

# Princip merjenja kapacitivnosti in induktivnosti z oscilatorskim vezjem

**Grega Močnik, Boris Hrastnik, Boštjan Vlaovič**

*Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru*

*Koroška cesta 46, 2000 Maribor, Slovenija*

*E-pošta: {grega.mocnik, bostjan.vlaovic}@um.si, boris.hrastnik@student.um.si*

## Principle of measuring capacitance and inductance using an oscillator circuit

*Capacitance and inductance of basic electronic components change over time. Since commercial instruments are quite expensive, our research work focuses on developing a measuring method that would enable us to build affordable instrument with (nearly) the same properties as the commercial implementations have. This article presents prototype implementation of such affordable instrument. The method for determining capacitance and inductance of the components is designed as an oscillator frequency measurer. Frequency of the oscillation is dependant on the component with the unknown value. We determine the value of the component based on the measured frequency. We show that we have had a partial success. The biggest advantages of such method is a low price and simplicity. Although the simulation was very promising, we have to increase the precision of the prototype for the capacitance measurement.*

## 1 Uvod

V okolju, kjer poteka razvoj in testiranje elektronskih naprav, je običajno težko izračunati in določiti neznane vrednosti kapacitivnosti in induktivnosti elektronskih komponent. V praksi se zato pogosto uporabljajo različne metode, ki na eksperimentalen način določajo vrednosti teh komponent. Metode se razlikujejo po namembnosti in uporabi, ceni izvedbe in zanesljivosti.

Profesionalni merilniki za laboratorijsko uporabo so natančni in uporabni, a imajo visoko ceno in kljub visoki natančnosti ne zagotavljajo nujno tudi dobrega uporabniškega vmesnika in povezljivosti z napravo. Posledično lahko rezultate merjenja pogosto spremljamo samo na prikazovalnikih in naprave ne moremo povezati z osebnim računalnikom z namenom spremljanja poteka merjenja.

Glavni razlog za razvoj merilnika je bila želja, da bi lahko s cenovno dostopnim lastno razvitim merilnikom izmerili približne vrednosti kapacitivnosti in induktivnosti. Lasten merilnik bi omogočal tudi povezljivost z osebnim računalnikom.

Impedančne merilne metode so ene izmed osnovnejših metod načrtovanja sodobnih merilnih sistemov. Z njimi lahko določimo neznano elektronsko komponento in veliko drugih fizikalnih veličin, kot sta impedanca ali reak-

tanca. Impedanca  $Z$  je kompleksna veličina, ki predstavlja upiranje elementa izmeničnemu toku AC pri določeni frekvenci. Grafično jo predstavimo kot vektor z imaginarno vrednostjo, reaktanco  $X$  in ohmsko upornostjo  $R$ . V letih raziskav so se razvili različni načini merjenja, vsak ima svoje prednosti in slabosti. Pri izbiri optimalne metode je potrebno upoštevati željeni merilni razpon in natančnost metode.

Mostična metoda temelji na principu ohranjanja ravnovesja mostiča, ki ga je potrebno ročno nastaviti. Pogoji ravnovesja je, da imajo vsi elementi enake vrednosti, kar pa je s spreminjanjem merjenca težko doseči. Metodo lahko opišemo kot dva napetostna delilnika z napetostmi, katerih razlika predstavlja izhod iz mostiča. Medtem ko je pretok toka skozi detektor  $D$  enak nič in je mostič v ravnovesju, lahko določimo vrednost merjenca skozi razmerje ostalih elementov, vključenih v mostič. Mostič je lahko sestavljen iz različnih elementov: tuljav, kondenzatorjev, uporov ali različnih kombinacij teh elementov, vendar enačba za izračun ostane enaka. Metoda je cenovno ugodna, natančna in omogoča velik frekvenčni razpon skozi uporabo različnih elementov, njen največji problem je ohranjanje ravnovesja.

Resonančna metoda deluje na principu ustvarjanja izmenične napetosti s pomočjo izbranih elementov. Nihajni krog vsebuje elemente, tuljavo, kondenzator in upor, ki jih lahko nadomestimo z merjencem. Vrednost  $Q$  faktorja je lahko izmerjena preko napetosti na nastavljenem kondenzatorju. Tudi s to metodo lahko dosežemo dobro natančnost pri manjših impedancah, vendar je potrebno izbrati takšne elemente, da nihajni krog zaniha v resonanci.

Direktna tokovno-napetostna metoda temelji na spremembi izhodne napetosti, ko na element z neznano impedanco priklopimo znano vhodno izmenično veličino. Tok se lahko izmeri z ampermetrom ali prek napetosti na uporu z nizko upornostjo.

Metode merjenja impedance se lahko do neke mere avtomatizirajo. Mostično metodo lahko avtomatiziramo, da bo sama zagotavljala ravnovesje mostiča. Resonančno metodo lahko poenostavimo tako, da odstranimo izvor izmenične napetosti, dodamo primerjalnik napetosti in s tem omogočimo, da nihajni krog zaniha z določeno frekvenco. Direktno merjenje lahko poenostavimo na izvor, merjenec in detektor. Detektor je lahko analogno-

digitalni pretvornik ali časovnik, v katerega pripeljemo vrednost izvora in izhodne veličine, iz razlike pa lahko določimo vrednosti posameznega elementa. Z uporabo digitalnih pristopov se nam ponudijo tudi dodatne rešitve, na primer uporaba namenskih integriranih vezij, ki z uporabo ene izmed zgornjih metod pretvorijo impedanco v digitalno obliko, na primer integrirano vezje AD5933 proizvajalca Analog Devices [1].

V prispevku predstavljamo resonančno metodo, ki smo ji prilagodili oscilatorsko vezje in pretvorbo merjenih vrednosti in digitalno obliko ter dodali povezavo z osebnim računalnikom. Preko merjenja in referenčnih elementov smo ustvarili razliko vhodne napetosti in jo povezali v diferenčni primerjalnik napetosti, ki je na podlagi razlike med vhodno in referenčno napetostjo zgeneriral frekvenco. Za merjenje posamezne veličine sta potrebni dve vezavi, v primeru kapacitivnosti je referenčni element tuljava, za meritev induktivnosti pa kondenzator. Pri izbiri elementov, ki so gradniki merilnega sistema, smo pazili na izbiro elementov z nizko toleranco. Za razširitev merilnega območja smo uporabili magnetni rele z jezičkom in priklopili dodatno kapacitivnost.

## 2 Simulacija

Načrtovanje sodobnih sistemov se praviloma prične s simulacijo zasnovanega vezja. Preko modelov elementov simuliramo obnašanje sistema ob izbranih pogojih. Na trgu obstaja veliko tovrstnih orodij. Predvsem zaradi dobre podpore in razširjenosti v sklopu amaterske in strokovne skupnosti je bil za opravljanje simulacije izbran LTSpice podjetja Linear Technology [2]. Simulacijo smo izvedli z dvema primerjalnikoma napetosti LT1016 in LM311 (nadomestek LT1011). Iz rezultatov smo določili temperaturne pogoje za delovanje vezja, merilno območje, odstopanje od realne vrednosti izbranega elementa ter izbor dodatnih elementov.

Simulacijo smo izvedli z analizo prehodnega pojava (.TRAN), ki je ena izmed pomembnejših in najpogostejše uporabljenih analiz. Prikazuje spremembo napetosti in toka v odvisnosti od časa in se lahko uporabi, če ima vezje vsaj en reaktiven element. Analizi je potrebno dodati časovni korak ali čas opazovanja (.TRAN 3m). Potrebno je bilo izvesti veliko različnih simulacij, posledično smo merjenje pojava avtomatizirali z metodo preleta, izvedeno z ukazom koraka (.STEP) in ukazom za meritve parametrov pri tranzientni analizi (.MEAS TRAN). Z ukazom koraka (.STEP) lahko ponovimo analizo z različnimi vrednostmi. Ukaz je sestavljen z imenom spreminjajočega elementa, začetno in končno vrednostjo ter korakom spremembe (.STEP PARAM C3 0u 1000u 10u).

Ukaz .MEAS TRAN smo uporabili za merjenje frekvence, v ukazu nastavljena parametra določata časovno konstanto, iz katere izračunamo frekvenco. Ukaz meritve je sestavljen iz poimenovanja parametra, na katerem meritev poteka, in pogoja meritve (.MEAS TRAN P1 V(out) WHEN V(out)=2.5 FALL=10). K stavku za merjenje frekvence je bil dodan tudi ukaz z izračunom kapacitivnosti in induktivnosti na osnovi enačb (1). Meri-

Induktivnost	Kapacitivnost
0 - 1000 nH	0 - 1000 pF
0 - 1000 $\mu$ H	0 - 1000 nF
0 - 1000 mH	0 - 1000 $\mu$ F

Tabela 1: Merilna območja

tev smo izvedli ob napetosti 2,5 V pri deseti in enajsti zaporedni periodi, saj je nihajni krog potreboval nekaj časa, da je prišel v konstantno nihanje.

Pri merjenju kapacitivnosti smo spreminjali kapacitivnost kondenzatorja C3 v vezavi b, pri induktivnosti pa tuljavo L1 v vezavi a na sliki 1 in za izračun vrednosti uporabili izpeljane enačbe (1).

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C} \quad (a) \quad \text{in} \quad C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L} \quad (b) \quad (1)$$

Rezultati so aproksimirani, dobljena funkcija je bila upoštevana pri izračunu končne vrednosti izmerjenega rezultata. Iz rezultatov smo potrdili izbiro elementov, ki zagotavljajo dobro natančnost pri induktivnosti v območju od 10  $\mu$ H do 1000 mH in za kapacitivnost od 10 nF do 1000 nF, ter dejstvo, da s spreminjanjem dodatne kapacitivnosti dosežemo drugačna merilna območja. Iz tega smo definirali merilno območje, ki ga lahko vidimo v tabeli 1.

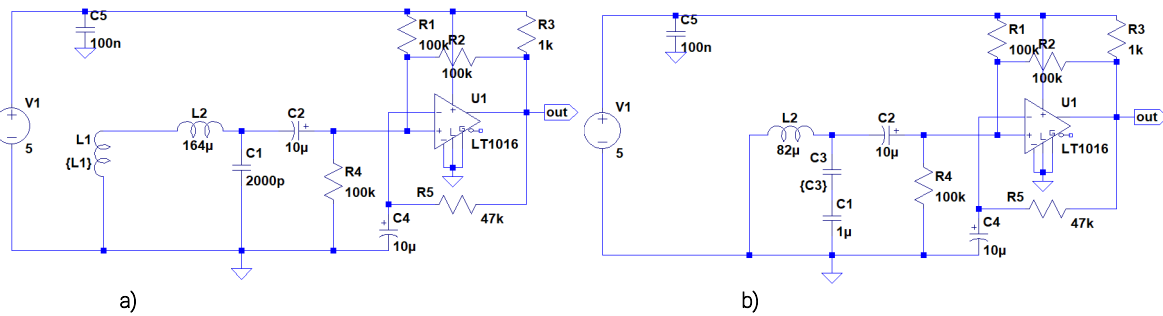
## 3 Prototip

Po zaključku simulacije in interpretacije rezultatov smo pristopili k načrtovanju merilnega sistema. Prva odločitev je bila, ali je potrebno načrtovati ročni ali namizni merilnik. Oblikovati smo želeli merilnik majhnih dimenzij in priročne oblike, ki udobno sede v roko. Odločili smo se za ročnega, ki ima obliko merilnih klešč. Takšna oblika je zelo priročna, saj s kleščami primemo merilni element, ki je majhne fizične velikosti in tako enostavno izmerimo njegovo vrednost.

Razvoj prototipa je potekal po sklopih. Bistvena sta merilni in nadzorni sklop. Naloga merilnega sklopa je opravljanje meritev, nadzorni sklop pa ima nalogo, da nadzoruje, kdaj se naj meritev izvede, prilagaja merilno območje in skrbi za povezljivost in interakcijo s prototipom. Model prototipa je viden na sliki 2a, kjer manjkajo prikazovalnik in klešče, ki se prispajkajo na priključke. Končni izgled prototipa je viden na sliki 2b.

### 3.1 Napajanje

Najprej smo ocenili porabo posameznih sklopov merilnika. Okvirna poraba mikrokrmilnika v aktivnem načinu delovanja je bila okrog 3 mA. Merilni sklop potrebuje za aktiven način delovanja približno 40 - 50 mA pri delovni napetosti 5 V. Ostali moduli imajo pri delovni napetosti 3,3 V približno porabo 100 mA. Zaradi delovne napetosti pri merilnem sklopu je bilo izbrano 5 V napajanje iz priključka USB. Tokovna zahteva, ki jo standard USB 2.0 definira, je 500 mA za napajanje naprav, ki se priključijo na osebni računalnik prek priključka USB [3]. Za napajanje ostalih modulov je potrebno prilagajanje napetosti na 3,3 V preko stikalnega pretvornika LM2842 [4]. Prototip omogoča napajanje iz priključka USB, napajalni sklop



Slika 1: Vežalna shema merjenja induktivnosti - a) in kapacitivnosti - b)

je zasnovan tudi tako, da se lahko napaja iz baterije tipa Li-Ion in Li-Pol.

### 3.2 Povezljivost

Prikaz merjenih rezultatov omogoča uporabniški vmesnik. Interakcija z vmesnikom poteka preko zaslona s tekočimi kristali LCD. Če izvajamo meritve, ko je merilnik priključen na nek element, ki se mu vrednost spreminja skozi čas, je odčitavanje vrednosti z zaslona nepraktično. Zaradi takšnega načina merjenja smo zasnovali komunikacijo z osebnim računalnikom. Ko se izvede meritve, se vrednost meritve prikaže na zaslonu, hkrati pa se prenese preko vmesnika USB na osebni računalnik. Izpis rezultatov merjenja na osebem računalniku se izvede v okviru aplikacije oziroma serijske povezave preko terminala. Nadzorni modul komunicira z modulom, ki skrbi za povezljivost prek UART-a. Vmesnik za povezljivost poskrbi, da se podatki ustrezno prenesejo na vodilo USB. Med razvojem in prvo uporabo ni bilo potrebe po hrabri podatkov v smislu zapisovanja na ločeno pomnilniško enoto, kot je pomnilniška kartica.

### 3.3 Uporabniški vmesnik

Ker je merilnik zgrajen tako, da je čim bolj enostaven za uporabo, smo ocenili, da kompleksnejši uporabniški vmesniki niso potrebni. Predvidena je interakcija z le enim stikalom, ki ima tri stanja. Skrajna pozicija je namenjena izbiri tipa merjenja, lahko gre za tuljavo ali kondenzator. Sredinska lega stikala je namenjena izklopu naprave. Za prikaz rezultata je bil izbran nizkocenovni matrični zaslon Nokia 5110 LCD [5] z razločljivostjo 48x48 točk. Kasneje je bil ta zaslon zamenjan z zaslonom tipa OLED, s katerim poteka komunikacija preko vmesnika I<sup>2</sup>C. Zaslon tipa OLED smo izbrali predvsem zaradi nizke porabe, ki ne presega 10  $\mu$ A.

### 3.4 Nadzorni modul

Nadzorni modul je sestavljen iz mikrokrmilnika, ki je osrednja komponenta modula, in iz ostalih komponent, ki skrbijo, da se meritve izvede pravilno. Ko se meritve izvajajo, je mikrokrmilnik v aktivnem načinu delovanja, drugače je v stanju mirovanja. Stanje mirovanja je zelo priročno predvsem zaradi nizke porabe energije, ko se sistem napaja iz baterij. K majhni porabi v največji meri pripomoreta nizek delovni takt in nizka napajalna napetost. Pri izbiri mikrokrmilnika smo upoštevali ugodno ceno, dostopnost in dobro podporo. Odločali smo se

med dvema mikrokrmilnikoma, 8-bitnim mikrokrmilnikom Atmega328P [6] in mikrokrmilnikom serije STM32-L0 [7]. Slednji je zelo priročen, saj je 32-biten, ima zelo dobro tehnično podporo in je hkrati energijsko učinkovit. Ocenili smo, da bi za razvoj programske opreme porabili preveč časa in se zato za slednjega nismo odločili. Izbrali smo mikrokrmilnik Atmega 328P podjetja Atmel, saj omogoča dobro podporo s programskimi primeri z vsemi izbranimi komunikacijskimi vmesniki, kot sta UART in I<sup>2</sup>C.

### 3.5 Merilni sklop

Ključni elementi za merilni sklop so prevzeti iz simulacije, zaradi visoke cene je zamenjano le integrirano vezje, nadomeščeno je bilo z LM311 [8], ki je cenovno ugodno in se po funkcionalnosti dobro ujema z LT1016. Vezju je bil dodan magnetni rele z jezičkom, ki skrbi za preklon merilnega območja. Mikrokrmilnik preko tranzistorja preklopi magnetni rele, pri čemer izbira med dvema referenčnima kondenzatorjema, ki skrbita za razširitev merilnega območja.

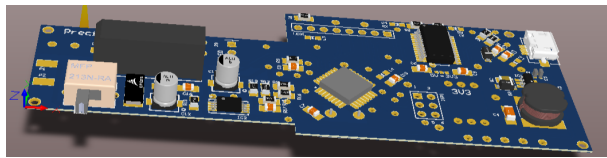
Za preklon med merjeno veličino skrbi drsno stikalo tipa DP3T [9], gre za tristopenjsko stikalo, vsaka stopnja pa ima dva pola. Stikalo sodi med elemente, ki najbolj vplivajo na meritve. Ta vpliv smo skušali zmanjšati z upoštevanjem parazitne vrednosti pri končnem izračunu vrednosti.

Sklop za merjenje induktivnosti in kapacitivnosti je bil načrtovan s pomočjo rezultatov simulacije. Vezje, ki je v simulaciji pokazalo najboljše rezultate, je bilo izbrano za prototip vezja. Pri načrtovanju le-tega je bila potrebna dodatna pozornost, saj na nihanje vezja dodatno vplivajo zunanji dejavniki, ki pa v simulaciji niso bili zajeti.

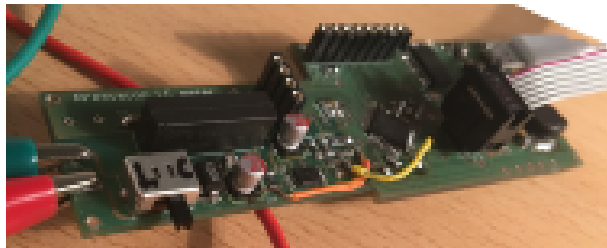
Veliko razvojnega časa je bilo namenjenega načrtovanju tiskanega vezja predvsem zato, ker smo imeli opravka z načrtovanjem analognega vezja s signali, ki nihajo z različnimi frekvencami do 1 MHz.

### 3.6 Razvoj programske opreme

Programiranje je potekalo v programskem jeziku C s pomočjo razvojnega okolja AtmelStudio [10]. Za razhroščevanje programa smo uporabili programator Atmel Avr Dragon [11]. Najprej je bil razvit del za merjenje frekvence, ki jo merilni sklop generira v odvisnosti od vrednosti priključene komponente. Pri razvoju komunikacijskih vmesnikov smo skušali doseči čim boljše robustnost, pri uporabniških vmesnikih pa enostavnost.



(a) Model tiskanega vezja



(b) Prototip

Slika 2: Primer prototipa

Za ugotovitev kakovosti prototipa merilnega sistema smo ocenili odstopanje od referenčnih vrednosti. Za nekaj komponent smo pridobili referenčne vrednosti z uporabo profesionalnega merilnika. Po ugotavljanju odstopanja smo skušali določiti ponovljivost, se pravi, da se po večjem številu meritev pri istem merjencu pojavi majhna meja odstopanja izmerjenih vrednosti. V kolikor se ponovitve meritev istega elementa pomembno razlikujejo, je meritev neponovljiva. Rezultati odstopanja merilnika v primeru merjenja kondenzatorja so zbrani v tabeli 2, za tuljavo pa v tabeli 3.

Prof. merilnik [F]	Prototip [F]	Odstopanje [%]
4,69E-05	-1,82E-09	100,00
1,07E-06	3,09E-07	71,12
3,28E-07	7,92E-08	75,85
9,88E-07	1,08E-07	89,07
2,19E-06	1,48E-07	93,24
1,04E-09	1,03E-09	0,96
3,89E-10	3,85E-10	1,03
1,01E-07	9,71E-08	3,92
2,19E-11	2,52E-11	14,96
1,19E-10	1,21E-10	1,46
9,29E-13	2,14E-11	2203,55

Tabela 2: Tabela rezultatov za kondenzator

Prof. merilnik [H]	Prototip [H]	Odstopanje [%]
8,29E-05	8,29E-05	0,0021
5,12E-05	5,11E-05	0,0106
2,70E-06	2,70E-06	0,0942

Tabela 3: Tabela rezultatov za tuljavo

## 4 Zaključek

Ovrednotenje rezultatov je pokazalo, da se v nekaterih delih merilnega območja za posamezno elektronsko komponento rezultati zelo razlikujejo od referenčnih vrednosti. Ta razlika je očitna predvsem pri merjenju kapacitivnosti, kjer rezultati odstopajo tako močno, da je določena vrednost odčitka nesmiselna. Za razliko od kapacitivnosti so odstopanja meritev induktivnosti zelo majhna. Zmanjševanje odstopanja kapacitivnosti je naslednji korak v razvoju tega instrumenta, poiskati želimo poglobljeno napako v vezju, ki je vzrok tako velikega odstopanja.

Menimo, da je element, ki ima morebitno veliko parazitsko kapacitivnost ali induktivnost, stikalo, kar smo preverili tudi s profesionalnim merilnikom. Profesionalni merilnik je pokazal, da so parazitske vrednosti tako velike, da jih je potrebno upoštevati pri izračunu. Tako kot stikalu je potrebno posvetiti pozornost tudi ostalim elementom. Določitev parazitskih vrednosti in upoštevanje le-teh pri merilnem procesu v prototipnem vezju bi omogočala izboljšavo prototipnega merilnega sistema, ne pa tudi izboljšave sistemov, ki bi bili zgrajeni na osnovi naših načrtov prototipa. Zaradi tega je potrebno pristopiti k reševanju parazitskih vrednosti na drugačen način, najboljše tako, da se izberejo komponente z majhnim odstopanjem, ki v veliki meri vplivajo na merilne rezultate. Razvoj merilnika se bo nadaljeval z načrtovanjem in izdelavo primerne ohišja.

## Literatura

- [1] Analog Devices. Converter, network analyzer, datasheet. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD5933.pdf>. Dostopano: 21.01.2017.
- [2] Linear Technology. Ltwiki. <http://ltwiki.org/>. Dostopano: 21.01.2017.
- [3] Intel Lucent Microsoft NEC Philips Compaq, Hewlett-Packard. Universal serial bus specification, revision 2.0. [http://sdpha2.ucsd.edu/Lab\\_Equip\\_Manuals/usb\\_20.pdf](http://sdpha2.ucsd.edu/Lab_Equip_Manuals/usb_20.pdf). Dostopano: 05.07.2017.
- [4] Texas Instruments. Datasheet lm284x and lm284x-q1. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2841-q1.pdf>. Dostopano: 05.07.2017.
- [5] PHILIPS. Pcd8544. <https://www.spar.kfun.com/datasheets/LCD/Monochrome/Nokia5110.pdf>. Dostopano: 05.07.2017.
- [6] Atmel. Datasheet atmega328p. [http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf). Dostopano: 05.07.2017.
- [7] ST Microelectronics. Datasheet stm3210. <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm3210-series.html?querycriteria=productId=SS1817>. Dostopano: 05.07.2017.
- [8] Texas Instruments. Datasheet lmx11. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm311.pdf>. Dostopano: 05.07.2017.
- [9] C&K Components. Miniature slide switches. [https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/030/888/original/OS\\_19jan15.pdf?1456949175](https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/030/888/original/OS_19jan15.pdf?1456949175). Dostopano: 05.07.2017.
- [10] Atmel. Atmel studio 7. <http://www.atmel.com/microsite/atmel-studio/>. Dostopano: 05.07.2017.
- [11] Atmel. Avr dragon. <http://www.atmel.com/tools/avrdragon.aspx>. Dostopano: 05.07.2017.