

AVTOMATIZIRANO MERJENJE ENOSMERNIH KARAKTERISTIK POLPREVODNIŠKIH ELEMENTOV

Andrej Kosi, Mitja Solar, Iztok Kramberger

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko,
Maribor, Slovenija

Ključne besede: merjenje, avtomatizirano, mikrokrmilnik, LabVIEW, polprevodniški elementi, DA-pretvornik, AD-pretvornik, razdeljevalnik kanalov.

Izveček: V prispevku obravnavamo avtomatizirano merjenje enosmernih karakteristik polprevodniških elementov. Na področju avtomatiziranega merjenja karakteristik obstajajo številne rešitve. Večina le-teh je ozko namenska in omogočajo merjenje le določenih polprevodniških elementov. Cilj je razviti široko zasnovan merilni sistem, ki bo omogočal avtomatsko merjenje različnih polprevodniških elementov. Takšna izvedba omogoča merjenje enostavnih karakteristik na primer diode in merjenje bolj kompleksnih parametričnih karakteristik na primer tranzistorja. Dodatna prednost take zasnove je možnost enostavne razširitve z novimi funkcijami na primer z raznimi analizami izmerjenih podatkov. Prikazani so splošna blokovna shema, lastnosti merilnega sistema in merilni rezultati. Za nastavljanje vrednosti vhodnih signalov in merjenje izhodnih je uporabljen mikrokrmilnik, za nadzor, predstavitev rezultatov, hranjenje vrednosti in obdelavo pa osebni računalnik. Zasnova merilnega sistema omogoča prosto izbiro programskega orodja, ki ga bomo uporabljali na osebнем računalniku. V našem primeru smo izbrali programski paket LabVIEW, ki omogoča hiter in enostaven razvoj, ter možnost nadgradnje programa z novimi funkcijami. Predstavljeni so primeri avtomatiziranih meritev in primerjava našega merilnega sistema s komercialno merilno kartico. Prednost našega merilnega sistema je predvsem v širšem merilnem območju merjenja, bistveno boljši tokovni zmogljivosti in cenovni ugodnosti sistema.

Automatic Measuring of One-way Characteristics of Semiconductor Elements

Key words: measuring, automatic, microcontroller, LabVIEW, semiconductor, DA-converter, AD-converter, multiplexer.

Abstract: On field of measuring of one-way characteristics of semiconductor elements we have always the same methods and procedures. Therefore is automation of those methods and procedures a logical step. There are many solutions in this field. Most of them have a very selected purpose, like measuring only certain semiconductor elements. Our goal was to develop as widely designed measuring system as possible. Such approach enables automatic measuring of different semiconductor elements. With our measuring system we can measure simple characteristics and more complex parametric characteristics.

General block scheme, properties of measuring system and examples of automatic measuring are shown. In general we have a personal computer on one side and microcontroller on the other side. Personal computer is used to control and present the results of the measuring. To make that possible, a computer program must be developed. The most appropriate tool for that is program package LabVIEW, which enables quick and simple development and possibility to upgrade program with new functions. LabVIEW is a development environment based on graphical programming. LabVIEW uses terminology, icons, and ideas familiar to technicians, scientists, and engineers, and relies on graphical symbols rather than textual language to describe programming actions. Further advantage of such design is the possibility of simple extension with new functions. For example in future different analyses of acquired data could be implemented. Microcontroller on the other side regulates control and data signals of DA-converter, AD-converter and multiplexer.

Our measuring system has two independent analog outputs with voltage range $\pm 15V$ and $\pm 1A$ current. Voltage range of $\pm 15V$ is enough for measuring characteristic of most popular semiconductors. With 16-Bit DA-converter we have achieved accuracy of output value in range $\pm 1mV$. Measuring system can measure up to six input channels. At the end of the article one example of automatic measuring of simple characteristics and one of more complex parametric characteristics is shown. Also comparison with commercial measuring card with similar characteristic is shown. Advantage of our measuring system is wider measuring area, better current efficiency and lower price of system.

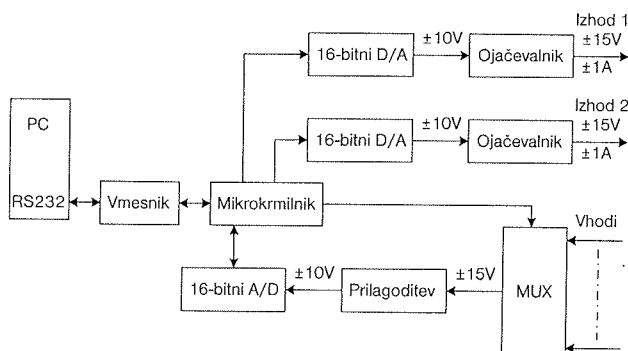
1 Uvod

Na področju merjenja enosmernih karakteristik polprevodniških elementov se srečujemo z znanimi postopki merjenja. Smiselna je avtomatizacija teh merilnih postopkov, za katere najdemo rešitve v podatkih proizvajalcev elementov in v strokovni literaturi [1]. Ponavadi te rešitve omogočajo merjenje le določenih karakteristik, ki so lastna posameznim elementom. Tako imamo primere, ko je avtomatizirano merjenje omejeno na posamezen tip polprevodniškega elementa in na posamezne karakteristike. Želeli smo zgraditi univerzalni merilni sistem, ki bo omogočal merjenje različnih karakteristik. Postavili smo si naslednje zahteve

za merilni sistem: - imeti mora vsaj dva neodvisna analogni izhoda, ki zmoreta dati na svojih izhodih napetosti v območju $\pm 15V$ in tok $\pm 1A$, - za potrebe merjenja naj ima vsaj 6 analognih vhodov ter - obdelava izmerjenih rezultatov in prikaz le-teh se naj izvaja na osebнем računalniku. Takšen merilni sistem smo načrtovali z uporabo mikrokrmilnika, ki upravlja z vhodno izhodnimi enotami, hkrati pa je povezan z osebnim računalnikom in tvori celovit merilni sistem. Na strani osebnega računalnika je potrebno razviti primerno programsko opremo za prikaz in nadzor meritev.

2 Blokovna shema in opis delovanja sistema

Blokovno shemo merilnega sistema prikazuje slika 2.1. Merilni sistem sestavljajo naslednji sklopi: vmesnik, mikrokrmilnik, dva DA-pretvornika, dva izhodna ojačevalnika, razdeljevalnik kanalov (MUX), prilagoditev in AD-pretvornik. Za povezavo med računalnikom in merilnim sistemom smo izbrali RS232 vmesnik. Vmesnik prilagodi napetostne nivoje med osebnim računalnikom in mikrokrmilnikom. Na ukaz iz računalnika mikrokrmilnik ustrezno nastavi vhodno izhodne enote: AD-pretvornik, DA-pretvornik in razdeljevalnik kanalov in posreduje izmerjene vrednosti računalniku. Ker želimo čim večjo točnost izhodnih vrednosti je potrebno izbrati DA-pretvornik, ki bo imel dovolj veliko bitno ločljivost in možnost nastavljanja pozitivnih in negativnih vrednosti. Izbrali smo DA-pretvornik z izhodnim obsegom $\pm 10V$, 16-bitno ločljivostjo in zaporednim vpisovanjem nove vrednosti /2/. Izbor je temeljil na kompromisu med ceno in zmogljivostjo DA-pretvornikov, ki so na voljo na tržišču.



Slika 2.1: Blokovna shema merilnega sistema.

Ker je tokovna zmogljivost DA-pretvornika nekaj mA je potreben izhodni ojačevalnik. S pomočjo ojačevalnika smo razširili izhodno območje sistema na $\pm 15V$ in tokovno zmogljivost na $\pm 1A$. Ker potrebujemo več analognih vhodov imamo v vezju razdeljevalnik kanalov. Merilni sistem smo s tem razširili na 6 analognih vhodov. Prilagoditev je potrebna zaradi AD-pretvornika, ki zmore meriti znotraj območja $\pm 10V$. Realizirana je lahko z enostavnim uporovnim delilnikom in operacijskim ojačevalnikom. Paziti je potrebno na impedanco takega delilnika, da ne vplivamo na dejansko vrednost, ki jo merimo. AD-pretvornik mora imeti podobne lastnosti kot DA-pretvornik, če želimo dobro točnost celotnega merilnega sistema. Izbrali smo AD-pretvornik, s katerim lahko merimo napetost v območju $\pm 10V$ s 16-bitno ločljivostjo /3/.

Uporabniški vmesnik za osebni računalnik smo razvili v programskem paketu LabVIEW. LabVIEW omogoča hitrejši način programiranja merilnih in instrumentacijskih sistemov brez izgube zmogljivosti sistema /4, 5/. Na čelno ploščo virtualnih instrumentov (VI), postavimo kontrole in prikazovalnike za podatke potrebne v našem sistemu z enostavno izbiro objektov iz nabora kontrol. Kontrole so lahko enostavni prikazovalniki, analogni merilniki, grafi, stikala, itd. Ko

je virtualni instrument izdelan, lahko preko čelne plošče upravljamo s procesom oziroma aplikacijo. Programiramo v diagramskem oknu, kjer iz nabora funkcij izberemo grafične objekte ali ikone. Posamezne ikone nato med seboj povežemo in jim določimo želeni pretok podatkov v našem programu. Vodenje izvajanja programa glede na tok podatkov med posameznimi ikonami omogoča enostavno izdelavo aplikacij, kjer lahko več operacij znotraj enega programa opravljamo simultano.

Izbor programskega paketa za razvoj uporabniškega vmesnika prinaša določeno prednost pred drugimi podobnimi sistemi. Tako je možno sistem dokaj enostavno in hitro prilagoditi potrebam uporabnika.

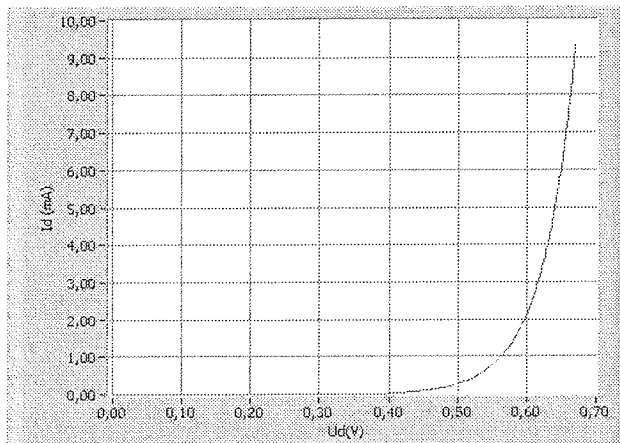
3 Rezultati

Avtomatizirano merjenje polprevodniških elementov lahko s stališča merilnega sistema uvrstimo v dve skupini. V prvo skupino elementov uvrstimo enovhodne elemente, kot je na primer dioda. V drugo skupino elementov uvrstimo dvovhodne elemente, kjer merimo karakteristiko elementa v odvisnosti od dveh neodvisnih napetosti ali tokov. Predstavnik te skupine je MOS-FET tranzistor. Zato so v nadaljevanju prikazani le rezultati avtomatiziranega merjenja tipičnega predstavnika vsake skupine.

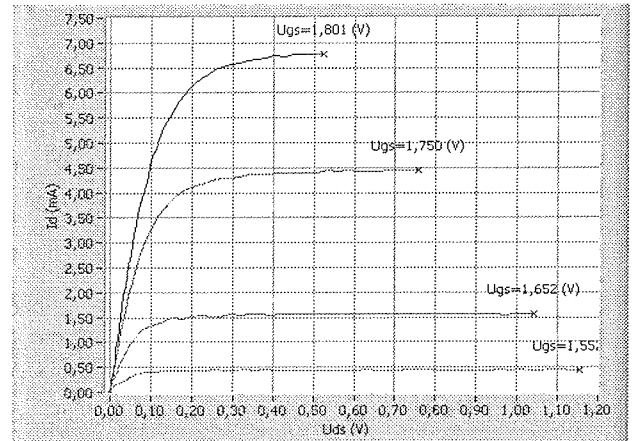
Za lažjo primerjavo in ovrednotenje merilnih rezultatov smo za primerjavo rezultatov meritev uporabili komercialno kartico NI PCI-6014 podjetja National Instruments /6, 7/. Kartico je možno uporabiti za različne aplikacije. Kartice ima šestnajst analognih vhodov s 16-bitno ločljivostjo ($\pm 10V$), dva analogna izhoda s 16-bitno ločljivostjo ($\pm 10V$) in tokovna zmogljivostjo nekaj mA. Če primerjamo te podatke z našim merilnim sistemom opazimo, da ima naš sistem večje vhodno in izhodno območje merjenja ($\pm 15V$), ter bistveno boljše tokovno zmogljivost ($\pm 1A$).

Tako pri kartici kot pri našem merilnem sistemu je bilo potrebno program za prikaz enosmernih karakteristik polprevodniških elementov posebej razviti. Pri komercialnih karticah ponavadi specifična programska oprema, kot je na primer merjenje enosmernih karakteristik polprevodniških elementov, namreč ni vključena v ceno samega sistema in jo je potrebno razviti oziroma dodatno kupiti.

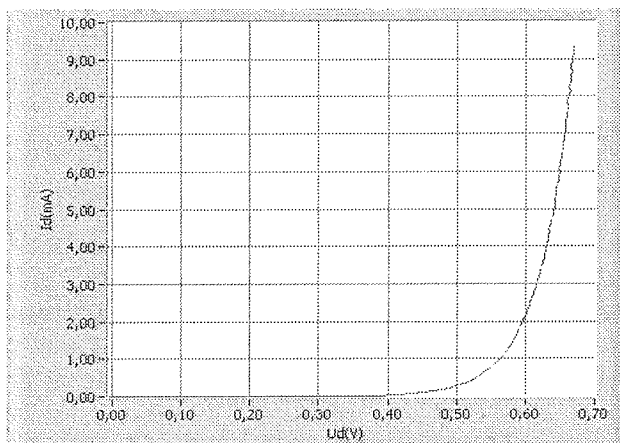
Na sliki 3.1 si lahko ogledamo karakteristike diode izmerjene s kartico NI PCI-6014. Na sliki 3.2 je prikazana karakteristika iste diode ob enakem številu merilnih točk in območju merjenja z našim merilnim sistemom. Opazimo lahko, da sta izmerjeni karakteristiki identični. Z izgradnjo lastnega merilnega sistema smo tako dobili sistem, ki je primerljiv z drugimi komercialnimi merilnimi sistemi in omogoča meritve v napetostnem in tokovnem območju, ki jih z opisano komercialno kartico ne bi mogli izvesti.



Slika 3.1: Primer meritve diode s kartico NI PCI-6014.



Slika 3.3: Primer meritve MOS-FET tranzistorja.



Slika 3.2: Primer meritve diode z našim merilnim sistemom.

Slika 3.3 prikazuje avtomatizirane meritev parametrične karakteristike MOS-FET tranzistorja. Merjenje parametričnih karakteristik je zahtevnejše predvsem iz vidika prikaza merilnih rezultatov v grafični obliki. Na grafu je potrebno izrisati več krivulj in za vsako krivuljo prikazati vrednost parametra, ki ga predstavlja. Program omogoča še številne možnosti za delo z merilnimi rezultati, kot so na primer: podrobnejši ogled dela krivulje, izpis posameznih vrednosti v merilnih točkah in istočasen prikaz lege teh na grafu, določanje izgleda samega grafa (barve, imena osi, ime parametra).

Ocena točnosti in odstopanj meritev obeh merilnih sistemov smo opravili na vzorcu 100 meritev. Prva vrstica v tabeli 3.2 in 3.1 predstavlja vrednost, ki jo želimo nastaviti na izhodu sistema. V drugi koloni podana napetost, ki smo jo izmerili z digitalnim voltmetrom z oznako HP 3455A. Tretja

Tabela 3.1: Izmerjene vrednosti za kartico NI PCI-6014.

U (V)	- 10	- 5	0	5	9.5 ¹
Dig. voltmeter HP 3455A	-9,9987	- 5,9986	0,0008	5,0007	9,5006
Srednja vrednost meritev	-9,9982	- 4,9982	0,0015	5,0015	9,5010
Odstopanje od želene vred.	0,0018	0,0018	0,0015	0,0015	0,0010
St. deviacija meritev (mV)	0,450	0,433	0,460	0,413	0,412

Tabela 3.2: Izmerjene vrednosti za naš merilni sistem.

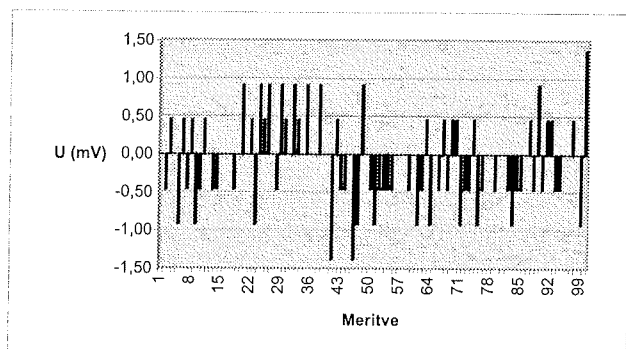
U (V)	- 15	- 10	- 5	0	5	10	15
Dig. voltmeter HP 3455A	- 15,001	- 10,0004	- 4,9991	0,0013	5,0024	10,0035	15,003
Srednja vrednost meritev	- 14,9973	- 10,0008	- 4,9997	0,0014	5,0033	10,0044	14,9981
Odstopanje vred.	0,0027	0,0004	0,0003	0,0014	0,0033	0,0044	0,0019
St. deviacija meritev (mV)	0,768	1,204	1,254	1,389	1,586	1,108	0,636
St. deviacija meritev (n=10)	0,242	0,577	0,363	0,510	0,423	0,531	0,309

¹ Meritev pri +10V je bila za oceno točnosti in odstopanj meritev nerealna, ker je bila merjena napetost na zgornji meji, ki jo je še možno izmeriti s kartico in smo zato dobili za rezultat vedno točno +10V.

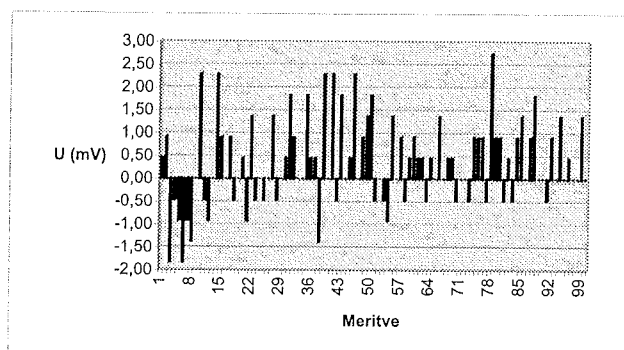
kolona predstavlja srednjo vrednost vseh 100 meritev. V četrti koloni je izračunano odstopanje od vrednosti, ki smo jo želeli nastaviti. Peta kolona predstavlja izračunano standardno deviacijo meritev.

Posledica širšega območja, ki ga pokrivamo (LSB^2 izraženo v mV predstavlja za 50% večjo vrednost) je večje odstopanje v primerjavi s komercialno kartico. Boljše rezultate glede odstopanja posameznih meritev dosežemo z večkratnim merjenjem iste vrednosti in izračunom povprečne vrednosti (zadnja kolona v tabeli 3.2). Standardna deviacija se z številom meritev n zmanjša za faktor $\sqrt{n}/8$. Z izbiro $n=10$ smo izboljšali standardno deviacijo za približno 3 krat. Rezultati so v tem primeru primerljivi s komercialno kartico. Merilni sistem omogoča, da faktor n izberemo glede na točnost, ki jo želimo doseči pri meritvi.

Sliki 3.4 in 3.5 predstavljata grafični prikaz odstopanja posameznih meritev v primeru ko merimo konstantno napetost. Na sliki 3.4 smo merili referenčno napetost. Zato je odstopanje meritev odvisno le od točnosti merilnega dela. Na sliki 3.5 je odstopanje odvisno še od točnosti dela merilnega sistema, s katerim nastavljamo izhodno napetost. Zato je tudi območje, v katerem se pojavljajo rezultati meritev, širše.



Slika 3.4: Odstopanje posameznih meritev v primeru merjenja neke referenčne napetosti ($n=100$).



Slika 3.5: Odstopanje posameznih meritev v primeru nastavljanja in merjenja neke napetosti z našim sistemom ($n=100$).

Če na koncu povzamemo bistvene lastnosti merilnega sistema:

- napetostno območje ± 15 V,
- tokovno območje ± 1 A,
- točnost nastavljanje izhodne vrednosti je ± 2 mV,
- točnost merjenja ± 2 mV,
- dva izhodna kanala in
- šest vhodnih kanalov.

Programska oprema omogoča:

- prikaz osnovnih karakteristik (npr. dioda),
- prikaz parametričnih karakteristik (npr. tranzistor),
- posredno merjenje (merjenje električnega toka),
- shranjevanje merjenih rezultatov v tekstovni obliki (tabela) in
- shranjevanje merjenih rezultatov v grafični obliki.

Pretočnost podatkov merilnega sistema je neposredno odvisna od načina komunikacije med mikrokrmilnikom in osebnim računalnikom. Z izbiro zaporedne komunikacije z RS232 vmesnikom je pretočnost podatkov 19200 Baud/s. Ker merimo enosmerne karakteristike, ki se časovno ne spreminjajo sama hitrost merjenja ni tako bistvena za učinkovitost merilnega sistema. Prav tako ima merilni sistem vgrajena dva varnostna mehanizma (elektronski in programski). Elektronski varnostni mehanizem preprečuje uničenje samega merilnega sistema. Največjo nevarnost za uničenje merilnega sistema predstavlja prevelik izhodni tok. Zato je ta omejen na maksimalno ± 1 A. Prav tako imata izhodna ojačevalnika vgrajeno termično zaščito, ki izklopi izhodna ojačevalnika ob preveliki obremenitvi. S pomočjo diod je narejena še zaščita pred napetostni na izhodu, ki so večje od napajalnih napetosti izhodnih ojačevalnikov. Programski varnostni mehanizem nam omogoča predvsem zaščito merjenja. S programom je omogočena izbira maksimalnega toka v območju od 0 do 1 A, ki sme teči skozi merjenec med meritvijo.

4 Zaključek

V članku smo prikazali merilni sistem za merjenje enosmernih karakteristik polprevodniških elementov. Predstavljen merilni sistem je uporaben za merjenje enosmernih karakteristik različnih polprevodniških elementov. Omejitev predstavlja edino izhodno območje oziroma območje merjenja, saj je možno merjenje karakteristike v območju ± 15 V. Vendar v tem napetostnem območju deluje večina polprevodniških elementov, ki se najbolj pogosto uporabljajo v elektroniki. Z meritvami in analizo našega merilnega sistema smo ugotovili, da je sistem primerljiv s podobnimi merilnimi sistemi oziroma jih v določenih pogledih celo presega. Pomembna prednost razvitega merilnega sistema pred drugimi je tudi v cenovno ugodni razširljivosti.

Tabela 3.3: Primerjava obeh merilnih sistemov.

	Napetostno območje	Tokovna zmogljivost	Število merilnih kanalov	Število izhodnih kanalov	LSB	Relativna točnost	Največji absolutni pogrešek
NI PCI-6014	$\pm 10V$	$\pm 5mA$	8	2	$305\mu V$	$1084\mu V$	$1,9mV$
Naš sistem	$\pm 15V$	$\pm 1A$	6	2	$457\mu V$	$2mV$	$4,5mV$

5 Literatura

- /1/ Clyde F. Coombs Jr. Electronic Instrument Handbook 3rd ed. McGraw-Hill, 2000.
- /2/ Burr-Brown, USA, July 1997, <http://www-s.ti.com/sc/ds/dac714.pdf>.
- /3/ Burr-Brown, USA, November 1994, <http://www-s.ti.com/sc/ds/ads7807.pdf>.
- /4/ Virtual Technologies, Labview, 2000, http://www.virtual-tech.si/natinst_labview.htm.
- /5/ National Instruments, Labview User Manual, April 2003 Edition, Part Number 320999E-01, <http://www.ni.com/labview/>
- /6/ National Instruments, NI PCI-6014, <http://digital.ni.com/world-wide/slovenia.nsf/main?readform>.
- /7/ National Instruments NI 6013/6014 Family Specifications, <http://www.ni.com/pdf/manuals/370844a.pdf>.
- /8/ Matematični priročnik, 16.4 Teorija merilnih pogreškov, I. N. Bronštejn, K. A. Semendjajew, G. Musiol, H. Mühlrig; prevedli Janez Barbič, Gregor Dolinar, Borut Jurčič-Zlobec, Neža Mramor-Kosta, 2 predelana in dopolnjena izdaja, Ljubljana: Tehniška založba Slovenije, 1997.

univ. dipl. inž. Andrej Kosi,
Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in
informatiko v Mariboru,

dr. Iztok Kramberger univ. dipl. inž., asistent na
Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in
informatiko v Mariboru,

docent dr. Mitja Solar, predavatelj na Fakulteti za
elektrotehniko, računalništvo in informatiko v Mariboru.

Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in
informatiko v Mariboru
Smetanova 17
2000 Maribor

Prispelo (Arrived): 04.12.2003

Sprejeto (Accepted): 20.06.2004