

**Прототип:**

Мерни систем за обраду сигнала са индуктивног сензора помераја

**Руководилац пројекта:** проф. др Владимир Срдих

**Одговорно лице:** проф. др Мирјана Дамњановић

**Аутори:** Мирјана Дамњановић, Миодраг Бркић, Снежана Ђурић, Љиљана Живанов

**Развијено:** у оквиру пројекта интегралних и интердисциплинарних истраживања ИИИ-45021

**Година:** 2013.

**Примена:** 1. 6. 2013.

**Кратак опис**

Мерење дужине, као једне од основних физичких величина, је од изузетног значаја у техници и људској делатности уопште. Основне методе за мерење помераја су механичке, електричне и радијационе. Електричне методе мерења помераја се базирају на непосредној конверзији помераја у неки електрични параметар. У овом техничком решењу је приказан мерни систем која омогућава обраду сигнала добијеног са индуктивног сензора, чија се индуктивност мења у зависности од помераја. Систем омогућава мерење малих помераја (мањих од 1 mm) у равни. Померај у равни се одређује мерењем индуктивности сензорских елемената.

Резултати мерења добијени коришћењем мерног система су упоређени са вредностима добијеним коришћењем анализатора импедансе и симулационог алата. Брзина мерења коју обезбеђује ова метода је корисна у системима где је потребно континуирано мерење у реалном времену.

**Техничке карактеристике:**

Мерни систем заснива рад на мерењу корена средње квадратне вредности напона (РМС) на сензору. Генератор синусоидалног сигнала се користи за побуђивање сензорских елемената. Како је индуктивност сензорских елемената веома мала (300-400 nH за већи, односно, 50-100 nH за мањи), мерна резолуција је 0.5 nH. Хардверска реализација интерфејса за обраду сигнала има радну фреквенцију од 8 MHz, што је највиша фреквенција која обезбеђује добру резолуцију и брзину мерења, без деградације изазване повећаном отпорношћу због површинског ефекта. Мерни систем је намењен за примену у роботизици, где је потребно брзо мерење за прецизну контролу робота актуатора, али се може лако прилагодити за употребу у другим апликацијама.

**Техничке могућности:**

Приказани мерни систем омогућава мерење индуктивности у системима где је потребно континуирано мерење индуктивности у реалном времену. Представљен мерни метод осигурава добру резолуцију, тачности и брзину мерења веома малих индуктивности, реда nH. Поред тога, интерфејс може лако прилагодити за употребу у другим апликацијама (као што је мерење капацитивности) без значајнијих измена.

**Реализатори:**

ФТН, Нови Сад

**Корисници:**

Факултет техничких наука, Нови Сад, Институт за мултидисциплинарна истраживања, Београд; ИРИТЕЛ А.Д, Београд.

**Подтип решења:**

M85 – Прототип

Мерење физичких величина има велики значај у савременим индустријским процесима. Да би се измерила једна физичка величина често је потребно мерити другу. На пример, у применама где се контролише кретање сензори морају да надгледају величине као што су померај, брзина и убрзање.

Сензори за мерење помераја могу бити класификовани у неколико група: отпорнички, индуктивни, капацитивни, пиезоелектрични итд. Индуктивни сензори су јефтини, једноставни и издржљиви. Имају велику поузданост и отпорни су на хемикалије, механичке вибрације и влажност. Неке врсте индуктивних сензора помераја се базирају на промени индуктивности калема у присуству металних предмета. Друге се базирају на промени коефицијента спреге услед механичке деформације структуре сензора; при томе је промена индуктивности сразмерна померају.

У овом техничком тешењу је приказан мерни систем за мерење помераја у равни. Индуктивни сензор, који се може користити за детекцију малих помераја (мањих од 1 mm) у равни, је описан у [M. Damnjanovic, Lj. Zivanov, L. Nagy, S. Djuric, B. Biberdzic: "A Novel Approach to Extending the Linearity Range of Displacement Inductive Sensor", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 11, 2008, pp. 4123-4126]. Мерењем улазне индуктивности сензора, може се одредити померај између сензорских елемената. Индуктивност се одређује помоћу генератора синусоидалног напона и напонског разделника, мерењем напона на сензору. Измерени напон је пропорционалан импеданси, која се мења у зависности од помераја.

Постоји различите методе за мерење индуктивности. Најчешће су мостне методе [Michal Szyper: "*Inductance Measurement*", CRC Press LLC, 2000. Available at: <http://www.engnetbase.com>]. Како ове методе обично захтевају ручна подешавање елемената моста, оне нису употребљиве за континуална мерења. Развијени су многи аутоматски системи који користе мостне методе [M.A. Atmanand, V.J. Kumar, V.G. Murti: "A Microcontroller-Based Quasi-Balanced Bridge for the Measurement of L, G and R", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 45, No. 3, 1996, pp. 757-761], а неки од њих са врло брзим и прецизним мерењима [L. Angrisani, A. Vaccigalupi, A. Pietrosanto: "A Digital Signal-Processing Instrument for Impedance Measurement", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 45, No. 6, 1996, pp. 930-934]. Међутим, ови системи су намењени за мерење већих индуктивности, што се не може применити за наш сензор, јер је његова индуктивност реда nH.

Нове методе са синусоидалним фитовањем мереног напона на сензору [T. Radil, P.M. Ramos, A.C. Serra: "Impedance Measurement With Sine-Fitting Algorithms Implemented in a DSP Portable Device", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 57, No. 1, 2008, pp: 197-204] имају сличне недостатке. Оне захтевају комплексне алгоритме, да би обезбедили прецизне резултате. Пошто ове методе укључују A/D конверзију мереног сигнала, док мерење малих индуктивности захтева фреквенције реда MHz, време обраде узоркованих података било би исувише дуго, чак и са модерним дигиталним процесорима.

За динамичка мерења помераја, методе које користе LC осцилаторна кола су једноставна решења, пошто се мерење индуктивности своди на много једноставније мерење фреквенције. Међутим, оваква кола немају велику прецизност [M.E. Rizkalla, H.C. Gundrum, M.T. Kara: "A Microprocessor-Based Dynamic Inductance/Capacitance Meter", *Proc. the 35th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 1, 1992, pp: 140-143], [M. Hruškovic, J. Hribik: "Digital Capacitance and Inductance Meter", *Measurement Science Review*, Vol. 8, No. 3, 2008, Section 3], углавном због фреквенцијске зависности капацитивних елемената, који имају значајну промену особина у

функцији од времена и температуре. Методе које мере резонантну фреквенцију паралелних или серијских LC кола мерењем максималне напона су још мање тачне, али корисне у неким апликацијама, нпр. где је потребно бежично мерење [R. Nopper, R. Niekrawietz, L. Reindl: “Wireless Readout of Passive LC Sensors”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 59, No. 9, 2010, pp: 2450 – 2457].

Постоје и бројне методе за мерење индуктивности на бази струјно-напонских мерења. Мерењем вектора напона и струје на сензору, могуће је одредити његову импедансу [ Ibrahim, Khalid M. Abdul-Karim, Majid A. H. “Digital Impedance Measurement by Generating Two Waves”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 34, No. 1, 1985, pp: 2–5]. Ова метода се често користи у комерцијалним LCR метрима [„*The Impedance Measurement Handbook-A Guide to Measurement Technology and Techniques*”, Agilent Technologies, December 2000], који су практични само у лабораторијским условима [Siblini, Ali; Khalil, Ismaïl; Chatelon, Jean Pierre “Original Design for a Micro-Inductance Prototype Characterized Using a New Technique of Inductive Measure“, *Sensor Letters*, Vol. 5, No. 1, March 2007, pp. 51-54].

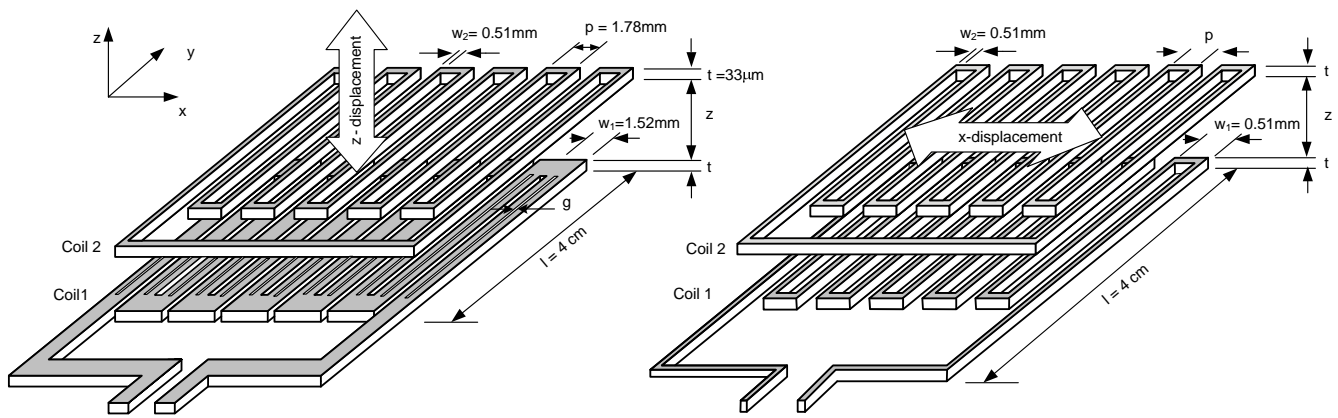
У овом техничком решењу је представљена поједностављена струјно-напонска метода за мерење индуктивности. Како сензор помераја има доминантан утицај индуктивне компоненте, може се мерити као идеална индуктивност ако је радна фреквенција већа од 1 MHz [M. Damnjanovic, Lj. Zivanov, L. Nagy, S. Djuric, B. Biberdzic: “A Novel Approach to Extending the Linearity Range of Displacement Inductive Sensor”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 11, 2008, pp. 4123-4126]. Ако напонски генератор има стабилну фреквенцију, тада мерење вектора или фазе није неопходно, већ се може користити само мерење РМС напона.

### Индуктивни сензор помераја у равни

Сензор помераја се састоји од два елемента, од којих сваки има пар калемова типа меандар, окренутих један другом. У сваком пару, један од калемова је непокретан (калем 1). Између улазних прикључака калема 1 мери се улазна индуктивности  $L_S$  (слика 1). Други калем (калем 2) је кратко спојен.

Када се калемови налазе тачно један изнад другог, њихова међусобна индуктивност је максимална. Координатни систем је тако усвојен да се сматра да је тада сензор у нултом положају, тј. координата  $x = 0$ . Променом положаја калема 2 у односу на калем 1 мења се њихова међусобна индуктивност, а тиме и улазна импеданса сензора помераја. Дакле, циљ је да се на основу промене улазне импедансе сензора одреди померај калема 2 у односу на калем 1. Један сензорски елемент се користи за мерење помераја у правцу  $x$ -осе, а други у правцу  $z$ -осе.

Посматрано из угла мерења индуктивности, принцип рада мерног система ће бити исти за оба сензорска елемента, било да је већих или мањих димензија, једино се мења мерни опсег индуктивности. Стога, за тестирање је коришћен само сензорски елемент који мери  $x$ -померај. Геометријски параметри сензорског елемента веће и мање величине елемената сензора приказани су у Табели 1, као и електрични параметри мерени анализатором импедансе HP4194A.



Слика 1. Индуктивни сензор помераја у равни се састоји од два сензорска елемента, који мере померај у правцу  $x$ -осе и  $z$ -осе.

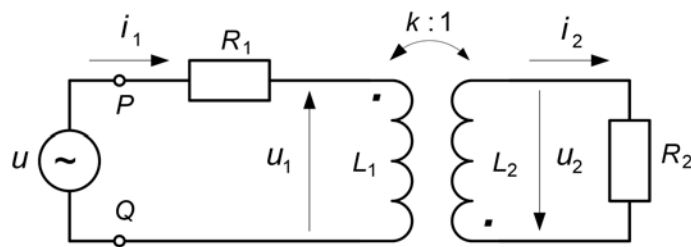
Табела 1. Геометријски параметри и мерене вредности електричних параметара мањег и већег сензорског елемента

| Геометријски параметри сензора |   | Већи сензор | Мањи сензор |
|--------------------------------|---|-------------|-------------|
| $w$                            | Ширина проводне линије                  | 0.51 mm     | 0.51 mm     |
| $l$                            | Дужина проводне линије                  | 4 cm        | 2 cm        |
| $t$                            | Дебљина проводне линије                 | 33 μm       | 33 μm       |
| $p$                            | Растојање између суседних проводника    | 0.51 mm     | 0.51 mm     |
| $N$                            | Број завојака                           | 10          | 5           |
| Мерене вредности на 8 MHz      |   |             |             |
| $L_1$                          | Индуктивност калема 1                   | 442 nH      | 152 nH      |
| $R_1$                          | Отпорност калема 1                      | 1.92 Ω      | 0.62 Ω      |
| $L_S$ (for $x=0$ )*            | Илазна индуктивност сензорског елемента | 290 nH      | 96.8 nH     |
| $R_S$ (for $x=0$ )*            | Улазна отпорност сензорског елемента    | 2.80 Ω      | 0.67 Ω      |

Користећи еквивалентно коло сензорског елемента приказано на слици 2, улазна импеданса сензорског елемента се може одредити као

$$Z_{eq} = R_1 + \frac{k^2 \omega^2 L_1 L_2 R_2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j\omega L_1 \cdot \frac{R_2^2 + \omega^2 L_2^2 (1 - k^2)}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2}, \quad (1)$$

где су  $R_1$  и  $L_1$  су отпорност и индуктивност калема 1,  $R_2$  и  $L_2$  су отпорност и индуктивност калема 2, а  $k$  је коефицијент спреге између калема (који зависи од помераја). Користећи модел представљен на слици 2, развијен је симулациони алат за процену улазне индуктивности у односу на  $x$ -померај сензорског елемента. Симулациони алат је развијен на основу методе парцијалне индуктивности [M. Damnjanovic, Lj. Zivanov, L. Nagy, S. Djuric, B. Biberdzic: "A Novel Approach to Extending the Linearity Range of Displacement Inductive Sensor", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 44, No. 11, 2008, pp. 4123-4126], [S.M. Djuric, L.F. Nagy, M.S. Damnjanovic, "Detection of Ground Reaction Force Using a Miniaturized Inductive Displacement Sensor", *Proc. 14<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference EPE/PEMC 2010*, pp: T15-7-T15-12].



Слика 2. Еквивалентно коло сензорског елемента

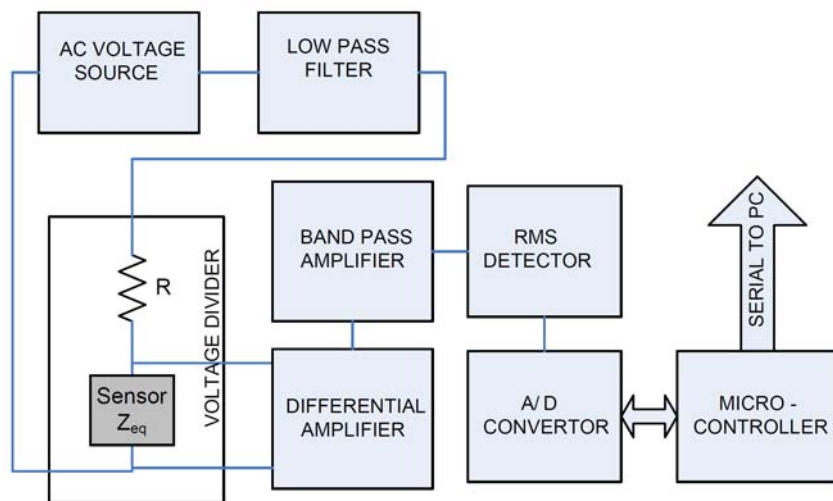
### Мерни систем за обраду сигнала са индуктивног сензора помераја

Мерни систем заснива рад на мерењу корена средње квадратне вредности напона (РМС) на сензору. Генератор синусоидалног сигнала се користи за побуђивање сензорских елемената. Како је индуктивност сензорских елемената веома мала (300-400 nH за већи, односно, 50-100 nH за мањи), мерна резолуција је 0.5 nH.

Да би се мерила тако мала промена индуктивности, напонски генератор би требао да ради на што вишој фреквенцији, да би се обезбедио довољно велик напон на сензорском елементу. С друге стране, повећањем фреквенције (изнад 8 MHz) почиње да све више да негативно утиче површински ефекат на импедансу, јер се повећава отпорност сензорског елемента.

Због тога је као радна фреквенција изабрана фреквенција од 8 MHz, што је највиша фреквенција која обезбеђује добру резолуцију и брзину мерења, без деградације изазване повећаном отпорношћу због површинског ефекта. Мерни систем за мерење индуктивности сензорског елемента је приказан на слици 3.

DDS уређај (Discrete Digital Synthesis) је коришћен као извор сигнала. Он омогућава генерисање веома прецизних и стабилних синусоидалних сигнала. DDS који се користи у овом колу има радну фреквенцију 75 MHz. Да би се елиминисали хармоници, нископропусни филтар (LP) са два пола се користи. Реализован је помоћу операционог појачавача и користи се за филтрирање излазног сигнала ДДС уређаја. Беселов тип LP филтра је дизајниран користећи софтвер "Filter Pro Desktop". Гранична фреквенција LP филтра је 10 MHz, па синусоидални сигнал није значајније ослабљен. Слабљење хармоника на 75 MHz је -35 dB.



Слика 3. Мерни систем за мерење индуктивности сензорског елемента

Синусоидални сигнал се води на напоски разделник, састављен од отпорника  $R$  и сензорског елемента  $Z_{eq}$  (слика 3). Одговарајућа преносна функција кола је:

$$A_v = \frac{v_s}{v_i} = \frac{Z_{eq}}{R + Z_{eq}}, \quad (2)$$

где је  $v_s$  напон сензорског елемента,  $v_i$  је улазни синусоидални напон. Импеданса сензорског елемента може бити приказана као редна веза  $L_S$  и  $R_S$ ,

$$Z_{eq} = R_S + j\omega L_S, \quad (3)$$

где је  $\omega$  учестаност улазног напонског генератора. Ако се у једначину (2) уврсте амплитуде напона, импеданса  $Z_{eq}$  може бити одређена као:

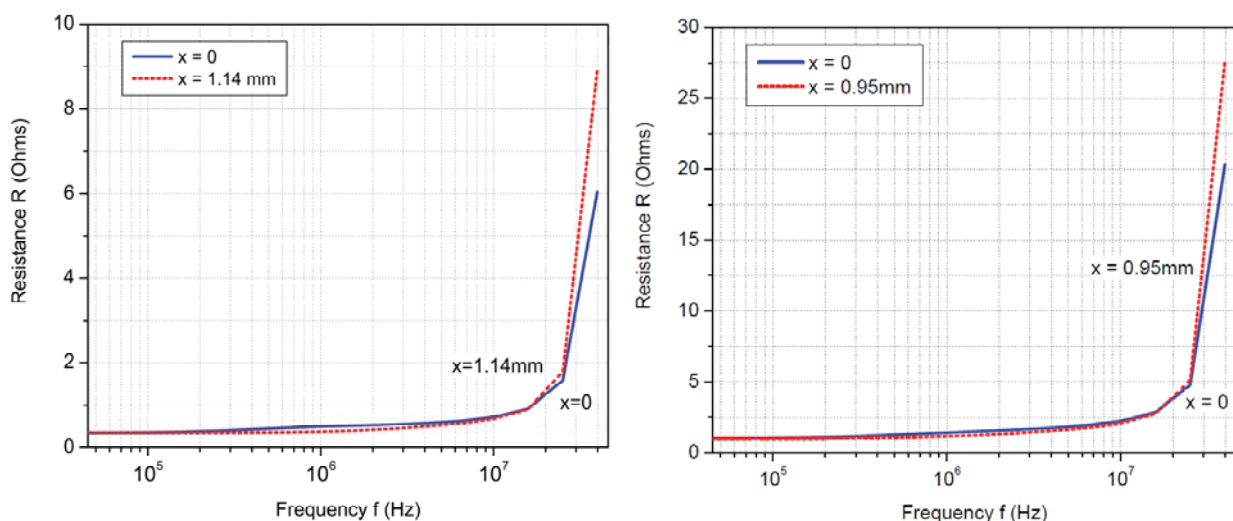
$$Z_{eq} = \frac{R \cdot (V_{s\_peak} / V_{i\_peak})}{1 - (V_{s\_peak} / V_{i\_peak})}, \quad (4)$$

где је  $V_{s\_peak}$  вршна вредност напона на сензорском елементу, а  $V_{i\_peak}$  вршна вредност напона генератора. Индуктивност  $L_S$  може бити израчуната коришћењем мерене вредности  $V_{s\_peak}$ , пошто су  $V_{i\_peak}$  и  $R$  познате ( $V_{i\_peak} = 500\text{mV}$ ,  $R = 100 \Omega$ ).

Индуктивности сензорског елемента може се одредити као:

$$L_S = \frac{\sqrt{|Z_{eq}|^2 - R_S^2}}{2\pi f}. \quad (5)$$

Када се калем 2 помера у  $x$ - $z$  равни изнад непомичног калема 1, мењају се и индуктивност и отпорност сензорског елемента. Због површинског ефекта  $R_S$  се повећава са фреквенцијом. Међутим, као што се може видети на слици 4, ако је радна фреквенција 8 MHz, тада се утицај површинског ефекта може занемарити. Такође, померање калема 2 у односу на калем 1 не утиче значајно на  $R_S$ . За дато растојање између калемова 1 и 2,  $z = 0.1 \text{ mm}$ , отпорност се мења у опсегу од  $0.62 \Omega$  до  $0.67 \Omega$  у посматраном опсегу мерења (од  $x = 0$  до  $x = 0.95 \text{ mm}$ ) за мањи сензорски елемент. Ако се усвоји средња вредност  $R_S = 0.65 \Omega$ , максимална грешка која се прави је само  $0.35 \%$ . На пример, ако би се сензорски елемент посматрао као идеална индуктивност (тј. за  $R_S = 0$ ), максимална грешка би била  $1.15 \%$ .



Слика 4. Отпорност мерена анализатором импедансе (а) мањег и (б) већег сензорског елемента

Сличан закључак се може извести и за већи сензорски елемент. За дато  $z$ -растојање између калема 1 и 2,  $z = 0.1 \text{ mm}$ , отпорност се мења од  $1.92 \Omega$  до  $2.80 \Omega$  у посматраном опсегу мерења помераја. Опет, узимајући константну средњу вредности  $R_S = 2.36 \Omega$ , максимална грешка је само  $0.36\%$ .

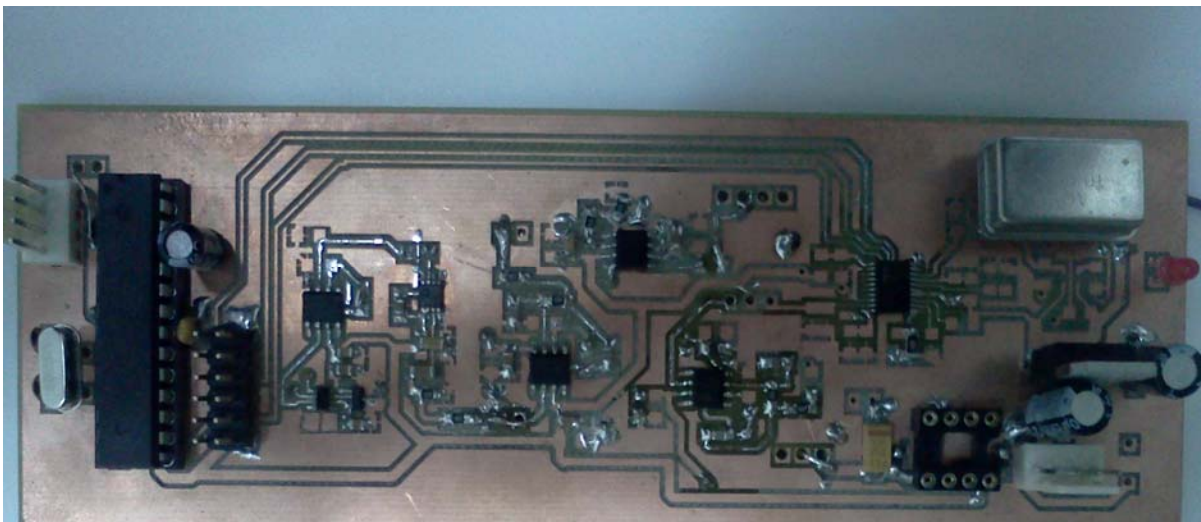
Пошто се користи познат DDS напонски генератор, тачна вредност вршног напона и фреквенције је позната. Коришћени SMD отпорници су веома прецизни, са толеранцијом од  $0.1\%$ , тако да  $Z_{eq}$  може бити израчунато мерењем вршне вредности  $V_{s\_peak}$ . Отпорност  $R$  је изабрана тако да ограничи струју у напонском разделнику испод максималне дозвољене вредности струје оперативног појачавача, који се користи у склопу LP филтра. Да би се елиминисао утицај проводника, „four-wire“ мерна метода се користи за мерење напона на сензорском елементу. Различити парови електрода се користе за мерење струје и напона.

Пошто се сензорски елемент понаша као антена, постоји могућност да ће значајан шум бити суперпониран на користан сигнал. Пропусник опсега се користи да елиминира све сигнале на фреквенцијама различитим од  $8 \text{ MHz}$ . Реализује се помоћу двополног активног филтра помоћу оперативног појачавача. Пошто извор напона генерише синусоидални сигнал,  $V_{s\_peak}$  се може одредити мерењем RMS вредности напона на сензорском елементу. RMS напон за синусоидални сигнал је:

$$V_{s\_RMS} = V_{s\_peak} / \sqrt{2}. \quad (5)$$

Као RMS детектор се користи коло AD8361. Излаз овог кола је DC напон пропорционалан RMS вредности улазног сигнала [„AD8361 LF to 2.5 GHz TruPwr™ Detector Data Sheet”, [www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8361.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8361.pdf)]. A/D конвертор који је коришћен је AD7991, са 12-bit резолуцијом и максималним временом конверсије од  $1 \mu\text{s}$ . Због шума у систему, корисна резолуција је само 9 бита. Спољашњи референтни напон омогућава подешавање мерног опсега A/D конвертора на пун опсег мереног сигнала  $V_s$ .

Једноставни 8-битни микроконтролер се користи у овом интерфејсу да контролише и чита податке из A/D конвертора. Иако је овај контролер нема DSP функцију и не може постићи сложену обраду сигнала, има RISC архитектуру и максимум од  $20 \text{ MIPS}$ , који омогућава читање података из A/D конвертора по стопи од  $10^5$  узорака у секунди, обавља додатно усредњавање сваких 100 узорака, и тако делује као LP филтер. Коришћењем једначина (2) до (5), вредност  $L_s$  из мереног напона  $V_s$  се може одредити.

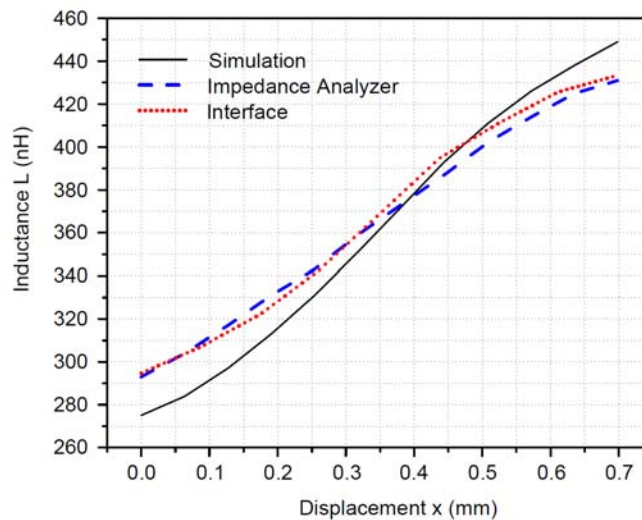


Слика 5. Прототип мерног система за мерење индуктивности сензорског елемента.

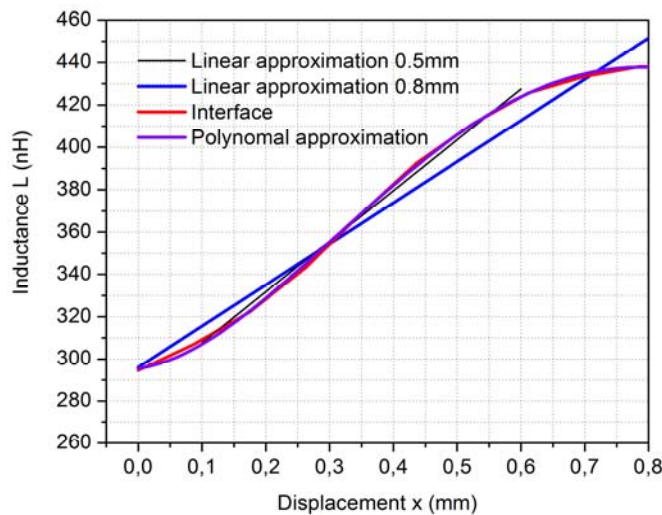
Добијени резултати се шаљу на рачунар путем серијске комуникације, где се врши приказивање и чување измерених података. Вредност индуктивности  $L_s$  се мери сваке милесекунде. Прототип мерног система за мерење индуктивности сензорског елемента је приказан на слици 5.

### Могућности представљеног прототипа

Да би се верификовали резултата добијени коришћењем развијеног мерног система, упоређени су резултати мерења добијени коришћењем мерног система са вредностима добијеним коришћењем анализатора импедансе HP4194A у опсегу до 40 MHz и симулационог алата. Резултати су приказани на сликама 6 и 7, за већи сензорски елемент. Удаљеност између калемова 1 и 2 је  $z = 0.1 \text{ mm}$ .



Слика 6. Промена улазне индуктивности у зависности од  $x$ -помераја добијена коришћењем анализатора импедансе HP4194A, мерног система и симулационог алата, за већи сензорски елемент,  $z = 0.1 \text{ mm}$ .



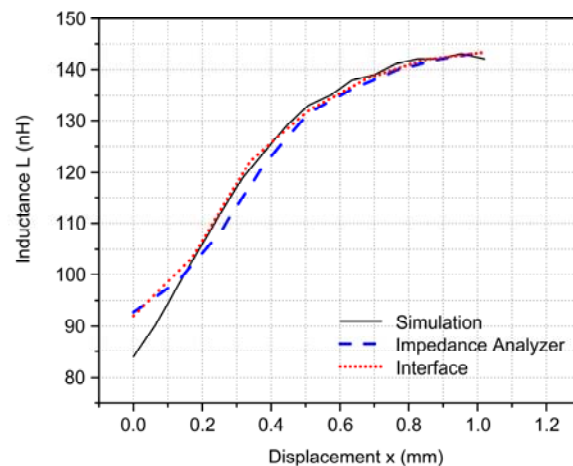
Слика 7. Апроксимација улазне индуктивности у зависности од  $x$ -помераја, добијена мерним системом за већи сензорски елемент,  $z = 0.1 \text{ mm}$ .



Линеарни опсег већег сензорског елемента у коме се мери померај је 0.5 mm, у опсегу од 0.1 mm до 0.6 mm, са максималним апсолутним одступањем од линеарне апроксимације мањим од 1 %. За мерни опсег од 0.8 mm одступање од линеарне апроксимације је 3.2 %, али уз коришћење полиномијалне апроксимације трећег реда, одступање је занемарљиво и опсег мерења је проширен, са мањим резолуцијом у нелинеарним деловима функције помераја. Употребом микроконтролера, имплементација полиномијалне апроксимације се лако постиже, након дигитализације  $V_{s\_RMS}$  сигнала. Апроксимације су приказане на слици 7.

Треба напоменути да мерни систем обезбеђује добру прецизност и проширени линеарни мерни опсег, до 0.8 mm (тј. 160 nH) уместо раније постигнутих 0.5 mm (i.e. 120 nH). Брзина мерења је 1 ms, али се може лако повећати пошто А/D конвертор који користи у мерном систему има већу брзину конверзије.

Сличан закључак може се изводе за мањи елемент сензора. И за мањи сензор, мањих димензија а тиме и индуктивности, обезбеђена је добра тачност, као што се може видети на слици 8.



Слика 8. Промена улазне индуктивности у зависности од  $x$ -помераја добијена коришћењем HP4194A, мерног система и симулационог алата, за мањи сензорски елемент,  $z = 0.1$  mm.

У овом техничком решењу је приказан прототип мерног система за мерење индуктивности. Намењен је за примену у роботизици, где је потребно брзо мерење за прецизну контролу робота актуатора, али се може лако прилагодити за употребу у другим апликацијама.

Приказана мерна метода је тестирана на претходно развијеном сензору помераја, за две различите величине сензора. Мерни систем користи једноставан, али прецизан начин мерења ефективне вредности напона на елементу сензора.

Приказани мерни систем омогућава мерење индуктивности у системима где је потребно континуирано мерење индуктивности у реалном времену. Представљен мерни метод осигурава добру резолуцију, тачности и брзину мерења веома малих индуктивности, реда nH.

Главна предност овог система је његова универзалност. Може се успешно користити за мерење индуктивности, али такође може да се лако прилагодити за употребу у другим апликацијама (као што је мерење капацитивности) без промена у хардверу.

**Прототип мерног система за обраду сигнала са индуктивног сензора помераја развијен је на Факултету техничких наука у Новом Саду, у оквиру текућег пројекта бр. ИИИ-45021 код Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије.**