnevnom frekvencijom od preko 19 letova (između aerodroma London Heathrow (LHR) i njujorškog John F. Kennedy (JFK)), što je svakako svrstava u najprometniju interkontinentalnu dugolinijsku rutu koja se obavlja iz Evrope [2].

Promenljiva CenaBAW je predstavljena prosečnom cenom karte u jednom pravcu na liniji koja povezuje ova dva grada za svaki kvartal u godini počevši od 2007. i data je u američkim dolarima. Podaci o prosečnoj ceni karte preuzeti su iz baze podataka jednog od najpoznatijeg globalnog rezervacionog sistema Sabre. Prosečna cena karte na liniji London-Njujork dobijena je ponderisanjem prosečne cene karata sa svakog pojedinačnog aerodroma u Londonu¹ sa koga British Airways obavlja letove ka Njujorku² odgovarajućim koeficijentima. Vrednosti koeficijenata predstavljaju učešća ponuđenih sedišta na svakom od aerodroma sa

kojih British Airways obavlja letove ka jednom od dva aerodroma u oblasti grada Njujorka u ukupnom broju sedišta koji nudi na ovom tržištu između ova dva grada.

Cena karte direktno zavisi od ukupnog broja putnika aviokompanije British Airways. Ova nezavisna promenljiva (PutniciBAW) predstavljena je kao ukupan broj putnika sa svih aerodroma u Londonu (LHR i LGW) sa kojih se obavljaju letovi ka Njujorku (JFK i EWR). Podaci o ukupnom broju putnika su preuzeti iz javno dostupne U.S. DoT's T-100 baze koju vodi Biro za transportnu statistiku i koja sadrži mesečne izveštaje o ukupnom broju prevezenih putnika kako na letovima američkih, tako i na letovima stranih prevozioca koji započinju ili završavaju svoje putovanje na teritoriji Sjedinjenih Američkih Država.

Jedna od ključnih nezavisnih promenljivih u modelu je ukupan broj putnika aviokompanije Norwegian Airlines sa aerodroma LGW na liniji ka JFK. Promenljiva PutniciNAX omogućava da se utvrdi uticaj prisustva konkurenta na cenu karte BA, prevozioca koji je dugo godina unazad bio dobro pozicioniran na ovom tržištu. S obzirom da Norwegian umnogome bazira svoje poslovanje na principima poslovnog modela niskotarifnih aviokompanija, procenjuje se da će prisustvo Norwegian-a na tržištu između ove dve metropole uticati na smanjenje cena karata avioprevoznika British Airways, kako sa aerodroma LHR, tako i sa aerodroma LGW gde su ujedno ova dva prevozioca i direktni konkurenti. I u ovom slučaju, U.S. DoT's T-100 baza je korišćena kako bi se utvrdio broj putnika ove aviokompanije na liniji za Njujork.

Pored broja putnika niskotarifne aviokompanije Norwegian, očekuje se da će još nekoliko promenljivih imati značajan uticaj na cenu karte BA. Borenstein [3], na primer, smatra da je koncentracija na tržištu umnogome povezana sa cenom karte koju nude svi pojedinačni učesnici. Autori Cho i ostali [4] su emirijski potvrdili da direktna konkurencija između prevozioca koji povezuju dva identična aerodroma dovodi do značajnog smanjenja cene karata. Međutim, ovi autori takođe pokazuju da se sličan efekat može indukovati i u slučaju kada konkurenti saobraćaju sa različitim aerodroma koji opslužuju iste parove gradova.

¹U opslužnom području Londona nalazi se pet aerodroma i to: London Heathrow (LHR), London Gatwick (LGW), London Stansted (STN), London Luton (LTN) i London City Airport (LCY). Letovi ka Njujorku obavljaju se sa dva aerodroma i to LHR Letovi ka Njujorku obavljaju se sa dva aerodroma LHR i LGW

²Pomenuti aerodromi u Londonu povezani su sa dva aerodroma u opslužnom području Njujorka i to su John F. Kennedy International Airport (JFK) i Newark Liberty International Airport (EWR)

U konkretnom slučaju, to bi značilo da će niske tarife koje nudi Norwegian sa aerodroma LGW direktno uticati na smanjenje cena karata koje nudi BA sa aerodroma LHR i LGW ka aerodromima u Njujorku (JFK) i okolini (EWR).

Kako bi se odredilo učešće na tržištu svake aviokompanije koja je saobraćala na posmatranom paru gradova, korišćena je sopstvena baza podataka koja je sadržala podatke o letovima svih aviokompanija koje su obavljale saobraćaj između Londona i Njujorka u periodu između 2007. i 2017. godine. Podaci su svakodnevno prikupljeni sa sajta Flight Radar uz pomoć kojeg se u realnom vremenu može pratiti obavljanje celokupnog saobraćaja na svetskom nivou i sadržali su informaciju o vremenu poletanja, vremenu sletanja, tipu vazduhoplova i vremenu trajanja leta. Posle detaljne obrade podataka koja je podrazumevala analizu ponuđenog broja sedišta (tj. kapaciteta) svake aviokompanije koja saobraća na posmatranom paru

aerodroma, bilo je moguće izvršiti njihovu agregaciju na kvartalnom nivou. Nakon toga određena je vrednost Herfindahl-Hirschman Index-a (HHI) za posmatrani par aerodroma za period između 2007. i 2017. godine.

Ovaj indeks se računa kao suma kvadrata učešća svake aviokompanije k u ukupnom ponuđenom kapacitetu (broju ponuđenih sedišta) između posmatranih parova gradova i i j u svakom kvartalu t , i za posmatrani par gradova definisan je na sledeći način:

$$\sum_{k=1}^n \left(\frac{\sum KAPACITET_{tk}}{\sum KAPACITET_t} * 100 \right)^2 \quad (1)$$

Jasno je da će vrednost HHI indeksa izražene preko ponuđenog kapaciteta direktno zavisiti od dnevnih frekvencija letenja posmatrane aviokompanije i konfiguracija njihovih vazduhoplova na datoj ruti.

U tabeli 1 prikazana su učešća različitih tipova vazduhoplova u ukupnom broju operacija na ruti ka Njujorku kompanije British Airways.

Tabela 1. Učešće različitih tipova vazduhoplova u ukupnom broju poletanja na liniji London-Njujork kompanije British Airways

	B747-400	B777-200	B767-300	B777 -W	B787-800	B787-900
2010	1505 50%	1305 43%	200 6.6%	-	-	-
2011	2052 58%	957 27%	274 7.7%	259 7.3%	-	-
2012	2145 61%	916 26%	177 5.0%	292 8.3%	-	-
2013	1850 52%	1107 31%	171 4.8%	340 9.5%	124 3.5%	-
2014	2029 51%	1294 33%	19 0.5%	156 3.9%	486 12.2%	-
2015	1906 51%	1441 39%	77 2.1%	168 4.5%	135 3.6%	2 0.1%
2016	2236 59%	1058 28%	25 0.7%	73 1.9%	116 3.1%	274 7.2%

Uočava se da kompanija British Airways na transatlantskoj ruti ka Njujorku najviše koristi četvoromotorni vazduhoplov B747 serije 400 i dvomotorni vazduhoplov B777 serije 200 čije se učešće u ukupnom broju poletanja u periodu između 2010. i 2016. godine kretalo između 82% (2013) do čak 93% (2010). S obzirom na ovako značajno učešće ova dva tipa vazduhoplova u ukupnoj frekvenciji, jasno je da će promena konfiguracije njihovih putničkih kabina igrati važnu ulogu u ukupnoj vrednosti HHI indeksa.

U tabeli 2 prikazane su različite konfiguracije ova dva tipa vazduhoplova koje British Airways nudi na svojim interkontinentalnim letovima. Generalno, vazduhoplov tipa B777 ima dve serije: seriju – 200 koja se može naći u dve konfiguracije (prva konfiguracija

“V1” ima 224 sedišta, dok druga “V2” ima 275 sedišta). Serija -300 ima samo jednu konfiguraciju sa 299 sedišta, i British Airways ne koristi ovaj tip vazduhoplova na liniji za Njujork. Sa druge strane, vazduhoplov tipa B747 ima čak tri konfiguracije od kojih konfiguracija V1 broji najmanje sedišta (275) i ujedno ima najmanji broj standardnih sedišta (145), konfiguracija V2 ima 299 sedišta i neznatno veći broj standardnih sedišta (185), dok poslednja V3 konfiguracija ima najveći broj sedišta (345) i ujedno najveći broj standardnih sedišta.

Ovakva fleksibilnost u pogledu promene broja sedišta u okviru istog tipa vazduhoplova omogućava aviokompanijama neposredno upravljanje prihodima, a samim tim i prostor za manevrisanje prilikom

kreiranja cene karata što je od presudnog značaja u slučaju postojanja jake konkurencije na rutama.

Tabela 2. Različite konfiguracije vazduhoplova B777 i B747 aviokompanije British Airways [5]

	B777			B747		
	-200 (V1)	-200 (V2)	-300	-400 (V1)	-400 (V2)	-400 (V3)
Standard seats	122	203	185	145	185	243
Recliner Seats ³	40	24	44	30	30	36
Flat bed seats ⁴	48	48	56	86	70	52
Open suites ⁵	14	-	14	14	14	14
Ukupno	224	275	299	275	299	345

Pored koncentracije tržišta koja u velikoj meri direktno određuje jačinu konkurencije, sve aviokompanije su osetljive na cenu goriva s obzirom na to da njeno učešće u ukupnim operativnim troškovima značajno varira usled fluktuacije cene nafte na svetskoj berzi. U periodu između 2007 i 2017, učešće goriva u ukupnim operativnim troškovima aviokompanija dostiže svoj maksimum u 2012. godini kada je iznosilo rekordnih 32.3%, dok 2017. godine učešće znatno opada na 17.3% [6].

S tim u skladu, cena goriva zajedno sa dužinom rute direktno utiče na kreiranje cene karata. Kako bi se ove dve promenljive uvrstile u model, izvedena je treća promenljiva Gorivo koja je izražena u dolarima, a pri čijem se izračunavanju uzelo u obzir i rastojanje između posmatranih parova aerodroma. Naime, vrednosti o potrošnji goriva različitih tipova vazduhoplova za sve tri faze leta (penjanje, krstarenje i poniranje) i za različite nivoe leta izražene u kg/min mogu se naći u Erocontrol-ovim izveštajima [7].

Na osnovu podataka sa Flight Radar-a utvrđen je nivo krstarenja za svaki tip vazduhoplova na posmatranoj ruti i na osnovu toga očitane su odgovarajuće vrednosti o potrošnji iz AEM-a pomnožene sa prosečnim trajanjem leta. Ovako dobijena vrednost pomnožena je sa cenom goriva po kilogramu na kvartalnom nivou [8] i na taj način je dobijena ukupna cena goriva posmatrane aviokompanije na datoj ruti na kvartalnom nivou. Na taj način, dužina rute kao važna promenljiva koja utiče na cenu karte inkorporirana je kroz vreme trajanja leta.

³Sedište sa podesivim naslonom

⁴Sedišta koja se mogu rasklopiti do potpuno horizontalnog položaja

⁵Mala privatna kabina sa udobnim sedištem koji se razvlači do potpuno horizontalnog položaja

2.2. Utvrđivanje zavisnosti između promenljivih

Sve promenljive su normalizovane prirodnim logaritmom kako bi se omogućila lakša interpretacija koeficijenata u modelu, što jedino nije bio slučaj sa promenljivom Gorivo čije su vrednosti u izvornom obliku imale približno normalnu raspodelu. U tabelama 3 i 4 date su vrednosti deskriptivne statistike kao i korelacione matrice između promenljivih.

Tabela 3. Deskriptivna statistika

Promenljive	Srednja vrednost	Std.devijacija	Min.	Max.
CenaBAW (U.S \$)	1534	159	1238	1883
Putnici BAW	197705	31415	127495	249606
Putnici NAX	23383	7953	10552	31925
Gorivo (mil. U.S \$)	41.8	14.2	17.2	63.5
HHI _{min}	1646	72	1544	1800
HHI _{mid}	1665	72	1553	1830
HHI _{max}	1740	78	1642	1930

Korelaciona matrica prikazana u tabeli 4 potvrđuje očekivane odnose između parova posmatranih promenljivih. Uočava se da je zavisna promenljiva CenaBAW u pozitivnoj korelaciji sa brojem putnika kompanije British Airways, a negativno korelisana sa brojem putnika aviokompanije Norwegian Airlines i cenom goriva.

Tabela 4. Korelaciona matrica

	1	2	3	4	5	6	7
1. Cena BAW	1	-	-	-	-	-	-
2. Putnici BAW	0.52	1	-	-	-	-	-
3. Putnici NAX	-0.43	-0.12	1	-	-	-	-
4. Gorivo	-0.27	0.25	-0.61	1	-	-	-
5. HHI _{min}	0.66	0.48	-0.64	0.08	1	-	-
6. HHI _{mid}	0.63	0.43	-0.64	0.01	0.98	-	-
7. HHI _{max}	0.64	0.53	-0.68	0.07	0.97	0.98	1

2.3. Model

Empirijski model kojim se utvrđuje uticaj prethodno opisanih varijabli na prosečnu cenu karte aviokompanije British Airways na liniji London - Njujork data je sledećom regresionom jednačinom:

$$\ln \text{CenaBAW}_t = \alpha_0 + \alpha_1 \ln \text{PutniciBAW}_t + \alpha_2 \text{HHI}_t + \alpha_3 \text{Gorivo}_t + \alpha_4 \ln \text{PutniciNAX}_t + \text{Dummy}_t + \varepsilon_t \quad (2)$$

Sve promenljive u modelu su bile detaljno opisane u prethodnom poglavlju. Sve vrednosti promenljivih date su na kvartalnom nivou (t). Varijabla Dummy je binarna promenljiva i služi za indikaciju ulaska niskotarifne aviokompanije Norwegian na tržište. Kako bi se detaljnije utvrdio uticaj koncentracije na cenu karte dominantnog prevozioca British Airways na tržištu putovanja između Londona i Njujorka, model je ocenjen za različite strategije promene konfiguracije putničke kabine kroz promenu broja sedišta. Na taj način, moguće je sagledati uticaj primene različitih strategija

promene kapaciteta vazduhoplova koji je indirektno izražen preko indeksa HHI u modelu.

3. KALIBRACIJA MODELA I REZULTATI

Kalibracija ovog modela izvršena je korišćenjem metode najmanjih kvadrata. Ukupan broj opservacija iznosio je 44, a ukupan broj podataka u modelu 220 (44x5).

Rezultati modela prikazani u tabeli 5 ukazuju da je model u celini značajan, a ocenjeni parametri u modelu u skladu sa očekivanjima.

Tabela 5. Rezultati regresione analize

LnCenaBAW	Koeficijent	Std. greška	LnCenaBAW	Koeficijent	Std. greška	LnCenaBAW	Koeficijent	Std. greška
Konstanta	-4.25e+00	2.27e+00*	Konstanta	-3.45e+00	2.45e+00	Konstanta	-2.94e+00	2.46e+00
Ln (PutniciBA)	3.75e-01	1.12e-01**	Ln PutniciBAW	4.07e-01	1.16e-01**	Ln PutniciBAW	3.88e-01	1.23e-01**
lnHHI _{min}	9.79e-01	3.30e-01**	lnHHI _{mid}	8.16e-01	3.48e-01*	lnHHI _{max}	7.75e-01	3.68e-01*
Gorivo	-4.98e-09	1.69e-09**	Gorivo	-4.93e-09	1.79e-09*	Gorivo	-5.01e-09	1.82e-09*
Ln (PutniciNA)	-9.23e-02	5.36e-02*	Ln (PutniciNAX)	-9.92e-02	5.73e-02*	Ln (PutniciNAX)	-1.00e-01	5.92e-02*
Dummy	8.65e-01	5.18e-01	Dummy	9.33e-01	5.53e-01	Dummy	9.42e-01	5.73e-01
R ² =0.70			R ² =0.66			R ² =0.65		

**, * i * označavaju da su promenljive značajne sa 1%, 5% i 10% značajnosti

Drugim rečima, veća putnička potražnja za letovima British Airways-a indukuje veće cene karata. Takođe, veća koncentracija igrača na tržištu generiše i veće cene karata dominantnog prevozioca, nalaz koji se vrlo često može naći u literaturi. Promenljiva Gorivo ima očekivan negativni znak i statistički je značajna. Takođe, rezultati potvrđuju da je prisustvo Norwegian-a na tržištu uticalo na prevozioca British Airways da snizi cene svojih karata što je potvrđeno negativnim znakom koeficijenta promenljive PutniciNax (sa značajnošću od 10%). Modelom je procenjeno da 10% povećanja putnika kompanije Norwegian utiče na smanjenje cene karata British Airways od oko 1%.

Modelom je generalno potvrđeno da je veća koncentracija na tržištu direktno povezana sa većim vrednostima cene karata. Međutim, u nastojanju da se utvrdi kako promena kapaciteta vazduhoplova dominantnog prevozioca utiče na cenu kartu, izvršena je analiza osetljivosti i model je kalibrisan za promenu indeksa HHI. Promena indeksa HHI izvršena je na osnovu tabele 2, gde su kapaciteti vazduhoplova koji saobraćaju na liniji London Njujork varirani od svog najmanjeg do svog maksimalnog kapaciteta (tj. broja sedišta u putničkoj kabini). Rezultati ove analize nedvosmisleno ukazuju da bi se uticaj koncentracije tržišta na cenu karte prevozioca British Airways postepeno smanjivao u slučaju da British Airways povećava kapacitet (tj. broj sedišta u putničkim kabinama odgovarajućih vazduhoplova), dok bi negativan efekat Norwegian-a (izražen kroz broj putnika) na cenu karte British Airways postajao sve veći.

Iako su očekivani znakovi i vrednosti koeficijenata promenljivih ostali nepromenjeni u slučaju promene kapaciteta putničke kabine dominantnog prevozioca, dobijene vrednosti, ipak intuitivno nisu očekivane na prvi pogled i posledica su hipotetičkog sagledavanja stanja i usvajanja različitih strategija na tržištu.

Kako bi se model što više približio realnom stanju na tržištu, bilo je potrebno pretpostaviti drugačiji scenario. Naime, postojanje manjeg broja sedišta na letovima British Airways je direktna posledica konfiguracije putničke kabine u kojoj se nalazi veći broj klasa.

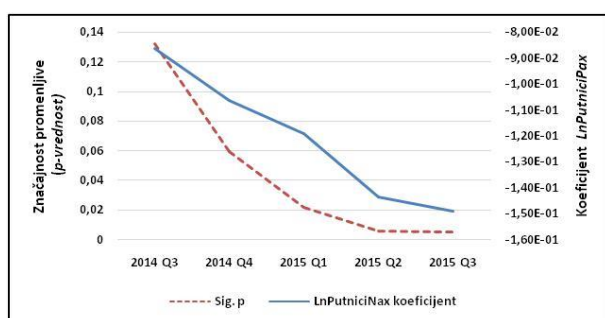
Povećanje broja sedišta u višim klasama na račun smanjenja broja sedišta u ekonomskoj klasi je direktna strategija koju aviokompanija koristi kako bi povećala svoje prihode s obzirom da putnici u prvoj i premijum klasi plaćaju mnogo veće cene karata. Ovakva strategija je naročito efikasna u slučaju kada je prevoznik dominantan na ruti, tj. kada je uticaj ostalih konkurenata mali.

U konkretnom slučaju to bi značilo da bi do ulaska niskotarifne aviokompanije Norwegian, aviokompanija British Airways na svojim letovima saobraćala sa najmanjim kapacitetom (tj. najmanjim brojem sedišta u putničkoj kabini), a da bi tek po ulasku niskotarifnog konkurenta rekonfigurisala putničku kabinu i prešla na maksimalni broj sedišta. Ovakva strategija bi joj omogućila da ponudi što veći broj mesta u ekonomskoj klasi kao direktan odgovor na prisustvo konkurencije i niske cene koje konkurent nudi na svojim letovima. Ovakva hipoteza potvrđena je i izjavom direktora IAG

korporacije, Vili Valša, koji je izjavio da bi povećanje broja sedišta na transatlantskim letovima omogućilo aviokompaniji British Airways da se uspešno izbori sa novonastalom konkurencijom na tržištu [9].

S tim u skladu pretpostavili smo da je neposredno pred ulazak Norwegian-a, British Airways na svojim letovima ka Njujorku saobraćao sa minimalnim kapacitetom, a da je nakon ulaska Norwegian-a primenio strategiju povećanja broja sedišta.

Rezultati modela (slika 1) su pokazali da bi u slučaju brzog odgovara British Airways-a (treći kvartal 2014) na prisustvo konkurencije koja se ogleda kroz strategiju povećanja broja sedišta, uticaj aviokompanije Norwegian bio veoma mali i bez statističke značajnosti.



Slika 1 – Uticaj promenljive $\ln\text{PutniciNax}$ na cenu konkurenta British

U slučaju da British Airways odloži primenu strategije povećanja kapaciteta, uticaj aviokompanije Norwegian raste zajedno sa njegovom statističkom značajnošću, kao što je to prikazano punom linijom na slici 1.

Nesumnjivo je da primena strategije povećanja kapaciteta od strane British Airways-a nije zanemarljiva s obzirom na to da bi njena kasna implementacija (kao što je to slučaj sa trećim kvartalom 2015. gde 10% povećanja putnika kompanije Norwegian utiče na smanjenje cene karte kompanije British Airways od skoro 2% na kvartalnom nivou) zasigurno dovela da većeg uticaja na cenu karata ovog prevozioca.

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan model zasnovan na regresionoj analizi koji omogućava utvrđivanje uticaja različitih promenljivih na cenu karte avioprevozioca British Airways na liniji London – Njujork. Pored cene goriva koja tradicionalno utiče na cenu karte, što je potvrđeno i ovim modelom, i nekoliko drugih promenljivih ima statističku značajnost.

Pre svega, koncentracija tržišta ima pozitivan uticaj na povećanje cene karte što nije iznenađujuće s obzirom na to da je British Airways dugo godina bio dominantni prevozioc na ovoj ruti. Ono što treba istaći kao glavni nalaz ovog istraživanja jeste da su rezultati

pokazali da je uticaj niskotarifne aviokompanije Norwegian Airlines, iako mali u procentima, statistički značajan i da bi takav uticaj u budućnosti možda mogao ozbiljnije da ugrozi prihode dominantnog prevozioca British Airways.

Rezultati ukazuju da odlaganje strategije povećanja kapaciteta od strane British Airways-a povećava konkurentski pritisak koji Norwegian Airlines generiše kroz niske cene svojih usluga. Zbog svega navedenog, jasno je da će i u budućnosti British Airways brižljivo razvijati strategije kako bi smanjio pritisak ove niskotarifne aviokompanije.

5. NAPOMENA

Ovaj rad predstavlja deo istraživanja projekta pod evidencionim brojem 36033 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (2011-2018).

LITERATURA

- [1] Routes Online (2017) Norwegian plans MAXimum disruption to legacy carriers with Transatlantic network growth. [Internet] Dostupno na: https://www.routesonline.com/news/29/breaking-news/271551/-norwegian-plans-maximum-disruption-to-legacy-carriers-with-transatlantic-network-growth/?utm_medium=email&utm_source=the-hub&utm_campaign=the-hub-EU&utm_content=the-hub-20170224 [citirano 29.12.2017].
- [2] Wilken D, Berster P, Gelhausen CM. Analysis of demand structures on intercontinental routes to and from Europe with a view to identifying potential for new low-cost services, *Journal of Air Transport Management*, Vol. 56, Part B, pp. 79-90, 2016.
- [3] Borenstein S. Hubs and High Fares: Dominance and Market Power in the U.S. Airline Industry, *RAND Journal of Economics*, Vol. 20, No. 3, pp. 344–365, 1989.
- [4] Cho W, Windle JR, Hofer C. Route Competition in Multi-Airport Cities: An Analysis of US Air Fares, *Transportation Journal*, Vol. 51, No. 3, pp. 265-288, 2012.
- [5] Fleet facts, 2017, [Internet]. Dostupno na: <https://www.britishairways.com/en-gb/information/about-ba/fleet-facts> [citirano 27.12.2017]
- [6] IATA Fact Sheet - Fuel, 2017. [Internet]. Dostupno na: https://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Documents/fact-sheet-fuel.pdf [citirano 28.12.2017]
- [7] Eurocontrol, 2017, Aircraft performance summary tables: Base of Aircraft Data. [Internet]. Dostupno

- na: <https://www.eurocontrol.int/aircraft-performance-summary-tables-base-aircraft-data> [citirano 28.12.2017]
- [8] IATA – Economics Jet Fuel Price Monitor [Internet]. Dostupno na: <http://www.iata.org/publications/economics/fuel-monitor/Pages/index.aspx> [citirano 28.12.2017]
- [9] Independent, 2016. British Airways to shrink seat space to squeeze more passengers on to flights. [Internet]. Dostupno na: https://www.iata.org/pressroom/facts_figures/fact_sheets/Documents/fact-sheet-fuel.pdf [citirano 28.12.2017]

SUMMARY

THE IMPACT OF LOW-COST CARRIER ON TRADITIONAL AIRLINE' FARES ON INTERCONTINENTAL ROUTES

Norwegian Airlines was one of the first airlines in the world that introduced the low cost business model for long haul flights. Low airfares this airline managed to offer for its intercontinental flights have seriously jeopardized the traditional carriers forcing them to start applying different counter strategies in order to reduce the pressure of competition. Empirical results obtained by applying regression analysis for the route from London to New York show that presence of the low cost carrier, Norwegian Airlines, exerts small, yet statistically significant influence upon reduction of airfares by British Airways which was for many years the dominant airline on this route. Moreover, the results of the model underline the importance of applying the "seat capacity increase" strategy in British Airways' economy class, which proved to be an efficient business tool bringing good results with relatively low investments in a short period of time.

Key words: *competition, new generation of aircrafts, long-haul low cost business model*