



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: 2015-01-05

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научно веће Факултета техничких наука у Новом Саду, на 33. седници одржаној дана 24.12.2014. године, донело је следећу одлуку:

-непотребно изостављено-

ТАЧКА 13. Питања научноистраживачког рада и међународне сарадње

Тачка 13.1.9.: На основу позитивног извештаја рецензена верификује се техничко решење под називом:

МЕТОДА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ УТИЦАЈА ДЦ СТРУЈЕ НА ЕЛЕКТРИЧНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ СМД ИНДУКТОРА (мерна метода М85)

Аутори техничког решења: Чедо Жлебич, Драган Клјајић, Нелу Блаж, Љилјана Живанов, Мирјана Дамњановић, Александар Менићанин.

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Тачност података оверава:
Секретар

Јасмина Димић, дипл. правник

Иван Нешковић, дипл. правник



Декан

Проф. др. Злате Дорисловачки



УНИВЕРЗИТЕТ
У НОВОМ САДУ



ФАКУЛТЕТ
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Трг Досптеја 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: 2014-11-28

ИЗВОД ИЗ ЗАПИСНИКА

Наставно-научно веће Факултета техничких наука у Новом Саду, на 31. редовној седници одржаној дана 26.11.2014. године, донело је следећу одлуку:

-непотребно изостављено-

Тачка 12.1. Верификација нових техничких решења и именовање рецензента

Тачка 12.1.6: У циљу верификације новог техничког решења усвајају се рецензенти:

- Др Обрад Алексић, научни саветник, ИМСИ Београд и
- Др Зоран Јакшић, научни саветник, ИХТМ, Београд

Назив техничког решења:

МЕТОДА ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ УТИЦАЈА ДЦ СТРУЈЕ НА ЕЛЕКТРИЧНЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ СМД ИНДУКТОРА (мерна метода М85)

Аутори техничког решења: Чедо Жлебич, Драган Клјајић, Нелу Блаж, Љилјана Живанов, Мирјана Дамњановић, Александар Менићанин.

-непотребно изостављено-

Записник водила:

Јасмина Димић, дипл. правник

Тачност података оверава:
Секретар

Иван Нешковић, дипл. правник



Мерна метода:

Метода за одређивање утицаја DC струје на електричне карактеристике SMD индуктора

Руководилац пројекта: проф. др Љиљана Живанов

Одговорно лице: Чедо Жлебич

Аутори: Чедо Жлебич, Драган Кљајић, Нелу Блаж, Љиљана Живанов, Мирјана Дамњановић
Факултет техничких наука (ФТН), Нови Сад

Александар Менићанин

Институт за мултидисциплинарна истраживања (ИМСИ), Београд

Развијено: у оквиру пројекта технолошког развоја TP-32016

Година: 2014.

Примена: децембар 2014.

Кратак опис

Приликом протицања DC (Direct Current) струје кроз индуктор намењен за површинску монтажу (SMD индуктор), долази до намагнетисања језгра што доводи до смањивања његове индуктивности и импедансе. Уочено је да је ово смањивање нарочито изражено када вредност DC струје која протиче кроз индуктор премашује ону вредност струје за коју произвођач гарантује исправан рад компоненте. Зато је неопходно испитати и предвидети степен деградације електричних карактеристика, као и зависност губитака језгра на промену температуре тела тестираног индуктора.

Приказана мерна метода представља поступак испитивања утицаја DC струје на електричне карактеристике индуктора намењених за површинску монтажу. Анализа је базирана на моделу индуктора који је приказан као двокрајни модел индукторске компоненте. За прорачун електричних карактеристика индуктора (индуктивност, отпорност, Q -фактор, реални и имагинарни део импедансе) екстрахованих из измерених S -параметара применом векторског анализатора мреже, коришћен је *in-house* софтверски алат IndCalc.

Техничке карактеристике:

Мерни систем обухвата векторски анализатор мреже Agilent E5071B, микрострип прилагодног тест степена за монтажу индуктора, два диплексера (bias tee), DC извора напајања 2403 PRO Voltcraft, потрошача (оптерећења) за регулацију DC струје, укупне отпорности 55 Ω и снаге 16 W, и дигиталног термометра PCE-T390 са температурном пробом Pt 100.

Техничке могућности:

Приказани мерни систем омогућава испитивање утицаја DC струје на електричне карактеристике и температуру тела двокрајних компоненти за површинску монтажу. Мерења се могу вршити у фреквентном опсегу до 4,2 GHz.

Реализатори:

ФТН, Нови Сад, Институт за мултидисциплинарна истраживања, Београд;

Корисници:

Факултет техничких наука, Нови Сад

Подтип решења:

M85 - Нова мерна метода.

Увод

ЕМС (*Electromagnetic Compatibility* - ЕМС) прописи су проширени тако да покривају и GHz опсег фреквенција. Услед неопходности смањивања маргине шума и ефикаснијег потискивања високо фреквентних сметњи у сигналним линијама и линијама за напајање, веома је важно

испитати понашање компоненти за смањење електромагнетске интерференције (*Electromagnetic Interference* - EMI) у реалним условима рада. Како DC струја која протиче кроз индуктор расте, језгро компоненте почиње да улази у сатурацију. Када уђе у сатурацију, вредност индуктивности се смањује као и вредност импедансе, и на тај начин се смањује ефикасност компоненте приликом елиминисања EMI.

Развијено је неколико техника за мерење утицаја DC струје. У (W. K. Mo, D. K. W. Cheng, and Y. S. Lee, "Simple approximations of the DC flux influence on the core loss of power electronic ferrites and their use in design of magnetic components," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 6, pp. 788–799, Dec. 1997.), губици у феритном језгру услед протикања DC струје су рачунати применом B/H криве и повезани су са густином DC флуksа (B_{dc}) и AC флуksа (B_{ac}). Ова мерења су показала да губици у језгру за одређену вредност B_{dc}/B_{ac} могу бити смањени. Међутим, треба нагласити да нису дати никакви подаци везани за промену температуре компоненте услед повећања губитака у језгру. У раду (P. M. Gradzki and F. C. Lee, "Domain wall resonance and its effect on losses in ferrites," *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC '91*, pp. 627–632, Jun. 24–27, 1991.), губици у тороидном језгру смештеном у температурној комори су мерени помоћу анализатора импедансе (*Impedance analyzer*). Показано је да губици у језгру расту са порастом DC струје за дати ниво B_{ac} . На основу мерења са дво-приступном индуктивном спрегом, рад (W. Y. Chang, K. Y. See, B. Hu, "Characterization of component under DC biasing condition using an inductive coupling approach", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 8, 2109-2114, 2010.), описује мерну методу за мерење импедансе било које пасивне компоненте (отпорника, индуктора или кондензатора) под утицајем DC струје. Предложена метода захтева употребу тест степена за мерење импедансе одређене компоненте и не приказује промене осталих параметара код индуктора, као што су индуктивност, Q фактор, итд.

Мерном методом приказаном у овом техничком решењу, поред испитивања утицаја DC струје на електричне карактеристике SMD индуктора, могуће је испитати и температуру на коју се загреје индуктор за различите вредности DC струје, што је веома важно за практичне примене ових компоненти.

Приказ еквивалентног модела индуктора

На високим фреквенцијама, индуктор може бити приказан као еквивалентно коло које се састоји од серијске отпорности R , еквивалентне индуктивности L и паразитне капацитивности C (тј. са унутрашњим параметрима). С обзиром да је прилагодни тест степен реализован као микрострип на штампаној плочи (*Printed Circuit Board* - PCB), еквивалентни модел индуктора обухвата и губитке који се јављају монтирањем индуктора на плочу. Ти губици су приказани као спољашњи параметри (паразитна капацитивност C_p и отпорност R_p). На слици 1 је приказан еквивалентни модел индуктора као двокрајна компонента са унутрашњим и спољашњим параметрима.

Како би била извршена анализа понашања компоненте, неопходно је одредити њене унутрашње параметре. Утицај паразитних ефеката је елиминисан приказаном мерном техником. Серијска импеданса еквивалентног модела индуктора $Z(\omega)$, може бити представљена као збир реалног Z_r и имагинарног Z_i дела серијске импедансе:

$$Z(\omega) = Z_r(\omega) + jZ_i(\omega) = \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC} \quad (1)$$

После одређених трансформација, детаљно приказаних у (A. Menićanin, M. Damjanović, L. Živanov: "RF equivalent circuit modeling of surface mounted components for PCB applications",

Microelectronic International, vol 27, no. 2, pp: 67-74, 2010.), фреквенцијски зависни индуктивност и отпорност се рачунају као:

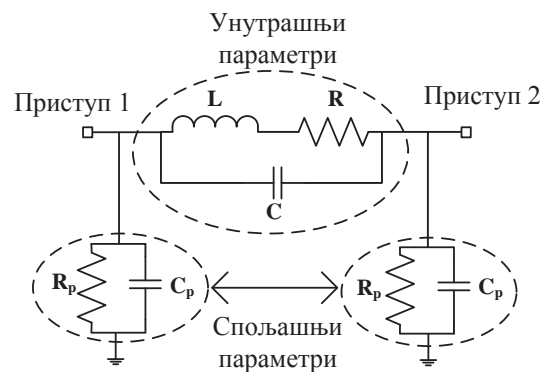
$$R(\omega) = \frac{Z_r(\omega)}{[1 + \omega CZ_i(\omega)]^2 + [\omega CZ_r(\omega)]^2}, \quad (2)$$

$$L(\omega) = \frac{Z_i(\omega) + \omega C |Z(\omega)|^2}{\omega [(1 + \omega CZ_i(\omega))^2 + (\omega CZ_r(\omega))^2]}. \quad (3)$$

Пошто се капацитивност веома мало мења у опсегу фреквенција, сматра се константном. Применом математичких трансформација, сопствена капацитивност индуктора је дата изразом

$$C = \frac{1}{\omega_0^2 L_0} \cdot \frac{Q^2}{1 + Q^2}, \quad (4)$$

где L_0 одређује индуктивност на сопственој резонантној учестаности.



Слика 1. Еквивалентни модел индуктора са унутрашњим и спољашњим параметрима.

Поставка и процедура мерења

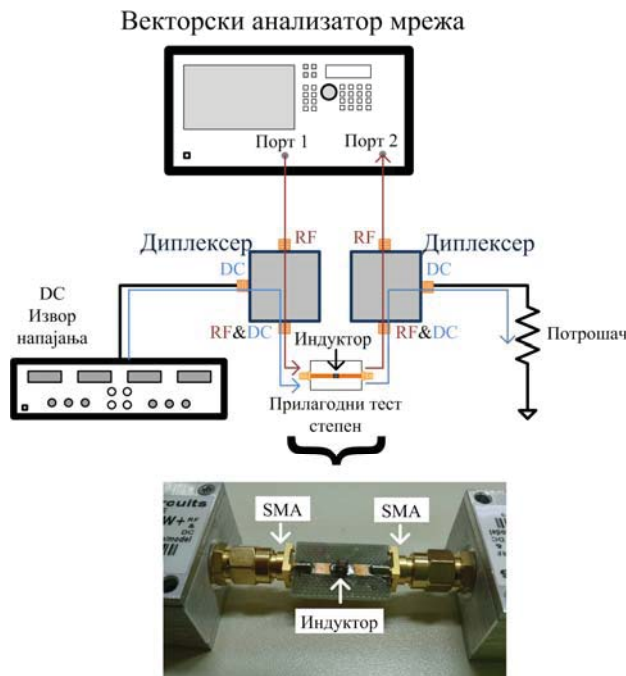
На слици 2 је приказана развијена поставка мерења. Састоји се од векторског анализатора мреже (*Vector Network Analyzer, VNA*) Agilent E5071B, прилагодног тест степена, два диплексера (bias tee), DC извора напајања од 30 V 2403 PRO Voltcraft, потрошача (оптерећења) за регулацију DC струје, укупне отпорности 55 Ω и снаге 16 W.

Диплексери су повезани на портове VNA како би спречили нежељени улазак DC сигнала у VNA. Према томе, DC сигнал креће из извора напајања до првог диплексера, затим кроз тестирани индуктор (монтиран на прилагодном тест степену који је повезан са оба диплексера преко њихових RF&DC улаза), и на крају до потрошача који омогућава да DC струја која протиче кроз индуктор буде контролисана. Диплексери Mini-Circuits ZFBT-4R2GW+ имају опег учестаности од 0,1 MHz до 4200 MHz, максимални дозвољени напон на DC порту 30 V и улазну струју од 500 mA.

RF сигнал VNA креће из порта 1, пролази кроз први диплексер и тестирани индуктор, затим кроз други диплексер, и на крају завршава у порту 2. Када RF сигнал из VNA протекне кроз индуктор, он се тада суперпонира на DC сигнал. Микрострип линије прилагодног степена су тако пројектоване да буду 50 Ω -ске, како би рефлексија сигнала била занемарена. Линије су израђене на двостраном FR4 PCB супстрату са 35 μm дебелим проводним слојем.

Пре мерења, неопходно је калибрисати мерни систем. Пошто је установљено да диплексери уносе слабљење у измерене резултате, двопортна калибрација је извршена постављањем калибрационог модула (N4693-60003, опсег фреквенција 10 MHz до 50 GHz, Agilent) између два диплексера. На тај начин је калибрациона раван померена до SMA (*SubMiniature version A*) конектора на прилагодном тест степену, пошто су утицаји каблова и диплексера уклоњени.

Како би се калибрациона раван проширила до индуктора, потребно је уклонити утицај самог PCB тест степена (без монтираног индуктора) применом de-embedding функције коју нуди VNA (Technical Information: “E5070B/E5071B ENA Series RF Network Analyzers User's Guide – Tenth Edition”, Agilent, 2007, pp. 285.). На тај начин добијени резултати представљају S-параметре тестираног индуктора, без утицаја микрострип линија и SMA конектора. После тога, S-параметре је потребно трансформисати у електричне параметре индуктора. У ту сврху, коришћен је специјално развијен софтвер IndCalc. Софтвер је детаљније приказан у (Ѓ. Џлебић, N. Blaž, A. Menićanin, Lj. Živanov, M. Damnjanović: “Application for fast determination of inductor’s electrical characteristics from S-parameters”, IEEE Int. Conf. on Microelectronics MIEL 2014, pp. 431-434, May 2014.) .



Слика 2. Мерна поставка (тестирани индуктор постављен на прилагодни тест степен са SMA конекторима).

Измерени резултати утицаја DC струје

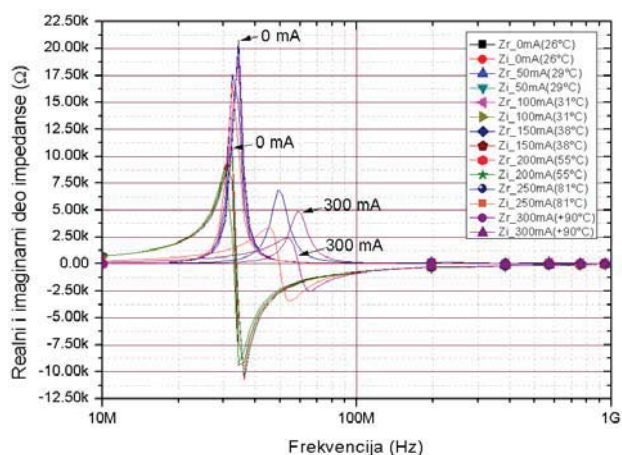
Мерна процедура је верификована тестирањем комерцијално доступне компоненте Coilcraft 0603AF-103XJR₂, стандардног EIA (Electronic Industries Association) кућишта 0603 (1,6 mm × 0,8 mm × 0,8 mm). Према подацима датих од стране произвођача, индуктивност и Q-фактор на фреквенцији од 10 MHz износе $L = 11,5 \mu\text{H}$ и $Q = 17$. Резултати мерења показују добро слагање са подацима произвођача, и износе $L = 11,36 \mu\text{H}$ и $Q = 15,9$.

Током мерења, вредност DC струје која је пропуштана кроз индуктор, премашивала је вредност струје коју је декларисао произвођач ($I_{\text{rms}} = 180 \text{ mA}$) у циљу испитивања понашања рада индуктора у тим условима, као и због испитивања утицаја DC струје на пораст температуре индуктора. Мерења су вршена са струјама у опсегу од 0 mA до 300 mA, у корацима од 50 mA. Као што се види, вредност струје I_{rms} , која проузрокује пораст температуре индуктора за 15°C у

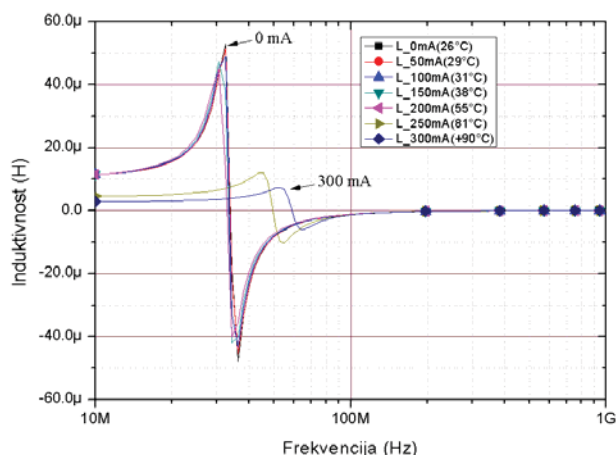
односу на температуру просторије, је прекорачена, и температура тела индуктора је мерена коришћењем дигиталног термометра PCE-T390 са температурном пробом Pt 100.

Електричне карактеристике феритних индуктора су одређене и зависе од особина феритног материјала, тј. од његове пермеабилности $\mu_r = \mu_r' - j \cdot \mu_r''$. Реални део μ_r' одређује индуктивност $L = \mu_r' \cdot L_0$, где је L_0 индуктивност индуктора у ваздуху, док имагинарни део μ_r'' одређује отпорност $R \approx \mu_r'' \cdot L_0$ на вишим фреквенцијама (скин ефекат се може занемарити). С обзиром да је пермеабилност фреквенцијски и температурно зависна, индуктор ће мењати своје понашање на различитим радним температурама и фреквенцијама (G. Stojanovic, M. Damnjanovic, Lj. Zivanov: "Temperature dependence of electrical parameters of SMD ferrite components for EMI suppression", Microel. Reliability, vol. 48, no. 7, pp. 1027-1032, 2008.).

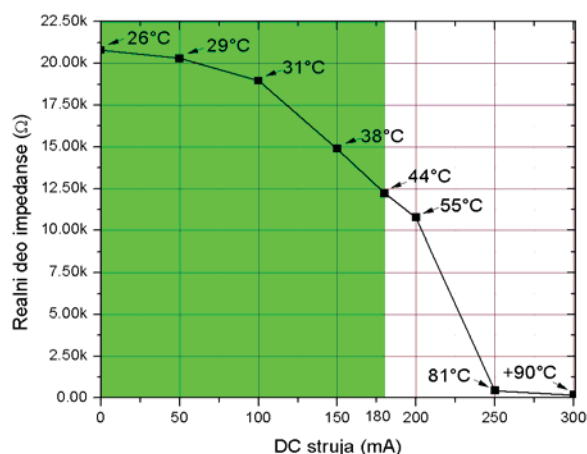
Индуктор има највећу вредност Z_r када кроз њега не протиче DC струја ($Z_{rmax} = 20,8 \text{ k}\Omega$, на $f_0 = 34,5 \text{ MHz}$). Како DC струја расте, расте и температура феритне компоненте (видети табелу 1). У опсегу фреквенција изнад 10 MHz, пермеабилност опада, и на тај начин смањује вредности L , R и Z_r и Z_i , као што је и приказано на сликама 3 до 6.



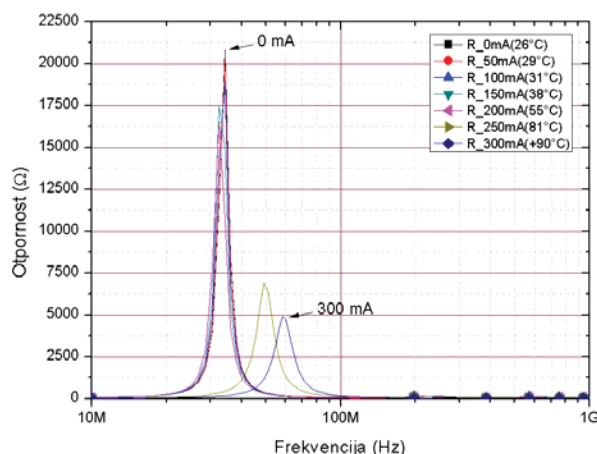
Слика 3. Израчунате вредности реалног и имагинарног дела импедансе и промене температуре услед пораста DC струје



Слика 5. Екстраховане вредности индуктивности индуктора индуктора за различите вредности DC струје.



Слика 4. Промена реалног дела импедансе и температуре индуктора услед пораста вредности DC струје на $f_0 = 34,5 \text{ MHz}$

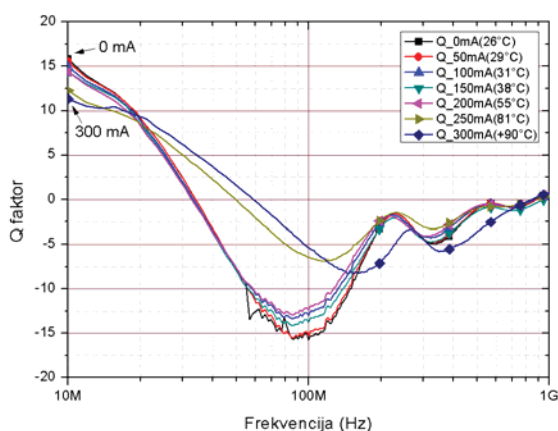


Слика 6. Екстраховане вредности серијске отпорности индуктора за различите вредности DC струје.

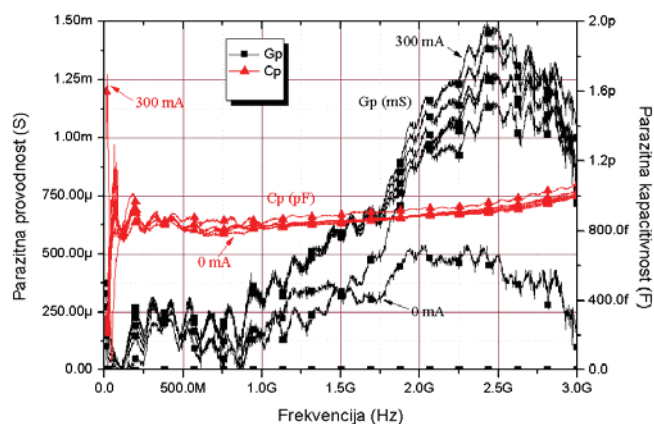
УТИЦАЈ DC СТРУЈЕ НА РАСТ ТЕМПЕРАТУРЕ ИНДУКТОРА И ЊЕГОВЕ
КАРАКТЕРИСТИКЕ НА $f_0 = 34,5 \text{ MHz}$

DC струја	Температура (°C)	Индуктивност (μH)	Z_r (kΩ)
0 mA	26	52,88	20,80
50 mA	29	51,28	20,28
100 mA	31	48,96	18,90
150 mA	38	37,85	14,88
200 mA	55	12,95	10,76
250 mA	81	7,04	0,435
300 mA	90 <	3,78	0,172

Импеданса има најнижу вредност када DC струја износи 300 mA ($Z_{r\max} = 4,9 \text{ k}\Omega$ на 58 MHz). Струја од 300 mA доводи до прегоривања и уништења индуктора, и свако даље мерење на том индуктору више није могуће. Слика 4 приказује опадање вредности реалног дела импедансе и пораст температуре индуктора услед пораста DC струје на резонантној фреквенцији $f_0 = 34,5 \text{ MHz}$ када је струја 0 mA. Зелена осенчена област представља опсег DC струје у којој не би требало да се јаве значајне варијације температуре и промене карактеристика индуктора (до $I_{rms} = 180 \text{ mA}$). Сличан закључак се може извести и за индуктивност (слика 5). На нижим фреквенцијама до 15 MHz, вредност индуктивности је приближно константна ($\sim 11 \mu\text{H}$) док је примењена DC струја нижа од 200 mA. За вредност DC струје од 250 mA, индуктивност драстично пада на $4,5 \mu\text{H}$, чак и на нижим фреквенцијама. На слици 6 је приказана екстрахована серијска отпорност у функцији од фреквенције за различите вредности DC струје. Као што је и очекивано, отпорност има највећу вредност када кроз индуктор не протиче струја, и та вредност је $20,8 \text{ k}\Omega$ на f_0 . Најмања измерена вредност отпорности се добија када је вредност струје 300 mA ($R = 4,9 \text{ k}\Omega$) и тада измерена температура индуктора премашује 90°C . Израчунате вредности Q-фактора за различите вредности струје приказане су на слици 7. Карактеристике Q-фактора имају исти облик за струје ниже од $I_{rms} = 180 \text{ mA}$. За веће вредности струје, Q-фактор драстично пада, као последица опадања индуктивности. Вредности паразитних капацитивности C_p и отпорности R_p (спољашњи параметри) приказани су на слици 8. Капацитивност није под утицајем различитих вредности струја, док проводност расте. Међутим, њихов утицај на измерене резултате се може занемарити.



Слика 7. Израчунате вредности Q-фактора индуктора за различите вредности DC струја.



Слика 8. Израчунате вредности паразитне капацитивности и проводности индуктора за различите вредности DC струја.

Представљеном мерном методом је омогућено да се одреди опсег DC струја, као и њена максимална вредност, када индуктор ради исправно. Са фамилије криви које представљају измерене индуктивности тестираног индуктора за различите вредности DC струја, читавањем се види да, када максимална вредност индуктивности на резонантној фреквенцији (при 0mA) опадне за више од 10% за дату струју, та вредност DC струје се сматра граничном. Даљим повећавањем струје, као што је приказано, довело би до значајног пада измерених вредности индуктивности и прегревања компоненте.

Мерна метода за одређивање утицаја DC струје на електричне карактеристике SMD индуктора развијена је на Факултету техничких наука у Новом Саду и Институту за мултидисциплинарна истраживања у Београду, у оквиру текућег пројекта бр. TP-32016 код Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.

Штампано –2014.

Мишљење рецензента

У овом техничком решењу је приказана мерна метода за одређивање електричних карактеристика SMD индуктора (индуктивности, отпорности, Q-фактора, реалног и имагинарног дела импедансе) за различите вредности DC струја у широком фреквентном опсегу. Мерна метода укључује и мерење промене температуре индуктора за различите вредности DC струја. Анализа је базирана на двопрístupном моделу индуктора са унутрашњим и спољашњим параметрима, јер унутрашњи параметри не укључују губитке који настају приликом монтирања индуктора на штампану плочу, па је зато потребно укључити и спољашње параметре. За израчунавање параметара индуктора, екстрахованих из измерених S-параметара помоћу векторског анализатора мреже, коришћен је софтверски алат IndCalc.


Мерна поставка се састоји од Agilent E5071B векторског анализатора мреже (VNA), прилагодног тест степена, два Mini-Circuits ZFBT-4R2GW+ диплексера, 2403 PRO Voltcraft извора напајања и потрошача од 55 Ω и снаге 16 W.

Портови 1 и 2 VNA су повезани на RF улазе диплексера. Први диплексер је преко DC улаза повезан на извор напајања, док је други диплексер преко свог DC улаза повезан на потрошач, и на тај начин се контролише струја која протиче кроз индуктор. Повезивањем портова VNA на диплексере, спречава се улазак нежељеног DC сигнала у мерни уређај. DC сигнал иде из извора напајања до првог диплексера, па затим кроз тестирани индуктор и на крају до потрошача. Када RF сигнал из VNA протекне кроз индуктор, који се налази између диплексера, он се тада суперпонира на DC сигнал.

Мерења су вршена у опсезима струје од 0 до 300 mA и резултати су показали да са порастом струје, нарочито када се премашу струја $I_{rms} = 180$ mA коју је декларисао произвођач, долази до опадања карактеристика индуктора, као што је и приказано на мерним графицима. Потврђена је и веза пораста температуре тела индуктора са повећањем струје, као резултат пораста губитака у језгру индуктора. Када вредност струје кроз индуктор достигне вредност од 300 mA, температура у индуктору премашује 90°C и тада долази до прегоривања и уништења компоненте.

У Београду,
22.12.2014.

Рецензент:


Др Зоран Јакшић
Институт за хемију, технологију и
металургију, Београд

Мишљење рецензента

Поред електричних карактеристика датих у каталогу произвођача, за инжењере и пројектанте електронских кола је веома важно да познају понашање индуктора под утицајем различитих вредности DC струја. Предложеном мерном методом се може испитати утицај DC струје на електричне карактеристике индуктора, као што су индуктивност, отпорност, Q-фактор, реални и имагинарни део импедансе, до учестаности од 4.2 GHz. Уочено је да вредности струје, чак и ниже од декларисане вредности, могу да проузрокују значајне губитке у индуктору, услед сатурације језгра индуктора. Као резултат, долази до изражених губитака у карактеристикама индуктора са порастом струје. Ово може проузроковати нестабилан рад електронских кола.

Показано је да максималне вредности реалног и имагинарног дела импедансе, индуктивности, отпорности и Q-фактора опадају, док вредности паразитних ефеката (паразитне капацитивности и проводности) расту са порастом DC струје.

Приказан је утицај DC струје на пораст температуре и функционалност компоненте. Ако је вредност струје нижа од $I_{rms} = 180$ mA, види се да компонента ради исправно. Међутим, веће струје узрокују пораст температуре тела индуктора, као резултат већих губитака у језгру. Самим тим, утврђена је корелација између пораста DC струје и пораста температуре индуктора.

Представљена мерна метода, заснована на приказаној мерној поставци и софтверском алату IndCalc, омогућава ефикасно и поуздано испитивање промена карактеристика индуктора за различите вредности DC струја.

У Београду,
23.12.2014.

Рецензент:



Др Обрад Алексић
Институт за Мултидисциплинарна
Истраживања, Универзитет у
Београду