

ПОВЕЋАЊЕ ЕФИКАСНОСТИ ПРЕТВАРАЧА ЕНЕРГЕТСКЕ ЕЛЕКТРОНИКЕ - II дио *

IMPROVING EFFICIENCY OF POWER ELECTRONICS CONVERTERS - PART II

Миломир Шоја, Марко Икић, Младен Бањанин, *ЕТФ Источно Сарајево*
Милан Радмановић, *ЕФ Ниш*

Садржај - У овом раду је дата анализа ефикасности претварача енергетске електронике и могућности за њено повећање паралелним везивањем више претварача са одговарајућом стратегијом укључивања/искључивања. Проведена анализа показује да се на тај начин може значајно повећати ефикасност у практично свим областима њихове примјене.

Abstract - In this paper, the analysis efficiency of power electronics convertesr and increase the possibilities for its binding multiple parallel converter with the appropriate strategy for on/off are presented. Conducted analysis shows that in this way can significantly increase the efficiency in virtually all areas of their application.

1. УВОД

У првом дијелу рада дати су основни поступци и методе за повећање ефикасности претварача енергетске електронике (Ее): избор оптималне топологије, оптимизовано пројектовање, примјена дигиталног управљања. Посебна пажња посвећена је избору прекидачке фреквенције и новим типовима полупроводничких прекидача. Показано је да се ефикасност може значајно повећати провођењем одговарајућих пројектантских поступака и метода, те коришћењем модерних снажних прекидача у енергетском и дигиталних компоненти у управљачком дијелу претварача.

Овдје је дата анализа губитака у претварачу са циљем бољег разумијевања узрока настанка појединих врста губитака и њиховог утицаја на ефикасност претварача, одређена је крива ефикасности и указано на неке начине за њено побољшање. Приказан је и нови поступак за повећање ефикасности, паралелно везивање више претварача са примјеном одговарајуће стратегије њиховог укључивања, који би требао доживјети значајну примјену, посебно код обновљивих извора енергије.

2. АНАЛИЗА ЕФИКАСНОСТИ ПРЕТВАРАЧА Ее

Нека функција $P_{loss}(x)$ представља губитке у претварачу Ее, гдје је x излазна или улазна струја. Губици се могу представити полиномом:

$$P_{loss}(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + \dots + a_nx^n, \quad (1)$$

чији константни чланови $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ одговарају различитим узроцима настанка губитака [1] [2]. На пр., a_0 представља константне губитке који су независни од улазне/излазне струје. Ту спадају: губици укључења/искључења прекидача, губици у језгру трансформатора, губици због пуњења и пражњења паразитних капацитета, потрошња управљачке електронике и заштитних кругова. Губици које репрезентује члан a_1 су директно зависни од

излазне/улазне струје и јављају се као губици у диодама, прекидачки губици и губици због „мртвог“ времена код синхроних исправљача. Код диода, овај тип губитка је повезан са напоном p_n споја у стању вођења и реверзним опоравком код гашења. Прекидачки губици полупроводничких прекидача такође су пропорционални струји. Трећи члан (a_2) одговара губицима провођења. За њих су одговорне отпорности полупроводничких прекидача, намотаја и веза те мјерних претварача, као и магнетна поља и струја која тече кроз кондензатор. Чланови већег реда могу бити корисни у прорачуну нелинеарних губитака (на пр. губици у језгру). За задовољавајућу апроксимацију губитака реалног претварача довољно је узети у обзир три прва члана (1).

$$P_{loss}(i_o) = a_0 + a_{1,o}i_o + a_{2,o}i_o^2 \quad (2.1)$$

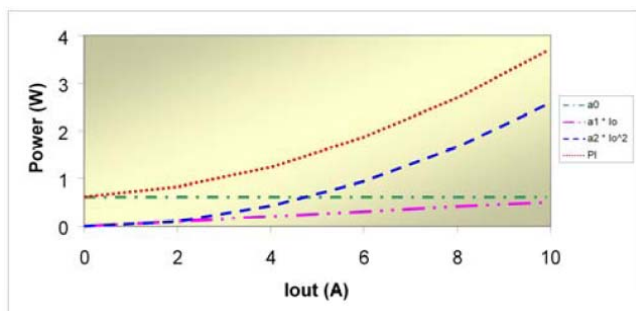
$$P_{loss}(i_{in}) = a_0 + a_{1,in}i_{in} + a_{2,in}i_{in}^2 \quad (2.2)$$

На основу (2.1) и (2.2) могуће је добити одговарајуће изразе за ефикасност:

$$\eta(i_o) = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{v_o i_o}{v_o i_o + a_0 + a_{1,o}i_o + a_{2,o}i_o^2}, \quad (3.1)$$

$$\eta(i_{in}) = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} = \frac{v_{in} i_{in} - (a_0 + a_{1,in}i_{in} + a_{2,in}i_{in}^2)}{v_{in} i_{in}}. \quad (3.2)$$

На **Сл.1.** су приказани укупни, и губици који одговарају појединим члановима (коэффициентима). Примјећује се да су при пуном оптерећењу, у датом случају, доминантни губици провођења. Коэффициенти a_0, a_1, a_2 се одређују експериментално, мјерењем губитака у три радне тачке и формирањем и рјешавањем система од три једначине са три непознате. Поступак се поједностављује и своди на рјешавање двије једначине са двије непознате, ако се једно мјерење губитака оствари када је претварач неоптерећен (измјерени губици директно једнаки коэффициенту a_0).



Сл.1. Губици у претварачу (прва три члана) [1]

Послије одређивања коефицијената могуће је нацртати криву губитака, као на Сл.1., или криву ефикасности. Показало се да је слагање експериментално одређених кривих губитака и ефикасности са кривим добијеним апроксимацијом полиномом од три члана веома добро (разлика <2 %) [1]. Приказани метод за одређивање губитака у претварачу Ее даје пројектанту корисне информације за разумијевање узрока њиховог настанка и добре могућности за анализу кола при различитим начинима рада (прекидна и непрекидна струја, импулсни и рад са промјенивом фреквенцијом) као и за повећање ефикасности. Експерименталном одређивању коефицијената губитака треба приступити опрезно, јер се на пр. губици провођења *PFC* подизача могу промијенити чак 35 пута при раду са универзалним улазним напонем (90–270 V_{AC}, V_{OUT} = 400 V) [2].

Добијене функције (3.1) (3.2) могуће је избором параметара a_0 , a_1 , a_2 оптимизовати, са циљем постизања максималне средње ефикасности. Максимуми ефикасности, у зависности од излазне/улазне струје, једнаки су: [3]

$$\eta_{\max} = \frac{v_o}{v_o + a_{1,o} + 2\sqrt{a_0 a_{2,o}}} \quad (4.1)$$

и

$$\eta_{\max} = \frac{v_{in} - a_{1,in} - 2\sqrt{a_0 a_{2,in}}}{v_{in}} = 1 - \frac{a_{1,in} + 2\sqrt{a_0 a_{2,in}}}{v_{in}}, \quad (4.2)$$

а дешавају се при струјама:

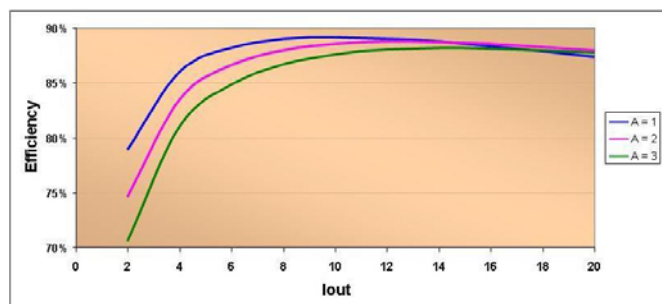
$$i_{opt} = \sqrt{\frac{a_0}{a_{2,o}}}, \quad i_{opt} = \sqrt{\frac{a_0}{a_{2,in}}} \quad (5)$$

Из (5) се види да коефицијент a_1 нема утицаја на вриједност струје при којој је ефикасност максимална. То је последица чињенице да је a_1 повезан са губицима који су, као и снага, директно пропорционални струји. Осим тога, ефикасност је оптимална у тачки у којој су константни губици и губици провођења једнаки. Из овога слиједи да је могуће оптимизовати ефикасност све док постоји контрола над компонентама које одређују вриједност a_0 и a_2 . Независно од тога треба радити на смањењу вриједности a_1 , ради побољшања укупне ефикасности. Пошто се на смањење a_1 не може утицати избором топологије, већ само избором компоненти бољих карактеристика, најбољи резултати постижу се

коришћењем нове генерације компоненти (*SiC*, *GaN* диоде). Минимизацију губитака одређених са a_1 треба спровести водећи рачуна и о цијени претварача.

На вриједности a_0 и a_2 се може утицати правилним избором прекидача (*MOSFET*). На пр., избор снажног *MOSFET*-а са одговарајућом површином (полипроводника) и активним отпором $R_{DS(on)}$, утиче на управљачке, губитке излазног кондензатора и губитке круга заштите од пренапона. $R_{DS(on)}$ и губици провођења су инверзно, а паразитни капацитети и прекидачки губици који су с њима повезани, директно пропорционални површини. Због тога је могуће изабрати оптималну комбинацију површине и отпорности. У [1] је показано да су губици минимални у широком подручју површина, што пројектантима даје велику флексибилност у тражењу компромиса између цијене *MOSFET*-а и смањења губитака.

На Сл.2. је приказана зависност ефикасности од три нормализоване површине *MOSFET*-а (површина 3 је три пута већа од површине 1), све три из подручја минималних губитака.



Сл.2. Ефикасности у функцији површине *MOSFET*-а [1]

При малим оптерећењима површина 3 има смањену ефикасност због већих прекидачких губитака, док при већим оптерећењима површина 1 има повећане губитке провођења. Најбољи избор је површина 1, јер је на малим оптерећењима много ефикаснија, а при великим оптерећењима само нешто мало мање ефикасна од 3.

3. ПОВЕЋАЊА ЕФИКАСНОСТИ ПАРАЛЕЛНИМ ВЕЗИВАЊЕМ ПРЕТВАРАЧА

Потпуно нове, и то веома значајне, могућности за повећање ефикасности претварача Ее доноси концепција заснована на паралелном везивању више, идентичних, претварача, са одговарајућом стратегијом њиховог укључивања/искључивања. Нека је потребно помоћу претварача Ее реализовати напајање потрошача чија се снага мијења од 0- P_{nom} , тако да ефикасност буде максимална. На располагању су, ради једноставније анализе, идентични претварачи чије су снаге $P_n = P_{nom}/n$ (n -број претварача) и коефицијенти корисног дејства (ефикасност) η_n , а који се могу везивати паралелно директним спајањем излазних прикључака и укључивати/искључивати по жељи. Могуће су двије стратегије за реализацију система напајања, у зависности од начина укључивања/искључивања појединачних претварача.

C₁: Нека је свих n претварача стално укључено и нека равномерно дијеле струју (уобичајени случај). Систем се понаша као један претварач и његова ефикасност (η_1) одговара ефикасност појединачног претварача (η_n):

$$\eta_1 = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{nP_n}{nP_n + np_{n,loss}} = \frac{P_n}{P_n + p_{n,loss}} \quad (6)$$

- P_{out} : тренутна излазна снага n претварача,
- P_{in} : тренутна улазна снага n претварача,
- P_n : тренутна снага једног претварача,
- $p_{n,loss}$: тренутни губици једног претварача.

Основне мане овакве стратегије су ниска ефикасност система напајања при малим оптерећењима, као и чињеница да су сви претварачи увијек укључени, што им потенцијално смањује поузданост и животни вијек.

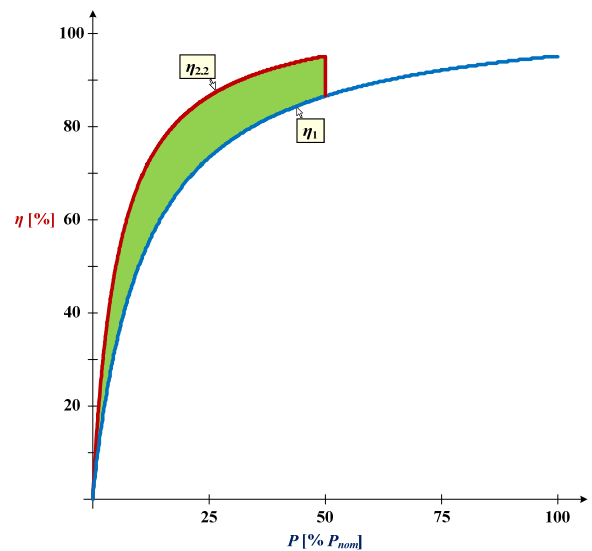
C₂: Ако се следећи (n -ти) претварач укључује тек пошто ју претходних ($n-1$) укључених претварача оптерећено номиналном снагом P_n , онда је ефикасност система напајања дата изразом:

$$\eta_2 = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{(n-1)P_n + p_n}{(n-1)(P_n + P_{n,loss}) + p_n + p_{n,loss}} \quad (7)$$

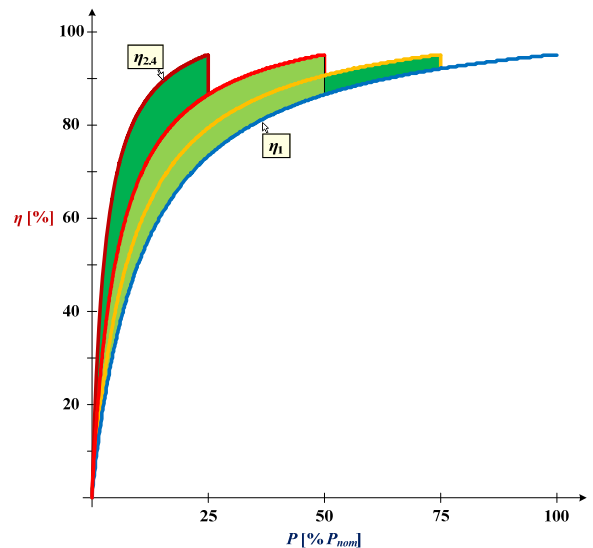
- P_{out} : тренутна излазна снага n претварача,
- P_{in} : тренутна улазна снага n претварача,
- P_n : номинална снага (једног) претварача,
- p_n : тренутна снага једног претварача,
- $P_{n,loss}$: губици претварача при номиналној снази,
- $p_{n,loss}$: тренутни губици једног претварача.

На сликама које слиједи дати су примјери паралелног везивања **2, 4 и 5** претварача, који илуструју предности, у смислу повећања ефикасности, које доноси примјена стратегије **C₂** укључивања паралелно везаних претварача. Ради једноставности, дати примјери су урађени уз претпоставку да су губици претварача у цијелом дијапазону снага константни, што не умањује општост рјешења. У случају другачијих кривих ефикасности (максимум ефикасности се дешава при снази која је $<P_n$) суштина стратегије остаје иста, само се прагови укључења/искључења појединих претварача пралагођавају конкретної ситуацији.

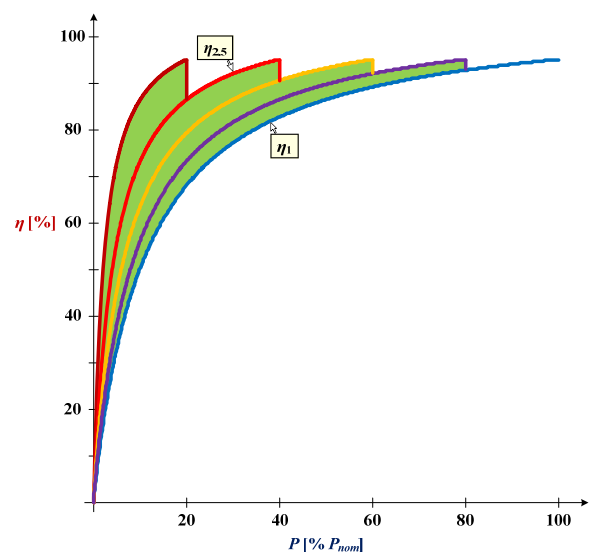
Затамњена површина, на дијаграмима ефикасности, представља повећање које доноси примјена **C₂** у односу на **C₁**. Евидентно је повећање ефикасности, не само при раду са малим снагама, него у цијелом дијапазону рада у коме је укључено ($n-1$) претварача. Када су сви претварачи укључени, ефикасност је идентична као код **C₁**. На **Сл.2.** се уочава разлика у повећању ефикасности коришћењем **4** у односу на **2** претварача. Теоријски, што је већи број претварача то су и могућности повећања ефикасности веће. Међутим, у пракси постоји ограничење броја претварача које је могуће паралелно везати, а да се ефикасност и даље повећава. Већи број претварача значи умањење појединачне снаге, што последице одређене границе доводи до умањења ефикасности појединачног претварача (константне губитке није могуће даље смањивати), што се негативно одражава на укупну ефикасност.



Сл.3. Повећање ефикасности паралелним везивањем 2 претварача



Сл.4. Повећање ефикасности паралелним везивањем 4 претварача



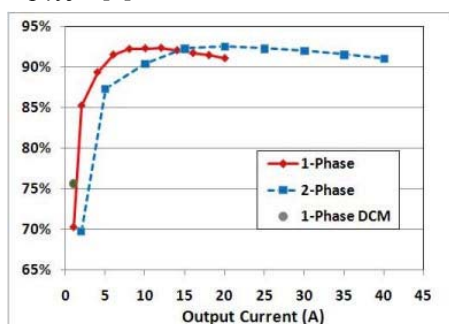
Сл.5. Повећање ефикасности паралелним везивањем 5 претварача

Велика предност C_2 је и могућност равномјерног распоређивања укључености појединачних претварача са циљем повећања поузданости и продужења животног вијека (претварачи су укључено минимално вријеме које је потребно за остварење функције).

У поређењу са једним претварачем снаге P_{nom} , n паралелно везаних претварача са C_2 укључивањем доноси побољшање ефикасности и при малим (смањени прекидачки губици) и при великим снагама (смањени губици провођења).

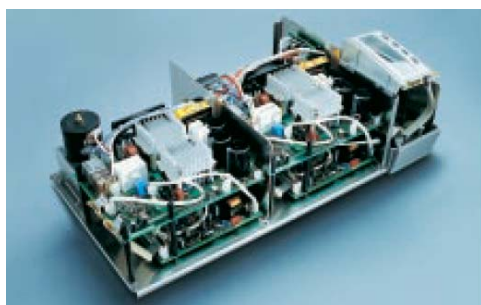
Могуће је пронаћи практичне примјере који потврђују исправност стратегије C_2 .

Вишефазни претварачи: Овај тип претварача замишљен је да, у нормалним околностима, ради према стратегији C_1 . У првом дијелу рада је приказано како дигитално управљање бројем укључених фаза (*phase shedding*), које се практично своди на примјену C_2 , може значајно повећати ефикасност вишефазног претварача. На Сл.6. је дат примјер ефикасности двофазног форверд претварача, који то потврђује. [4]



Сл.6. Ефикасност форверд претварача са два транзистора и вишефазним управљањем [4]

FRONIUS IG 40/60 PV инвертор [5]: Код овог типа инвертора за примјену у *PV* системима напајања је примјењен тзв. **MIX™ CONCEPT** (*Master Inverter X-Change concept*). Ради се о инвертору који се састоји од два модула (Сл.7.) који се укључују у зависности од оптерећења и могућности соларних панела да дају електричну енергију.



Сл.7. Инвертор FRONIUS IG 40/60 [5]

У случају смањене снаге ради само „надређени“, док се при пуној снази укључује и „подређени“ модул. Ефикасност претварача и искоришћење соларног панела су значајно повећани. Интелигентни управљачки систем мијења улогу „надређеног“ и „подређеног“, у зависности од тога колико дуго који ради. Тако се смањује на минимум број радних сати сваког претварача. Осим тога,

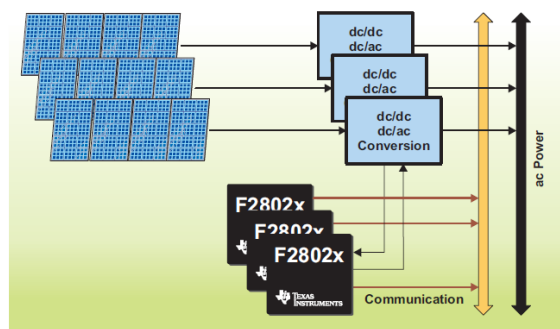
у случају кvara једног претварача други наставља несметано да ради. Оба претварача су интегрисана у једно кућиште што смањује вријеме и поједностављује ожичавање и инсталацију.

Велике могућности за примјену стратегије C_2 нуде и тзв. **микроинвертори** (Сл.8.) [6] [7], који су, због низа предности које доносе у односу на класична рјешења са **централним** инвертором, све заступљенији у *PV* системима напајања. Микроинвертори су засновани на концепцији „један соларни панел-један инвертор“. Основни побољшање, кога доноси овај приступ, је да систем наставља са претварањем енергије и у случају кvara појединачног инвертора. Следећа важна предност је могућност прилагођавања параметара претварача сваком панелу. Облаци, сјене и друге појаве у окружењу могу утицати на карактеристике појединих панела. Опремање сваког панела микроинвертором дозвољава систему да се прилагоди тим утицајима, што обезбјеђује оптималну ефикасност претварања индивидуалних панела, али и читавог система.



Сл.8. Микроинвертори [7]

Архитектура система напајања са микроинверторима (Сл.9) омогућава поједностављивање ожичења (мањи трошкови инсталације) и смањење губитака у једносмјерном кругу. Праћење стања панела и читавог система је такође побољшано. Велике фарме соларних панела захтијевају посебне системе за међусобну комуникацију да би одржали равнотежу оптерећења и планирали колико ће у будућности бити расположиве енергије и шта радити са њом. Уграђени периферали (*SPI*, *UART*, и тд.) поједностављују комуникацију између појединих микроинвертора у систему.



Сл.9. Примјер ефикасног *PV* система са микроинверторима [6]

Примјена микроинвертора доноси значајну предност и у погледу надоградње постојећег *PV* системима напајања, која је максимално поједностављена и своди се на набавку потребног броја нових панела са микроинверторима. Иако су овакви соларни панели нешто скупљи од класичних, елиминисањем цијене

централног инвертора постигнуто је да је укупна цијена система практично једнака.

Слични резултати могу се постићи и употребом микроинвертора у система са енергијом вјетра.

Тренутно се микроинвертори повезују у систем напајања према стратегији управљања C_1 . Градња микроинвертора од неколико паралелних јединица омогућила би примјену C_2 и даље повећање његове ефикасности и степена искоришћења соларног панела и читавог система. Осим тога, у постојећи управљачки систем за праћење и надгледање могуће је, без додатних улагања, уградити C_2 и укључити онолико микроинвертора колико је заиста потребно за напајање конкретног оптерећења, и тако бољим искоришћењем појединачних микроинвертора и панела даље повећати ефикасност читавог система напајања.

4. ЗАКЉУЧАК

Проведена анализа губитака претварача омогућава боље разумијевање њиховог настанка и указује на могуће правце побољшања ефикасности. Принцип паралелног везивања више претварача, са одговарајућом стратегијом укључења, нуди нове значајне могућности за повећање ефикасности, што потврђују и најновија достигнућа примјењена у PV системима напајања.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Robert Kollman, "Power Tip #11: Resolve Power Supply Circuit Losses", POWER MANAGEMENT Design Line, June 2009., (www.powermanagementdesignline.com),
- [2] Lars Petersen, "High Efficient Rectifiers", Ph.D. Thesis, Ørsted•DTU, Automation Technical University of Denmark, August 2003.,
- [3] Robert Kollman, "Power Tip 12: Maximize Power Supply Efficiency", POWER MANAGEMENT Design Line, June 2009.,
- [4] Yang Qiu, "Improving the interleaved DC/DC converter", POWER MANAGEMENT Design Line, September, 2008.,
- [5] FRONIUS INTERNATIONAL GMBH, 2009.,(www.fronius.com),
- [6] Keith Ogboenyi, "Taking Energy Efficiency to the Next Level", Texas Instruments, SPRAAZ6-September 2008.,
- [7] Graham Jesme, "Solar Power Optimizers Gaining Market Share", November, 2009., (www.RenewableEnergyWorld.com),

* Рад је настао у оквиру пројекта „РАЗВОЈ МРРТ ПРЕТВАРАЧА ЗА ПРИМЈЕНУ У СОЛАРНИМ СИСТЕМИМА НАПАЈАЊА“, Министарство науке и технологије у Влади РС (Рјешење број: 19/6-020/961-174/09 од 31.12.2009. год.)