МЕРЕЊЕ ПАРАМЕТАРА КАЛЕМА АУТОМАТИЗОВАНОМ МЕТОДОМ РАСТЕРЕЋЕЊА ЊЕГОВЕ СТРУЈЕ
AUTOMATIC MEASUREMENT OF COIL PARAMETERS BASED ON CURRENT DISCHARGE METHOD

Љ. Р. Голубовић – *Технички факултет Чачак, Светог Саве 65*

Садржај- *У раду се разматра применом микроконтролера аутоматизована метода мерења параметара калема - индуктивности и термогене отпорности, која је заснована на прецизном 16-битном временском праћењу растерећења струје калема, уз помоћ брзих електронских блокова, аналогно-дигиталног и дигитално-аналогног конвертора и микроконтролера. Извршена је анализа грешака при мерењу.*

Abstract- *This paper deals with an automatic measurement of coil parameters- inductivity and thermal-resistance. The proposed method is based on time-tracking of a coil discharge current with high-resolution. A discussion which relates to error analysis is presented.*

Key words: *embedded measurement systems, high-precision inductance measurement,*

1. УВОД

Мерење параметара калема - индуктивности L и термогене отпорности r, у основи захтева проучавање одзива разматраног калема на енергију његове побуде извором са стране.

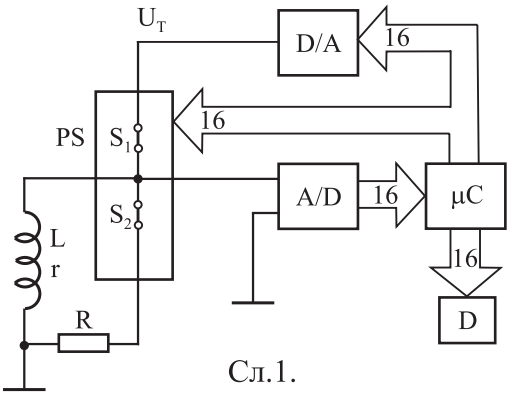
Савремена решења мерења индуктивности и термогене отпорности калема, релативне мерне несигурности реда 10^{-3}, у оквиру развојног програма LCR метара фирме TEGAM [1,2], заснована су на побуди калема са стране наизменичним простопериодичним напоном константна амплитуде и фреквенције. При овоме се коло понаша као одговарајућа импеданса, која одређује интензитет и фазни померај струје. Ако су величине $\underline{U}=U\angle\psi$ и $\underline{Z}=Z\angle\theta$ одговарајуће комплексне вредности напона и импедансе, тада је интензитет електричне струје одређен комплексним односом $\underline{I}=I\angle\varphi=\underline{U}/\underline{Z}=U\angle\psi/Z\angle\theta$, где је $\psi=\theta+\varphi$. Висока тачност мерења параметара L и r постиже се високом прецизношћу дефинисања амплитуде и фреквенције простопериодичног извора напона и мерењима високе тачности фазног помераја, напона и струје, применом 16-битних конвертора и процесора.

У овом раду је приказана аутоматизована метода мерења параметара калема растерећењем струје кроз њега и њеним прецизним праћењем у току времена, применом брзих 16-битних аналогно-дигиталних и дигитално-аналогних конвертора и микроконтролера.

2. ОСНОВА МЕТОДЕ

Метода мерења параметара калема временским праћењем растерећења његове струје приказана је шемом са слике Сл.1. Поступак при мерењу је следећи:

1) једносмерни напон U_T = 4,096[V] на излазу дигитално-аналогног конвертора D/A задаје се одговарајућом дигиталном вредношћу у микроконтролеру μC, која дејствује на улаз дигитално-аналогног конвертора; за то време електронски прекидачки склоп PS је у логичком стању S_1S_2 = 00;



Сл.1.

2) слањем из микроконтролера μC логичке наредбе S_1S_2 =10 преко електронског прекидача S_1=1 затвара се кроз калем L, унутрашње отпорности r према маси струја оптерећења калема

$$i_{L\max}=\frac{U_T}{r_p+r}, \qquad (1)$$

чиме се на улазу аналогно-дигиталног конвертора A/D јавља једносмерни пад напона

$$u_{L\max}=i_{L\max}r=\frac{U_T}{r_p+r}r=u_{1,A/D}, \qquad (2)$$

који се на излазу аналогно-дигиталног конвертора претвара у одговарајућу дигиталну вредност и меморише у микроконтролеру μC;

3) на основу израза (2) израчунавамо вредност термогене отпорности r калема за једносмерну струју,

$$r = \frac{u_{1,A/D}}{U_T - u_{1,A/D}} r_p, \qquad (3)$$

где је r_p=1[Ω] -позната отпорност затвореног стања електронског прекидача S_1;

4) следећом логичком наредбом S_1S_2=01 из микроконтролера μC успостављена вредност струје калема $i_{L\,max}$ се прекида отварањем електронског прекидача S_1 и затварањем електронског прекидача S_2, формира се коло растерећења струје калема преко унутрашње отпорности калема r, отпорности затвореног стања прекидача S_2 и отпорности отпорника R, која је много већа од отпорности r и r_p;

5) пошто се једновремено врши отварање електронског прекидача S_1 и затварање електронског прекидача S_2, струја у калему није имала времена да се промени, те се на редној вези отпорности r_p прекидача S_2 и отпорника R јавља напон растерећења $u_{2,A/D}$ који долази на улаз аналогно-дигиталног конвертора A/D; занемаривањем утицаја врло велике улазне отпорности аналогно-дигиталног конвертора напон растерећења се у времену мења по следећем експоненцијалном закону

$$u_{2,A/D}(t-t_0) = \frac{(r_p + r)U_T}{r_p + R} e^{-(t-t_0)(r_p+r)/L}; \qquad (4)$$

6) пошто је $R >> r_p, r,$ на основу (4) закључујемо да је $u_{2,A/D}(t_0) >> U_T$; у сагласности са одговарајућим програмом, одмах по једновременом отварању електронског прекидача S_1 и затварању S_2, у микроконтролеру μC почиње мерење времена t и регистровање бинарних цифара на излазу аналогно-дигиталног конвертора A/D; све док су све цифре на излазу из аналогно-дигиталног конвертора јединице, напон је већи од 4,096[V]; када се појави прва нула на најстаријем разреду цифара, значи да је напон растерећења $u_{2,A/D}(t_T)$ прошао кроз вредност U_T, где претходну вредност треба увек меморисати,

$$u_{2,A/D}(t_T - t_0) = U_T; \qquad (5)$$

при томе $t_T - t_0$ представља вредност временског интервала од затварања електронског прекидача S_2 до тренутка успостављања услова (5);

7) праћење напона $u_{2,A/D}(t - t_T)$ растерећења калема почиње у тренутку t_T и у сагласности са изразом (4) одвија се према изразу

$$u_{2,A/D}(t - t_T) = U_T\, e^{-(t-t_T)(r_p+r+R)/L}; \qquad (6)$$

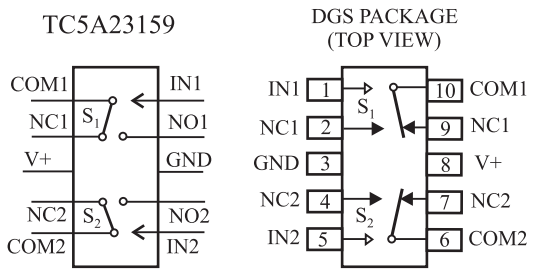
8) пошто су вредности $u_{2,A/D}(t-t_T)$, $(t-t_0)$ и U_T измерене на до сада описани начин, r_p и R -познате, а r израчунато на основу израза (3), то применом израза (6) добијамо индуктивност калема у облику

$$L = \frac{(t - t_T)}{\ln \frac{U_T}{u_{2,A/D}(t - t_T)}}. \qquad (7)$$

3. ТЕХНИЧКА РЕАЛИЗАЦИЈА АПАРАТУРЕ

Предложена метода мерења параметара калема, његове индуктивности L и термогене отпорности r приказана је шемом са слике Сл.1.

Прекидачки склоп PS састоји се од два електронска прекидача S_1 и S_2, уграђених на чипу типа TS5A23159 фирме Texas Instruments [3]. Прекидаче овог типа карактерише велика брзина рада, која је компатибилна са брзином рада процесора последње генерације и мала отпорност затвореног стања, која износи 1[Ω]. Шема и распоред пинова поменутог чипа за случај DGS PACKAGE приказана је на слици Сл.2. Овај чип карактерише следећих 10 пинова: 1) улазни напонски управљани пинови IN_1 и IN_2, редних бројева 1 и 5; 2) контактни пинови NO_1, NO_2 -нормално отворених, NC_1, NC_2 - нормално затворених и COM_1, $COMC_2$ -заједничких контаката; редни бројеви поменутих пинова {NO_1, NO_2}, {NC_1, NC_2}и {COM_1, $COMC_2$} су редом {2, 4}, {9, 7}и {10, 6}; 3) пинови напајања V^+ и уземљења GND носе одговарајуће редне бројеве 8 и 3.

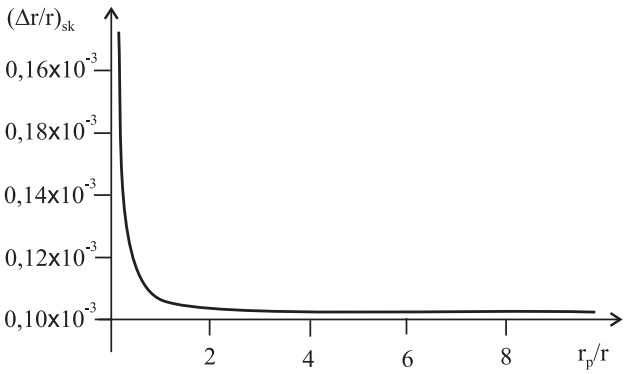


Сл.2.

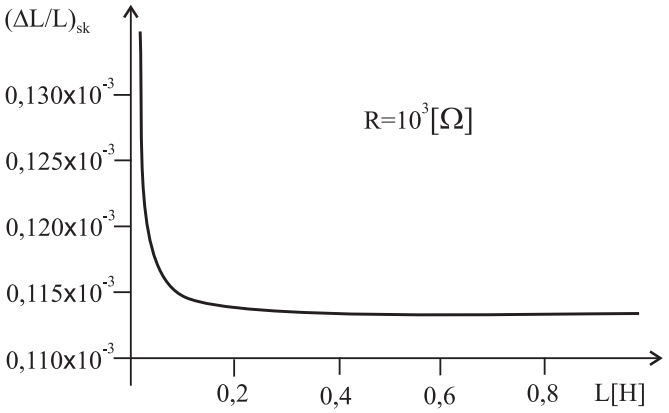
У мерној шеми са слике Сл.1 примењен је отпорник $R[\Omega] \sim (10^2 - 10^6)$, зависно од мерног опсега индуктивности L, који има високу тачност, условљену релативном грешком реда 10^{-4} и малом температурном нестабилношћу, реда $10^{-5}[1/^0 C]$, фирме Vishay или CADDOCK Electronics [4,5].

4. АНАЛИЗА ГРЕШАКА

Изрази (3) и (7) представљају одговарајуће формуле по којима се у микроконтролеру μC у шеми са слике Сл.1 врше израчунавања термогене отпорности r и индуктивности L испитиваног калема. Формуле за израчунавање укупне релативне средњеквадратне грешке параметара r и L зависе од релативних грешака величина које се у њима јављају у облику одговарајућих независно променљивих, које ћемо одредити на следећи начин.



Сл.3.



Сл.4.

Апроксимацијом тоталних диференцијала израза (3) и (7) одговарајућим прираштајима добијамо

$$\Delta r = \frac{\Delta u_{1,A/D}}{U_T - \Delta u_{1,A/D}} r_p + \frac{u_{1,A/D}}{U_T - \Delta u_{1,A/D}} \Delta r_p - \\ - \frac{u_{1,A/D}(\Delta U_T - \Delta u_{1,A/D})}{(U_T - \Delta u_{1,A/D})^2} r_p , \tag{8}$$

$$\Delta L = \frac{\Delta(t-t_T)(r_p + r + R)}{\ln \frac{U_T}{u_{2,A/D}(t-t_T)}} + \frac{(t-t_T)(\Delta r_p + \Delta r + \Delta R)}{\ln \frac{U_T}{u_{2,A/D}(t-t_T)}} - \\ - \frac{(t-t_T)(r_p + r + R)}{\ln^2 \frac{U_T}{u_{2,A/D}(t-t_T)}} \times \\ \times \left[\frac{\Delta U_T}{U_T} - \frac{U_T}{u_{2,A/D}(t-t_T)} \frac{\Delta u_{2,A/D}(t-t_T)}{u_{2,A/D}(t-t_T)} \right], \tag{9}$$

где вредности $\Delta u_{1,A/D}$, Δr_p, ΔU_T, $\Delta(t-t_T)$, Δr, ΔR и $\Delta u_{2,A/D}(t-t_T)$ у проведеној анализи представљају одговарајуће апсолутне грешке одређивања раније дефинисаних величина $u_{1,A/D}$, r_p, U_T, $(t-t_T)$, r, R и $u_{2,A/D}(t-t_T)$, које утичу на укупну грешку при мерењу.

У случају да се позитивни и негативни чланови на десним странама израза (8) и (9) пониште, добија се $\Delta r = 0$ и $\Delta L = 0$, што је са гледишта теорије вероватноће и теорије грешака немогуће, јер је вероватноћа оваквог догађаја једнака нули. Решење овог проблема нуди теорија грешака кроз формулу за средњеквадратну грешку, дефинисану као квадратни корен из збира квадрата свих компонената грешке, чиме се спречава њихово поништавање и омогућава геометријско сумирање.

Дељењем израза (8) и (3) и израчунавањем средњеквадратне вредности добијеног резултата налазимо формулу за израчунавање релативне средњеквадратне грешке одређивања параметра r у облику

$$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_{sk} = \sqrt{\left(\frac{\Delta u_{1,A/D}}{u_{1,A/D}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r_p}{r_p}\right)^2 + \\ + \frac{(\Delta U_T)^2 + (\Delta u_{1,A/D})^2}{(U_T - u_{1,A/D})^2}}. \tag{10}$$

Одавде се види да нестабилност $\Delta r_p / r_p$ отпорности $r_p = 1[\Omega]$ има одлучујућу улогу у процени релативне средњеквадратне грешке $(\Delta r / r)_{sk}$ при одређивању термогене отпорности r испитиваног калема. У циљу добијања што тачније вредности потрбно је извршити посебна мерења, чиме се овде нећемо бавити. Приликом даље анализе грешака сматраћемо да је $\Delta r_p / r_p \sim 10^{-4}$.

На сличан начин дељењем израза (9) и (7) и одређивањем средњеквадратне вредности добијеног резултата налазимо формулу за израчунавање релативне срдњеквадратне грешке одређивања параметра L, односно

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{sk} = \sqrt{\left(\frac{\Delta(t-t_T)}{t-t_T}\right)^2 + \frac{(\Delta r)^2 + (\Delta r_p)^2 + (\Delta R)^2}{(r + r_p + R)^2} + \\ + \frac{1}{\ln^2 \frac{U_T}{u_{2,A/D}(t-t_T)}} \times \\ \times \left[\left(\frac{\Delta U_T}{U_T}\right)^2 + \\ \left(\frac{U_T}{u_{2,A/D}(t-t_T)}\right)^2 \left(\frac{\Delta u_{2,A/D}(t-t_T)}{u_{2,A/D}(t-t_T)}\right)^2 \right]}. \tag{11}$$

За случај да су дате релативне грешке $\Delta(t-t_T)/(t-t_T)$, $\Delta r/(r+r_p+R)$, $\Delta r_p/(r+r_p+R)$, $\Delta R/(r+r_p+R)$, $\Delta U_T/U_T$ и $\Delta u_{2,A/D}(t-t_T)/u_{2,A/D}(t-t_T)$ реда величине 10^{-4}, анализом израза (10) и (11) добијају се вредности релативних средњеквадратних грешака $(\Delta r/r)_{sk}$ и $(\Delta L/L)_{sk}$ такође

реда 10^{-4}. Остварење овог резултата подразумева брзину успостављања импулса у микроконтролеру реда 1[ns], односно тактну фреквенцију од 1[GHz].

Када се зависност напонске разлике $U_T - u_{1,A/D}$ у изразу (10) на основу израза (3) представи преко односа r_p / r отпорности електронског прекидача r_p и термогене отпорности r калема, тада израз (10) прелази у облик

$$\left(\frac{\Delta r}{r}\right)_{sk} = \sqrt{\left(\frac{1}{2^{16}}\right)^2 + \left(\frac{1}{10^4}\right)^2 + \left(\frac{1}{2^{16}}\right)^2 \frac{1+(1+r_p/r)^2}{(r_p/r)^2}}, \qquad (12)$$

коме одговара дијаграм са слике Сл.3.

Са друге стране, ако су задати услови $\Delta(t-t_T) \sim 1[ns]$, $R[\Omega] \sim 10^4 >> r_p, r$, $u_{2,A/D}(t-t_T) = U_T/2$, $\Delta U_T/U_T \sim 1/2^{16}$, а временски интервал растерећења калема одаберемо као време трајања мерења $t_m = (t-t_T) \approx \tau_{L,B} = \ln 2L/(r_p + r + R) \approx \ln 2L/R$, онда се зависност релативне средњеквадратне грешке одређивања индуктивности L од времена мерења t_m може представити изразом (13), на основу кога је нацртан одговарајући дијаграм са слике Сл.4.

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{sk} = \sqrt{\left(\frac{10^{-9}}{t_m}\right)^2 + \left(\frac{1}{10^4}\right)^2 + \frac{1}{0{,}48}\left[\left(\frac{1}{2^{16}}\right)^2 + 4\left(\frac{1}{2^{16}}\right)^2\right]}. \qquad (13)$$

5. ЗАКЉУЧАК

У случају анализиране методе мерења параметара калема, индуктивности L и отпорности r, може се закључити следеће:

1) радну шему на слици Сл.1 чини релативно једноставна конфигурација аналогно-дигиталног и дигитално-аналогног конвертора, прекидачког склопа и микроконтролера, са високим степеном реконфигурабилности, 16-битном резолуцијом и великом брзином рада;

2) тачност мерења индуктивности и отпорности је висока и одговара релативној грешки реда (10^{-3}-10^{-4});

3) мерни поступак је крајње поједностављен, а тачност мерења повећана применом једносмерног напајања мерног елемента, односно калема.

Овај рад је подржала Влада Републике Србије, у оквиру пројекта *Реконфигурациони мерни системи,* под редним бројем T.R.11020.

ЛИТЕРАТУРА

[1] TEGAM, General Purpose, Portable/Impedance /LCR meter, http://www.tegam.com/product.asp? mo delNumber = 253

[2] LCR meter Measurement Accuracy, Application Note 301.html

[3] Texas Instruments, TS5A23159 1Ω DUAL SP DT ANALOG SWICH 5V/3.3V CHANNEL 2:1 MUL TIPLE XER/DE MULTIPLEXER, www.ti.com, CSDS 201 D-AUGUST 2005 -REVISED SEPTEMBER 2007

[4] Vishay-Ultra-High-Precision Hermetically Scaled Bulk Metal Fail Resistor, News Release from: Vishay, 15/09/2009; 0.3 ppm/^{0}C, -55 ^{0}C to 125 ^{0}C, 100 Ω to 150 kΩ, ±2ppm for6 years, thermal EMF 0,05 μV/^{0}C typical, voltage coefficient < 0.1ppm/V

[5] CADDOCK Electronics, High Performance Film Resistors, Low TC and Ultra-Precision Resistors, TC of 2.5 or 10 ppm/^{0}C, Tolerance to ±0,01%, Resistance Range 50 Ω to 125 MΩ, Short Film Catalog-2008