



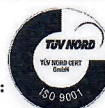
УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централa: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndean@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАЏМЕНТА
СЕРТИФИКОВАН ОД:



Наш број: 01.сл

Ваш број:

Датум: 2016-12-07

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научно веће Факултета техничких наука у Новом Саду, на 26. редовној седници одржаној дана 30.11.2016. године, донело је следећу одлуку:

-непотребно изостављено-

ТАЧКА 11. Питања научноистраживачког рада и међународне сарадње

Тачка 11.9.: На основу позитивног извештаја рецензената верификује се техничко решење (М85) под називом:

"ПРОТОТИП ВИШЕФАЗНОГ СПРЕГНУТОГ ИНДУКТОРА СА ФЕРИТНИМ ЈЕЗГРОМ"

Аутори техничког решења: Никола Лечић, Снежана Ђурић, Милан Радовановић, Горан Стојановић.

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:
Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник



Декан

Проф. др Раде Дорословачки



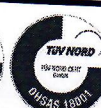
УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Доситеја Обрадовића 6, 21000 Нови Сад, Република Србија
Деканат: 021 6350-413; 021 450-810; Централa: 021 485 2000
Рачуноводство: 021 458-220; Студентска служба: 021 6350-763
Телефакс: 021 458-133; e-mail: ftndean@uns.ac.rs

ИНТЕГРИСАНИ
СИСТЕМ
МЕНАДЖМЕНТА
СЕРТИФИКОВАН ОД:



Наш број: 01-сл

Ваш број:

Датум: 2016-11-03

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научно веће Факултета техничких наука у Новом Саду, на 25. редовној седници одржаној дана 26.10.2016. године, донело је следећу одлуку:

-непотребно изостављено-

ТАЧКА 10. Питања научноистраживачког рада и међународне сарадње

Тачка 10.2.11: У циљу верификације новог техничког решења усвајају се рецензенти:

- Проф. др Вера Марковић, Електронски факултет у Нишу
- Др Данијела Ранђеловић, научни саветник, Институт за хемију, технологију и металургију, Универзитет у Београду

Назив техничког решења:

"ПРОТОТИП ВИШЕФАЗНОГ СПРЕГНУТОГ ИНДУКТОРА СА ФЕРИТНИМ ЈЕЗГРОМ"

Аутори техничког решења: Никола Лечић, Снежана Ђурић, Милан Радовановић, Горан Стојановић.

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:
Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник



Декан

Проф. др Раде Дорословачки

Прототип:

Прототип вишефазног спрегнутог индуктора са феритним језгром

Руководилац пројекта: ред. проф. др Владимир Срдих,

Одговорно лице: ред. проф. др Горан Стојановић

Аутори: Никола Лечић, Снежана Ђурић, Милан Радовановић, Горан Стојановић

Развијено: у оквиру пројекта технолошког развоја III45021

Година: 2016

Примена: 01.11.2016

Кратак опис

Реализован је симетрични дизајн вишефазних спрегнутих индуктора код којих сви фазни индуктори деле једно, заједничко, феритно језгро. Пројектовани вишефазни индуктори су израђени у технологији штампаних кола (*printed circuit board* - PCB). Дизајниране су једнослојне и двослојне структуре вишефазних индуктора, који су детаљно анализирани и чије су карактеристике упоређене. Феритна језгра иновативног дизајна су направљена од никл-цинка. Ова језгра се монтирају на PCB са израђеним проводним намотајима и отворима за специјално пројектован облик језгра. На овај начин се добија компактна планарна компонента са шест индуктора, који су спрегнути међусобно унутар једне компоненте. Добијени вишефазни индуктори су намењени употреби у вишефазним DC/DC конверторима на радним фреквенцијама у близини 1 MHz и вишим. Електричне карактеристике индуктора су анализирале помоћу импедансног анализатора HP4194A у фреквенцијском опсегу од 50 kHz до 40 MHz.

Техничке карактеристике:

За језгра је коришћен никл-цинк материјал, један ознаке C2025 чија је иницијална пермеабилност била 230, а други ознаке CN20 чија је пермеабилност на ниским учестаностима око 1000. Феритна језгра кружног облика пречника 2 cm. Висина вертикалних стубова износи 2 mm, колико износи и дебљина горње и доње хоризонталне плоче овог језгра. Свих шест бакрених намотаја једнослојне структуре је постављено кружно у симетричном распореду. Ширина бакра код намотаја износи 2 mm дуж целе путање. Растојање између намотаја било је 200 μ m.

Техничке могућности:

Ови вишефазни спрегнути индуктори са феритним језгром веома компактног дизајна се могу користити у DC/DC конверторима на фреквенција око 1 MHz и вишим.

Реализатори:

Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Депарتمان за енергетику, електронику и телекомуникације, Катедра за електронику.

Корисници:

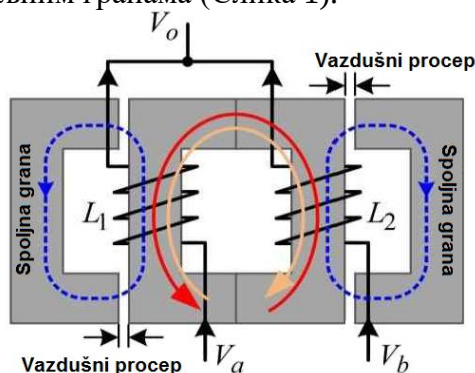
Ирител а.д. Београд, Факултет техничких наука, Нови Сад

Подтип решења:

Прототип– M85

Пасивне компоненте имају највећи удео у трошковима израде и заузимају највише простора у уређајима велике снаге. Смањење димензија и тежине пасивних компоненти у овим колима је веома важно. Посматрајући све веће захтеве постављене пред дизајнере модерних DC/DC конвертора по питању брзог одзива, смањења таласности струје, захтева за великом густином паковања, уштедом енергије, односно смањењем губитака у колу, развој појединих пасивних компоненти може представљати велики изазов, али истовремено може значајно допринети побољшању карактеристика кола у којима се користе. Индуктор је једна од пасивних компоненти чије су се карактеристике већ годинама анализирале и постоји тежња да се изврши уштеда у утрошеном материјалу и простору који он заузима у електронским колима. Пошто се најчешће за израду индуктора користе скуп магнетски материјали, свака уштеда материјала додатно смањује укупну цену израде уређаја.

Компоненте са два спрегнута индуктора су у прошлости најчешће анализирани и коришћени у DC/DC конверторима са спрегнутим фазама^{1,2,3,4,5}. J.-P. Lee је у свом раду² представио предлог UU структуре са додатним спољним гранама (Слика 1).



Слика 1. Спрегнути UU индуктор са спољним гранама²

J. Zhou⁶ је променио приступ и у потпуности изменио концепт спрегнутог индуктора тако што је, уместо да мота намотаје око равног језгра, направио језгро савијено око равних намотаја. Тиме је значајно скратио дужину намотаја, а самим тим и губитке у њима, свесно ризикујући повећавање губитака у језгру (Слика 2).

¹ P.-L. Wong, P. Xu, B. Yang, and F. C. Lee, „Performance Improvements of Interleaving VRMs with Coupling Inductors,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 16, no. 4, pp. 499-507, July 2001.

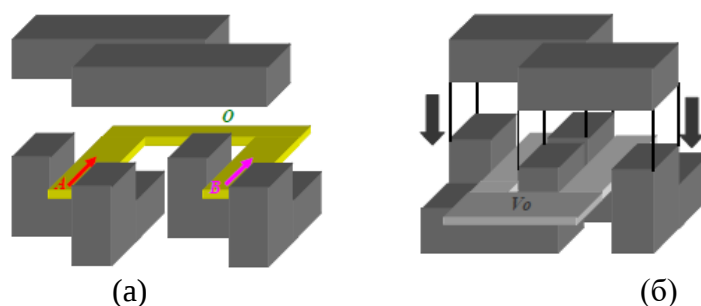
² J.-P. Lee, H. Cha, D. Shin, K.-J. Lee, D.-W. Yoo, and J.-Y. Yoo, “Analysis and Design of Coupled Inductors for Two-Phase Interleaved DC-DC Converters,” *Journal of Power Electronics*, vol. 13, no. 3, pp. 339-348, May 2013.

³ Z. Ouyang, O.C. Thomsen, M.A.E. Andersen, and T. Bjorklund, “Low Profile, Low Cost, New Geometry Integrated Inductors,” in *Proc. IEEE APEC 2011*, pp. 150-156, Mar. 2011.

⁴ P. A. Morrow, C.-M. Park, H. W. Koertzen, and J. T. DiBene, “Design and Fabrication of On-Chip Coupled Inductors Integrated With Magnetic Material for Voltage Regulators,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 6, pp. 1678-1686, Jun. 2011.

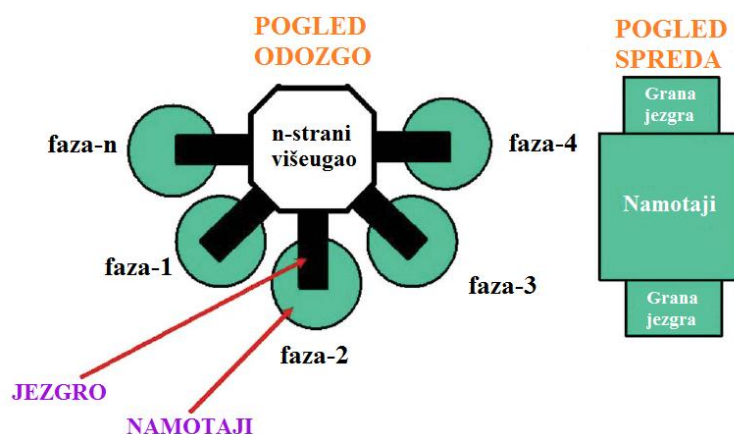
⁵ F. Zheng, Y. Pei, Y. Liu, L. Wang, X. Yang, and Z. Wang, “Design Coupled Inductors for Interleaved Converters Using a Three-Leg Core,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 12, pp. 4697-4705, Dec. 2008.

⁶ J. Zhou, F.C. Lee, M. Xu, Y. Dong, „Multiphase voltage regulator having coupled inductors with reduced winding resistance“ US7199695 B1 patent, Virginia Tech Intellectual Properties, Inc., April 2007.



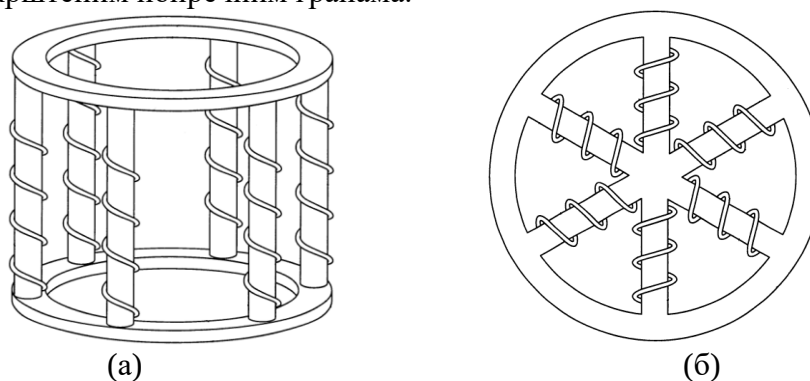
Слика 2. Концепт индуктора са „савијеним“ језгром а) првобитна конструкција и б) унапређена (компактна) конструкција⁶

На слици 3 се може видети шематски дијаграм идејног решења симетричног индуктора које је предложио *H. N. Nagaraja*⁷. Језгро поседује централну грану окружену бочним гранама које на себи имају намотаје. Дужина ваздушног процепа централне гране је подесива, те се подешавањем дужине ваздушног процепа може подешавати коефицијент спреге између било која два индуктора.



Слика 3. Шематски приказ структуре симетрично спрегнутог вишефазног индуктора⁷

*C. R. Sullivan*⁸ патентирао је структуре са слике 4. На слици 4а приказана је варијанта језгра у облику точка са укрштеним попречним гранама.

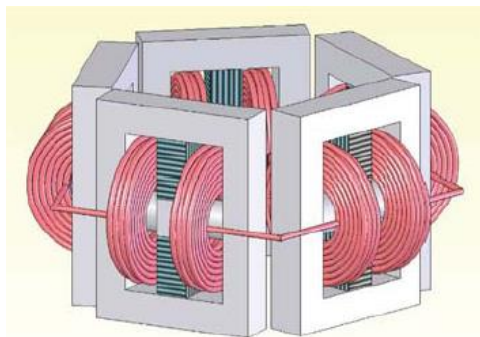


Слика 4. Концепт симетричног индуктора а) у облику точка са укрштеним попречним гранама и б) са два паралелна прстена спојена вертикалним стубовима

⁷ H. N. Nagaraja, D. K. Kastha, and A. Petra, "Design Principles of a Symmetrically Coupled Inductor Structure for Multiphase Synchronous Buck Converters," *IEEE Trans. Industrial Electron*, Vol. 58, no. 3, pp. 988-997, Mar. 2011.

⁸ A. M. Schultz, C. R. Sullivan, „Voltage converter with coupled inductive windings, and associated methods“, US6362986 B1 patent, Volterra, inc., Mar. 2002.

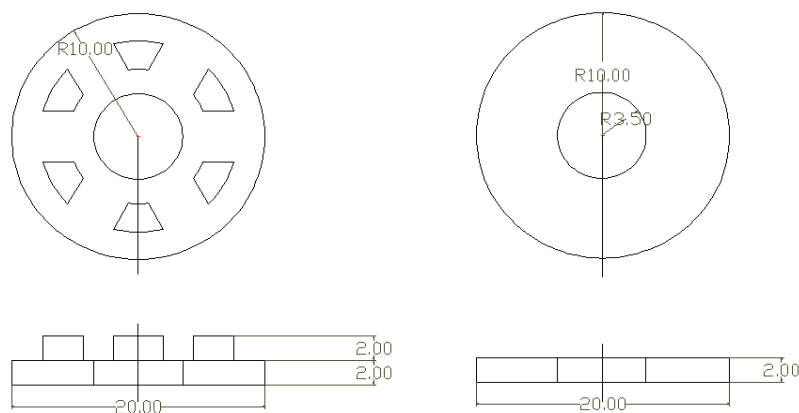
*F. Forest*⁹ је развио конструкцију са спрегнутим суседним фазама која је приказана на слици 5. Тиме је омогућена једноставнија имплементација компоненте коришћењем комерцијално доступних језгра.



Слика 5. Структура *InterCell* трансформатора израђена помоћу комерцијално доступних језгра

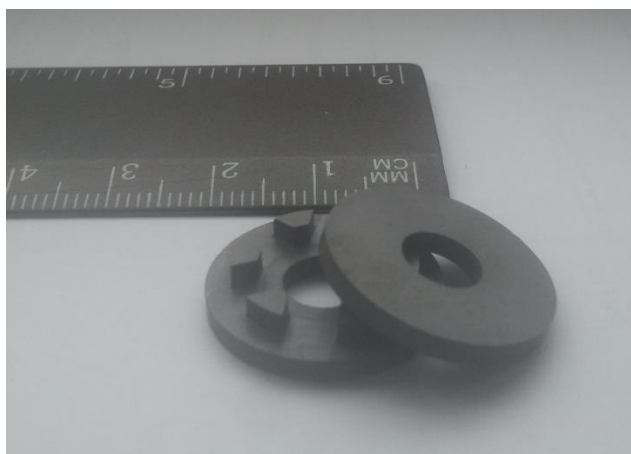
Пројектовање и израда феритног језгра

Технички цртеж по коме је израђено језгро представљено у овом решењу је дат на слици 6. Језгро је добијено машинском обрадом комада феритног материјала и коначни изглед је приказан на слици 7. Језгро је конструисано да буде кружног облика, како би се на најбољи начин у њега могла сместити симетрична структура са шест фазних индуктора. Пречник језгра износи 20 mm. На слици 6 се види да су вертикални стубови језгра распоређени кружно на једнаким растојањима. Висина вертикалних стубова износи 2 mm, колико износи и дебљина горње и доње хоризонталне плоче. Технички цртеж који се налази на слици 6 представља основу језгра са стубовима, док слика 6б представља горњу грану језгра помоћу кога се формира комплетан склоп језгра након што се у средину постави РСВ са намотајима. Језгро је пројектовано тако да његова висина након монтаже износи укупно 6 mm. Још једна предност је то што се језгро монтира на РСВ са доње и горње стране, те његов профил на свакој од страна износи свега 2 mm. Такође, висина вертикалних стубова се формира према укупној дебљини РСВ-а са намотајима.



Слика 6. Технички цртеж феритног језгра, а) основа језгра, б) горња грана језгра

⁹ F. Forest, T. A. Meynard, E. Labouré, V. Costan, E. Sarraute, A. Cuniere, and T. Martire, „Optimization of the Supply Voltage System in Interleaved Converters Using Intercell Transformers“, IEEE Trans. Power Electron, vol. 22, no. 3, pp. 934-942, May 2007.



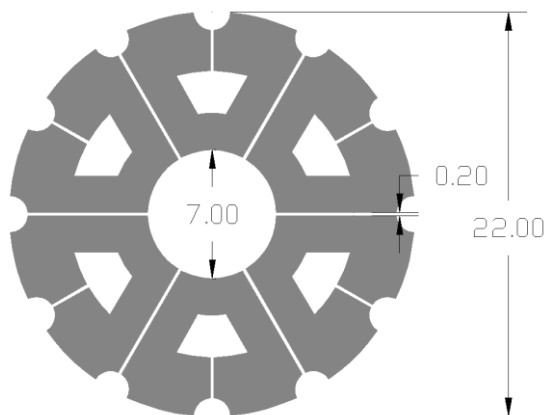
Слика 7. Фабриковано феритно језгро

За израду језгра је коришћен никл-цинк материјал, један ознаке C2025 чија је иницијална пермеабилност била 230, а други ознаке CN20 чија је пермеабилност на ниским учестаностима око 1000.

Пројектовање и израда фазних намотаја спрегнутог индуктора

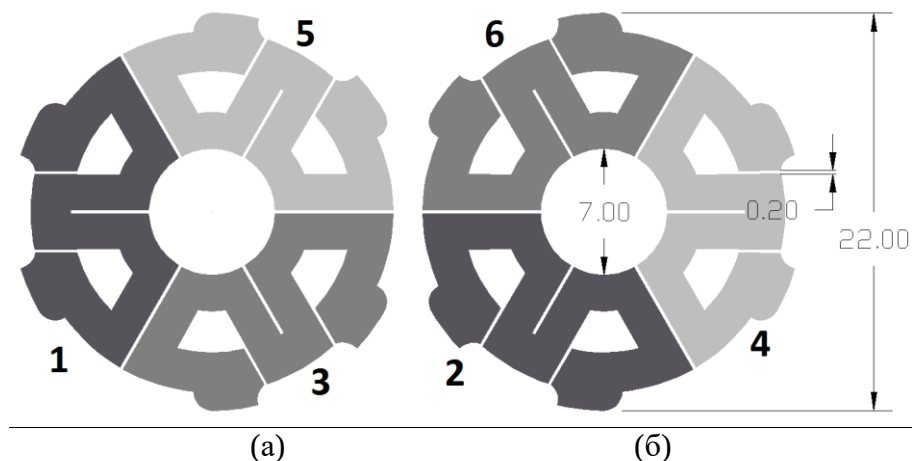
За израду намотаја изабрана је РСВ технологија те је било потребно размотрити којим технолошким поступком ће бити спроведена израда. Одлучено је да се прототип изради на мини CNC машини машинском обрадом РСВ-а. Резолуција, односно најмање растојање између бакарних проводника које може да постигне машина која је била на располагању за израду завојака, ограничена је на 200 μm . Након коначних прилагођења изабраној технологији и техници израде добијен је изглед коначног цртежа планарних индуктора на Сликама 8 (за једнослојну структуру) и 9 (за двослојну структуру).

Свих шест намотаја једнослојне структуре (Слика 8) је постављено кружно у симетричном распореду. Пројектовани су тако да имају само један намотај, а да се вертикални стубови језгра, након монтаже, налазе тачно у средини намотаја. Ширина бакра код намотаја износи 2 mm дуж целе путање. Проширења на спољним ободима намотаја служе да нагласе приступне тачке фазних намотаја. Такође су настала из практичних разлога, да би се омогућило једноставније приступање фазама помоћу мерних сонди (током поступка тестирања односно карактеризације).



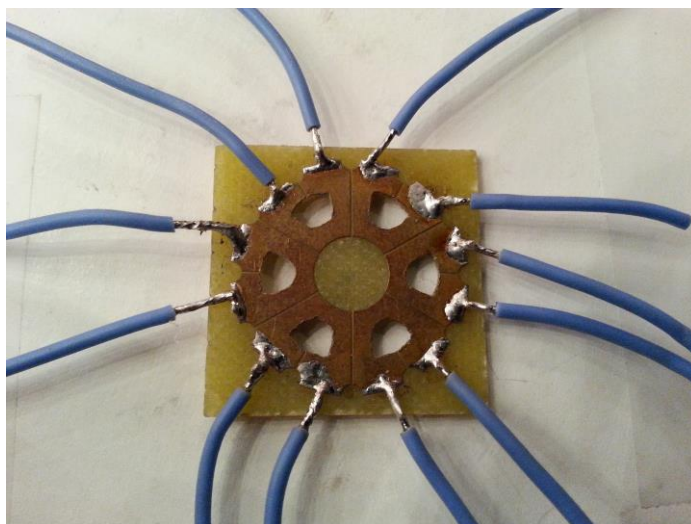
Слика 8. Технички цртеж планарних намотаја једнослојног индуктора са шест фаза

Друга варијанта структуре са шест индуктора представљена је на слици 9. Код ове конструкције фазни намотаји су распоређени у два слоја. По три намотаја су симетрично распоређена на горњем и доњем слоју РСВ-а. Намотаји двослојне структуре су два пута дужи од намотаја једнослојне структуре и пројектовани су тако да сваки од њих обухвати два вертикална стубића језгра. Приликом дизајна, намотаји доњег слоја су ротирани за пола фазног намотаја у односу на горњи слој. То је урађено са циљем да се оствари и анализира зависност спреге између два различита слоја РСВ-а кроз један вертикални стуб језгра. Тиме се, такође, постиже да све суседне фазе између два слоја остварују спрегу истог интензитета, због потпуне симетрије оваквог распореда између слојева. Битно је истаћи да су намотаји двослојне структуре пројектовани тако да се користе у комбинацији са истим језгром које је представљено на Слици 7.

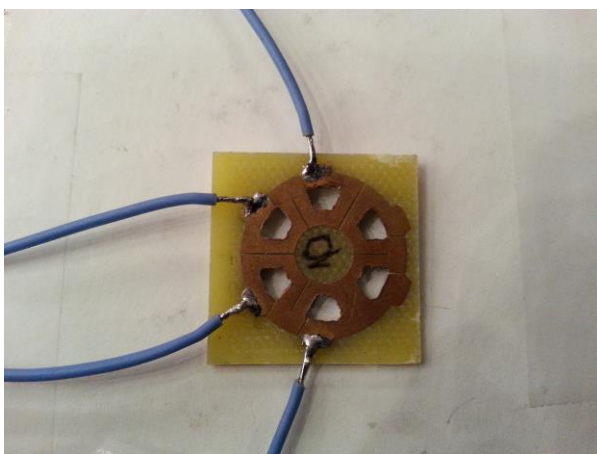


Слика 9. Технички цртеж планарних намотаја двослојног индуктора са шест фаза, (а) горњи слој, (б) доњи слој

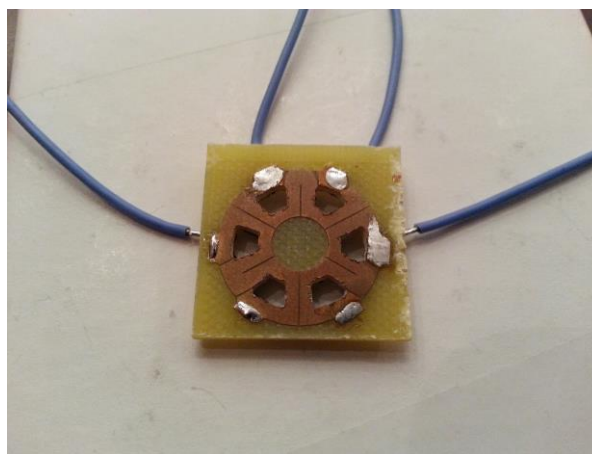
Реализоване проводне структуре су представљене на сликама 10 и 11. Проводне структуре израђене су на стандардној плочи од перфинакса са проводним слојем бакра дебљине 35 μm . Унутар контура сваког од шест индуктора направљени су отвори како би се језгро могло несметано монтирати.



Слика 10. Једнослојна проводна структура на РСВ-у са залемљеним приступним проводницима који су се користили током карактеризације овог прототипа



(а)

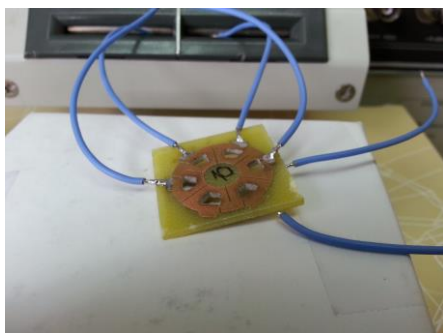


(б)

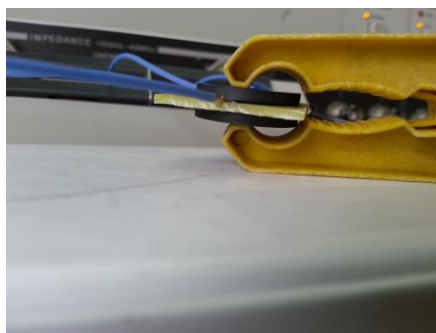
Слика 11. Двослојна структура на РСВ-у, а) горњи слој, б) доњи слој

Електрична карактеризација шестофазног индуктора

Први корак у карактеризацији фабрикованих спрегнутих индуктора представља одређивање његових најважнијих електричних параметара. Анализирана је фазна индуктивност, као најважнији параметар сваког индуктора, као и отпорност кроз фазне намотаје која је такође битна јер уноси цулове губитке у коло у коме ће ова компонента бити коришћена. На Слици 12 се може видети један од узорака током тестирања и то у варијанти без језгра (Слика 12а) и са језгром (Слика 12б и 12ц). Приликом мерења на узорак су залемљене жице, помоћу којих је узорак повезан на мерни улаз импедансног анализатора. Извршена су и додатна мерења помоћу којих је утврђен и компензован утицај залемљених жица на резултате мерења који ће у наставку текста бити представљени на графицима. Мерни поступак је спроведен на једнослојној и двослојној индукторској структури у лабораторијским условима. Приликом мерења су рађене анализе на узорцима без језгра и са језгром од феритних материјала са ознакама CN20 и C2025.



(а)



(б)



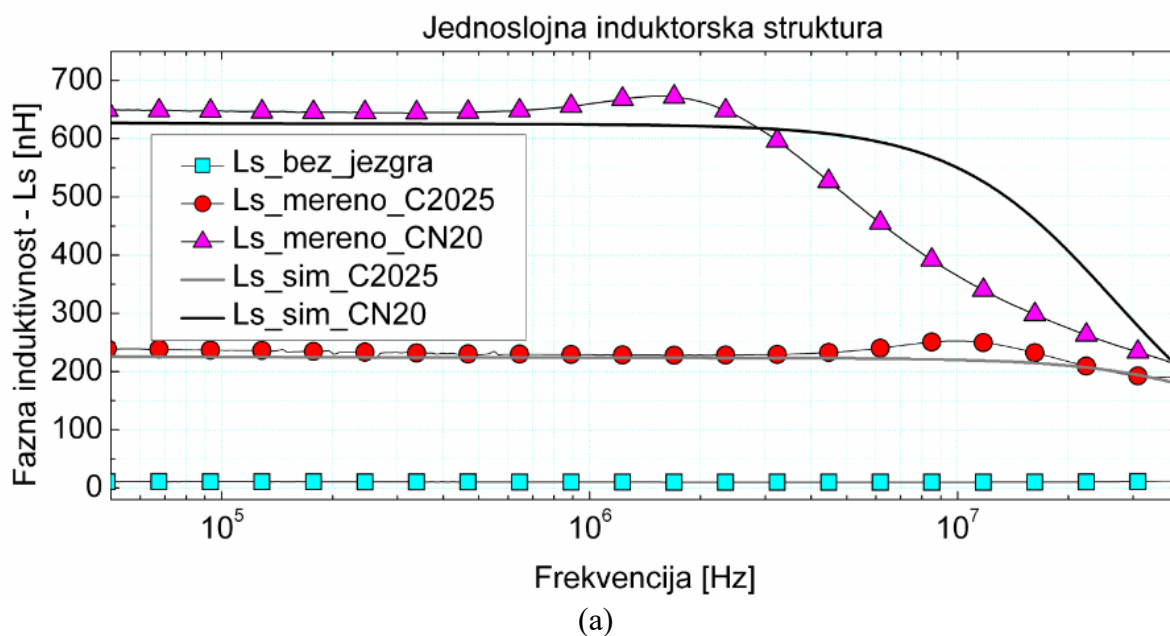
(ц)

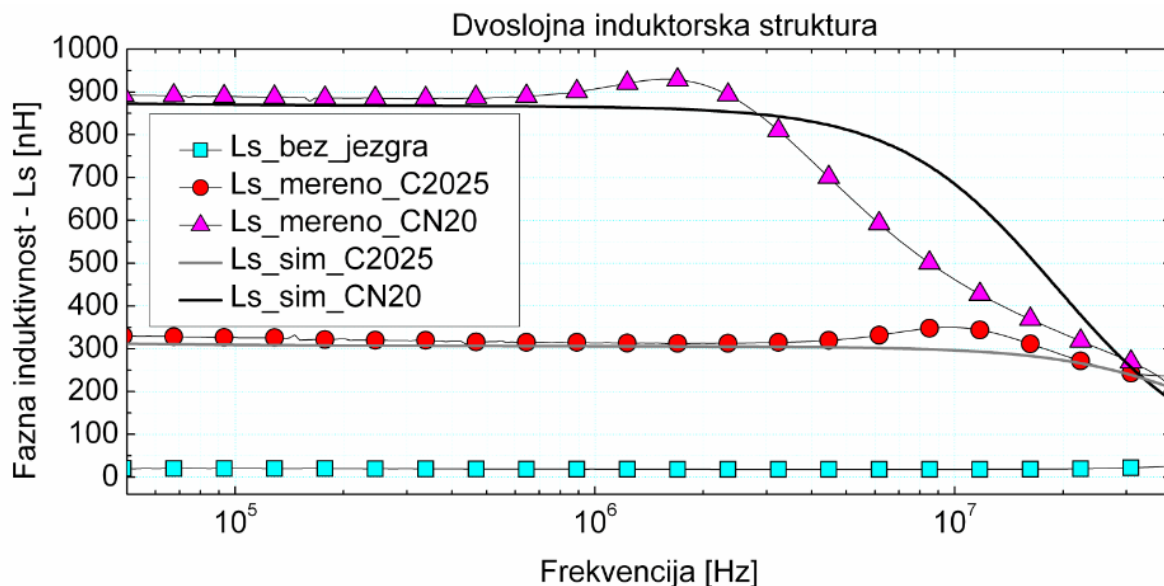
Слика 12. Импедансна спектроскопија на индуктору а) без језгра, б) са језгром-поглед са стране, ц) са језгром-поглед одозго

Графици зависности фазне индуктивности од фреквенције су приказани на Слици 13. Фреквенцијске карактеристике су мерене у опсегу од 50 kHz до 40 MHz. Мерена фазна индуктивност једнослојног индуктора износи 10 nH, док фазна индуктивност код двослојне структуре износи 20 nH. Све фазе, и код једнослојне и код двослојне структуре, имају узајамно једнаке вредности фазне индуктивности. Фазна индуктивност двослојне структуре има

очекивано већу вредност, јер је дужина њене проводне линије већа од дужине фазне линије једнослојне структуре. Када се на једнослојну структуру монтира језгро од феритног материјала C2025 индуктивност у стабилној зони фреквенцијског опсега износи 230 nH, док са језгром израђеним од материјала CN20 фазна индуктивност износи чак 650 nH. Фазна индуктивност двослојне структуре, употребом иста два језгра као и у случају једнослојне структуре износи, 320 nH са језгром C2025 и 900 nH са језгром CN20. Може се приметити да материјал веће пермеабилности, логично, доноси јаче повећање фазне индуктивности индуктора у коме се користи. Међутим, због раније описаних особина феритних материјала, стабилну фреквентну карактеристику има до 1 MHz радне фреквенције. Фазни индуктор са језгром израђеним помоћу материјала C2025 има стабилне карактеристике у фреквентном опсегу до 7 MHz, што га чини погодним за употребе на вишим фреквенцијама.

Важно је истаћи да су добијене фреквенцијске карактеристике жељеног/очекиваног облика. Наиме, веома стабилне вредности фазне индуктивности у фреквентном опсегу испод резонантне фреквенције коришћених материјала представљају предност за карактеристике пројектованих компоненти. То је посебно битно када се узме у обзир практична примена, јер омогућава стабилно коришћење компоненте у широком фреквентном опсегу, односно у колима чији су радни режими подешени на различитим фреквенцијама. Пуном линијом је на оба графика представљен резултат нумеричке анализе у COMSOL симулационом софтверу. Може се уочити да се у опсезима од интереса за примене у напајањима која раде на фреквенцијама реда неколико стотина kHz до неколико MHz, јављају добра слагања са мереним резултатима.





(б)

Слика 13. Фреквенцијска карактеристика индуктивности фазног намотаја а) једнослојне, б) двојслојне структуре шестофазног индуктора

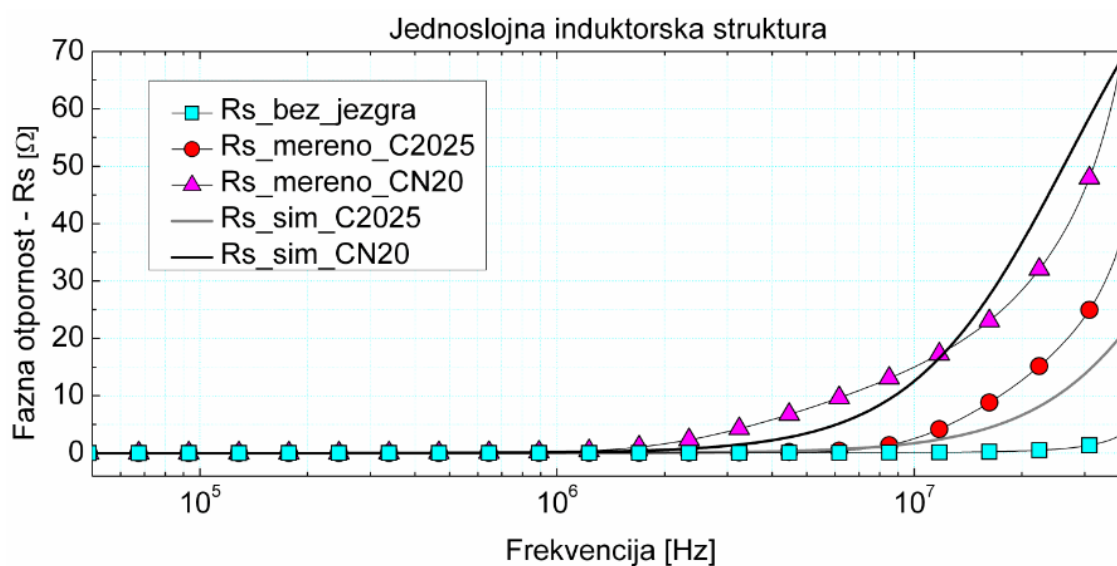
Важно је уочити да је вредност индуктивности фазних намотаја двојслојне структуре у ваздуху два пута већа од индуктивности намотаја једнослојне структуре у истој средини. Монтажом језгра овај однос се мења. У овим случајевима је индуктивност двојслојне структуре већа од вредности фазне индуктивности за максималних 40%. Разлоге за то треба тражити у чињеници да код двојслојне структуре постоји већи ефективни процеп и да се ефективна пермеабилност магнетног кола смањује. Такође, битан фактор може представљати чињеница да два завојка који формирају намотај двојслојне структуре и који се налазе у истој равни на малом одстојању један од другог формирају негативну узајамну спрегу, те укупна индуктивност намотаја постаје мања услед утицаја негативне спреге.

На исти начин као за индуктивност, спроведена је и фреквенцијска анализа отпорности појединачних фаза у шестофазном индуктору. Резултати мерења и симулација су приказани на слици 14. Отпорност фазних намотаја је веома битна са аспекта губитака у намотајима и податак је који може да користи пројектанту кола за правилан избор радне фреквенције. Губици у фазним намотајима индуктора могу бити представљени као сума DC и AC губитака:

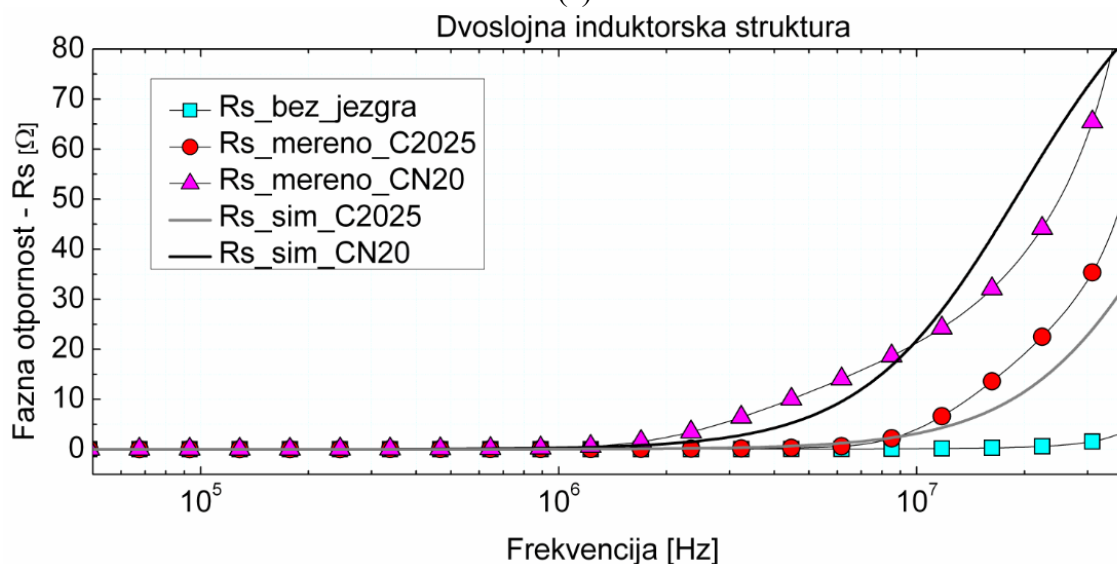
$$P_{wind} = R_{DC} \cdot I_{DC}^2 + R_{AC} \cdot I_{AC}^2 \quad (1)$$

R_{DC} је отпорност намотаја при непроменљивој струји, R_{AC} представља отпорност кроз фазни намотај при временски променљивом пољу чија је величина зависна од фреквенције временски променљиве струје која протиче кроз намотај. I_{DC} је једносмерна струја кроз намотај, I_{AC} представља RMS (*Root-mean-square*), ефективну вредност наизменичне струје која протиче кроз фазни намотај.

Порастом фреквенције постепено расте вредност R_{AC} , када фреквенција достигне 2 MHz код материјала CN20 и 5 MHz код материјала C2025, долази до њеног наглог раста. У Табели 1 је дат опсег вредности R_{AC} која се креће од неколико mΩ до неколико стотина mΩ на фреквенцијама од 50 kHz до 980 kHz за феритно језгро CN20, и од 50 kHz до 5 MHz када се користи феритно језгро C2025. На графицима отпорности фазних намотаја, као и код графика за индуктивност, могу се видети и резултати упоредних симулација. Као и код индуктивности, добијена су задовољавајућа слагања између измерене и симулиране фазне отпорности на поменутих фреквенцијама.



(a)



(б)

Слика 14. Фреквенцијска карактеристика отпорности фазних намотаја а) једнослојне и б) двослојне структуре шестофазног индуктора

Добијени коефицијенти спреге су представљени на Слици 15 у облику фреквенцијске зависности модула коефицијента спреге. Попут фреквенцијских карактеристика фазне индуктивности и отпорности, ове карактеристике су стабилне у опсегу испод резонантне фреквенције феритног материјала од кога је израђено језгро. На графицима су дате фреквенцијске карактеристике следећих коефицијената спреге:

κ_{12} – код једнослојне структуре $\kappa_{12}=\kappa_{23}=\kappa_{34}=\kappa_{45}=\kappa_{56}=\kappa_{61}$ и представља спрегу између суседних фазних намотаја шестофазног индуктора;

κ_{12} – код двослојне структуре $\kappa_{12}=\kappa_{23}=\kappa_{34}=\kappa_{45}=\kappa_{56}=\kappa_{61}$ и представља спрегу између суседних индуктора из два различита слоја (један из доњег и један из горњег слоја);

κ_{13} – код једнослојне структуре $\kappa_{13}=\kappa_{24}=\kappa_{35}=\kappa_{46}=\kappa_{51}=\kappa_{62}$ и представља спрегу између два парна или два непарна индуктора у шестофазном индуктору;

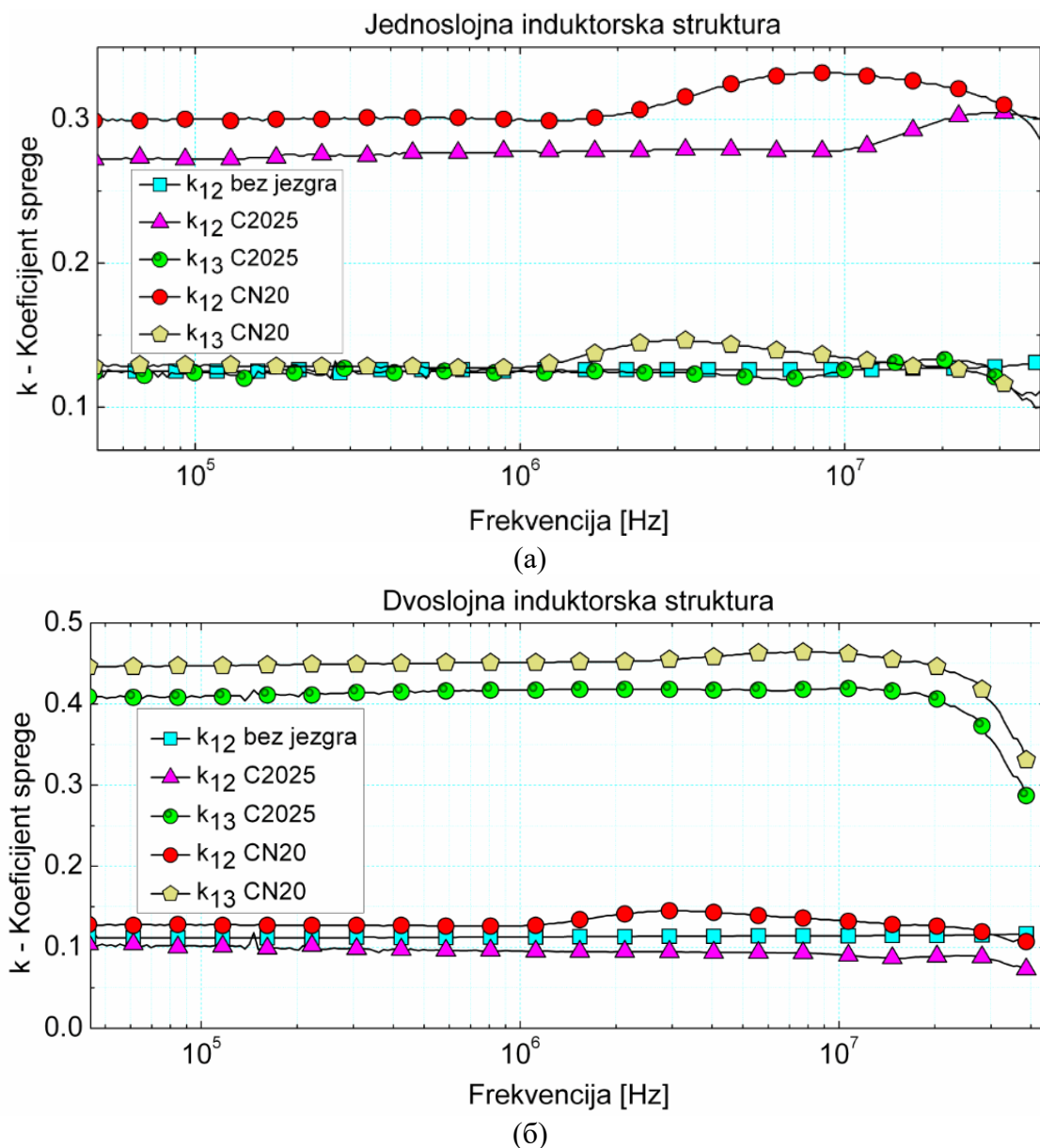
κ_{13} – код двослојне структуре $\kappa_{13}=\kappa_{24}=\kappa_{35}=\kappa_{46}=\kappa_{51}=\kappa_{62}$ и представља узајамну спрегу индуктора горњег слоја ($\kappa_{13}=\kappa_{35}=\kappa_{51}$) и индуктора доњег слоја ($\kappa_{24}=\kappa_{46}=\kappa_{62}$).

Коефицијент спреге κ_{14} је изузет са графика 15 да би се избегла пренатрпаност графика. Ипак, вредност κ_{14} је дата у Табели 1, где важи следеће:

κ_{14} – код једнослојне структуре $\kappa_{14}=\kappa_{25}=\kappa_{36}=\kappa_{41}=\kappa_{52}=\kappa_{62}$ представља спрегу између наспрамних индуктора;

κ_{14} – код двослојне структуре $\kappa_{14}=\kappa_{25}=\kappa_{36}=\kappa_{41}=\kappa_{52}=\kappa_{62}$ представља спрегу између наспрамних индуктора од којих се један налази у горњем, а други у доњем слоју.

Важно је напоменути да су све наведене једнакости коефицијената спреге потврђене експерименталним мерењима и да долазе као последица симетричности структуре шестофазног индуктора. Најбитније карактеристике електричних параметара (добитених мерењима) представљених спрегнутих индуктора су сумиране и презентоване у Табели 1. Највећу фазну индуктивност има двослојна структура са језгром CN20, такође и највећу отпорности фазног намотаја. Може се такође видети да је највећи коефицијент спреге остварен између два суседна намотаја из истог слоја у двослојној структури κ_{13} .



Слика 15. Фреквенцијска карактеристика коефицијената спреге између фазних намотаја а) једнослојне, б) двослојне структуре шестофазног индуктора

Табела 1. Главни параметри једнослојне и двослојне структуре шестофазног спрегнутог индуктора

Индукторска структура	Једнослојна		Двослојна	
Феритни материјал језгра	C2025	CN20	C2025	CN20
Индуктивност фазе L_s [nH]	230	650	320	900
Коефицијент спреге κ_{12}	0.27	0.3	0.1	0.13
Коефицијент спреге κ_{13}	0.125	0.13	0.41	0.45
Коефицијент спреге κ_{14}	0.045	0.085	0.14	0.21
DC фазна отпорност R_{DC} [m Ω]	4.5	4.5	10.4	10.4
AC фазна отпорност * R_{AC} [m Ω]	8 - 240	8 – 222	14 – 359	14 – 317

(* C2025 [50 kHz – 5 MHz], CN20 [50 – 980 kHz])

Примена

Представљени вишефазни спрегнути индуктори су развијани у циљу примене у DC/DC конверторима. Ове компоненте налазе употребу у вишефазним напонским регулаторима како би се упростила структура, смањила величина и побољшала ефикасност кола.

Прототип вишефазног спрегнутог индуктора са феритним језгром је урађен на Факултету техничких наука у Новом Саду, у оквиру пројекта III45021.

Штампано – октобар 2016.

РЕЦЕНЗИЈА ПРЕДЛОЖЕНОГ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Предмет: Мишљење о испуњености критеријума за писање техничког решења

Прототип:

Прототип вишефазног спрегнутог индуктора са феритним језгром

Број пројекта: III45021

Руководилац пројекта: ред. проф. др Владимир Срдих,

Одговорно лице: ред. проф. др Горан Стојановић

Аутори: Никола Лечић, Снежана Ђурић, Милан Радовановић, Горан Стојановић

Развијено: у оквиру интердисциплинарног пројекта III45021

Година: 2016

Примена: 01.11.2016

Реализатори: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за енергетику, електронику и телекомуникације, Катедра за електронику

Корисници: Ирител а.д. Београд, Факултет техничких наука, Нови Сад

Подтип решења: Прототип - M85

Образложење

Пасивне компоненте имају највећи удео у трошковима израде и заузимају највише простора у уређајима велике снаге. Смањење димензија и тежине пасивних компоненти у овим колама је од изузетне важности. Основни циљ овог техничког решења је да развије и објасни прототип једног компактног вишефазног спрегнутог индуктора са феритним језгром.

У оквиру овог техничког решења аутори су реализовали симетрични дизајн вишефазних спрегнутих индуктора код којих сви фазни индуктори деле једно феритно језгро направљено од два типа никл цинка. Пројектовани вишефазни индуктори су израђени у технологији штампаних кола. Дизајниране су једнослојне и двослојне структуре вишефазних индуктора, који су детаљно анализирани и чије су карактеристике упоређене.

Феритна језгра су дизајнирана и фабрикована да буду оригиналног облика какав се не може наћи у литератури или на тржишту. Ова језгра су направљена да се монтирају на штампаној плочи са израђеним проводним намотајима и отворима за специјално пројектован облик језгра.

На овај начин се добија компактна планарна компонента са шест индуктора, који су спрегнути међусобно унутар једне компоненте.

Електричне карактеристике индуктора су анализирани помоћу импедансног анализатора HP4194A у фреквенцијском опсегу од 50 kHz до 40 MHz и приказани су мерени резултати за зависност индуктивности, отпорности и коефицијента спреге за једнослојну и двослојну структуру проводних намотаја спрегнутог индуктора. Анализирани су и перформансе индуктора са језгром од материјале ниске пермеабилности (ознаке C2025) као и од материјала високе пермеабилности (ознаке CN20)

Добијени шестофазни индуктори су намењени употреби у вишефазним DC/DC конверторима на радним фреквенцијама у близини 1 MHz и вишим.

На основу достављеног материјала, а у складу са одредбама Правилника о поступку и начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача, који је донео национални савет за научни и технолошки развој Републике Србије, рецензент оцењује да резултат односно решење под називом: „Прототип вишефазног спрегнутог индуктора са феритним језгром“, испуњава услове да буде признат као техничко решење Лабораторијски прототип – ранга M85.

Прототип вишефазног спрегнутог индуктора са феритним језгром је развијен на Факултету техничких наука у Новом Саду, у оквиру текућег пројекта број III45021 код Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

У Београду, 31.10.2016.


Рецензент: др Данијела Ранђеловић
Научни саветник, ИХТМ,
Универзитет у Београду

РЕЦЕНЗИЈА ПРЕДЛОЖЕНОГ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Предмет: Мишљење о испуњености критеријума за писање техничког решења

Прототип:

Прототип вишефазног спрегнутог индуктора са феритним језгром

Број пројекта: III45021

Руководилац пројекта: ред. проф. др Владимир Срдић

Одговорно лице: ред. проф. др Горан Стојановић

Аутори: Никола Лечић, Снежана Ђурић, Милан Радовановић, Горан Стојановић

Развијено: у оквиру интердисциплинарног пројекта III45021

Година: 2016

Примена: 01.11.2016

Реализатори: Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, Департман за енергетику, електронику и телекомуникације, Катедра за електронику

Корисници: Ирител а.д. Београд, Факултет техничких наука, Нови Сад

Подтип решења: Прототип - M85

Образложење

Проблем који се техничким решењем решава: Овим технишким решењем се решава проблем да пасивне компоненте имају највећи удео у трошковима израде и заузимају највише простора у електронским уређајима велике снаге. Стога смањење димензија и тежине пасивних компоненти у овим колима представља изузетну важну област, коју ово техничко решење покрива. Основни циљ је да се развије прототип једног компактног вишефазног спрегнутог индуктора са феритним језгром.

Стање решености тог проблема у свету: До сада су углавном реализована решења са два спрегнута индуктора или са спрегнутим индукторима са више фаза, али таквог облика да ипак заузимају доста простора и захтевају скупе технолошке процесе њихове реализације.

Карактеристике предложеног техничког решења: Пројектовани вишефазни индуктори су израђени у технологији штампаних кола. Дизајниране су једнослојне и двослојне структуре вишефазних индуктора, који су детаљно анализирани и чије су карактеристике упоређене.

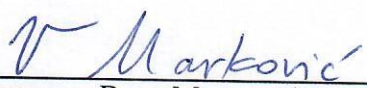
Феритна језгра су дизајнирана и фабрикована тако да имају оригинални облик какав се не може наћи у литератури или на тржишту. Ова језгра су направљена да се монтирају на штампаној плочи са израђеним проводним намотајима и отворима за специјално пројектован облик језгра. За језгра је коришћен никл-цинк материјал, један ознаке С2025 чија је иницијална пермеабилност била 230, а други ознаке CN20 чија је пермеабилност на ниским учестаностима око 1000. Феритна језгра су кружног облика пречника 2 cm. Висина вертикалних стубова износи 2 mm, колико износи и дебљина горње и доње хоризонталне плоче овог језгра. Свих шест бакрених намотаја једнослојне структуре је постављено кружно у симетричном распореду. Ширина бабра код намотаја износи 2 mm дуж целе путање. Растојање између намотаја је 200 μ m. Електричне карактеристике индуктора су анализирани помоћу импедансног анализатора HP4194A у фреквенцијском опсегу од 50 kHz до 40 MHz и приказани су мерени резултати за зависност индуктивности, отпорности и коефицијента спреге за једнослојну и двослојну структуру проводних намотаја спрегнутог индуктора.

Могућности примене предложеног техничког решења: Добијени шестофазни индуктори су намењени употреби у вишефазним DC/DC конверторима на радним фреквенцијама у близини 1 MHz и вишим.

Закључак: На основу увида у приложену документацију, а у складу са одредбама Правилника о поступку и начину вредновања и квантитативном исказивању научноистраживачких резултата истраживача, који је донео Национални савет за научни и технолошки развој Републике Србије, предлажем да се решење под називом: „Прототип вишефазног спрегнутог индуктора са феритним језгром“, прихвати као техничко решење Лабораторијски прототип – ранга М85.

Прототип вишефазног спрегнутог индуктора са феритним језгром је развијен на Факултету техничких наука у Новом Саду, у оквиру текућег пројекта број III45021 код Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

У Нишу, 28.10.2016.


Рецензент: др Вера Марковић, ред. проф.
Електронски факултет у Нишу