



## **CONTROLUL UNUI INVERTOR MONOFAZAT CU MICROCONTROLLER PIC**

Gabriel Nicolae POPA, Iosif POPA, Corina Maria DINIȘ,  
Sorin Ioan DEACONU, Cristian ABRUDEAN

### **CONTROL OF A SINGLE-PHASE INVERTER WITH PIC MICROCONTROLLER**

This paper presents a single-phase power inverter with transformer with intermediate connection (in primary circuit) which has the voltage form at the output rectangular or quasi-sinusoidal shapes. Inverter control (six variants) was performed with 8-bit PIC microcontroller and power transistors are MOSFET type. In paper were performed theoretically and experimentally times switching for transistors to reduce voltage harmonics 3,5,7,9 and 11. Measurements of electrical parameters were performed for the six control types when the inverter supplied an incandescent lamp.

Keywords: single-phase inverter, microcontroller, voltage harmonics  
Cuvinte cheie: inverter monofazat, microcontroller, armonice de tensiune

#### **1. Introducere**

Un inverter de putere utilizează o sursă de putere de tensiune continuă capabilă să asigure un curent suficient de mare. Valoarea tensiunii continue de alimentare depinde de construcția și utilizarea inverterului [2, 3]:

- 12 V c.c. pentru consumatori de mică putere și comerciali care sunt alimentate de la acumulatorii cu plumb (de exemplu, auto);
- 24 V sau 48 V c.c. care se utilizează la invertoarele de putere mică (de exemplu, instalații cu panouri fotovoltaice);

- 200 până la 400 V c.c. pentru parcurile fotovoltaice de putere;
- 200 până la 450 V c.c. pentru vehiculele electrice sau hibride;
- sute sau mii de volți pentru transmisia la distanță a energiei electrice în curent continuu.

## 2. Formele de undă ale invertoarelor de putere monofazate

Există două tipuri de invertoare monofazate care transformă tensiunea continuă de nivel mic în tensiune alternativă joasă (230 V c.a.): convertoarele boost (surse în comutație) și cele cu transformator de putere (exemplu, la frecvența de 50 Hz) [3].

Majoritatea consumatorilor electrici industriali și casnici funcționează optim când tensiunea de alimentare este sinusoidală. Totuși, există consumatori electrici care funcționează aproape la fel, dacă unda este sinusoidală modificată (de exemplu consumatorii electrici care au surse în comutație).

Pentru a produce forme de undă sinusoidale se utilizează tehnica PWM (modulare în lățime de puls). Modificarea amplitudinii și a frecvenței tensiunii de ieșire se face prin intrarea în conducție și blocarea elementelor semiconductoare de putere (tranzistoare BJT, MOS FET, IGBT) la momente bine stabilite, la frecvență ridicată, după un anumit algoritm (în cazul utilizării microcontrolerelor la controlul invertoarelor). Un filtru LC serie acordat la frecvența fundamentală diminuează nivelul armonicilor [1].

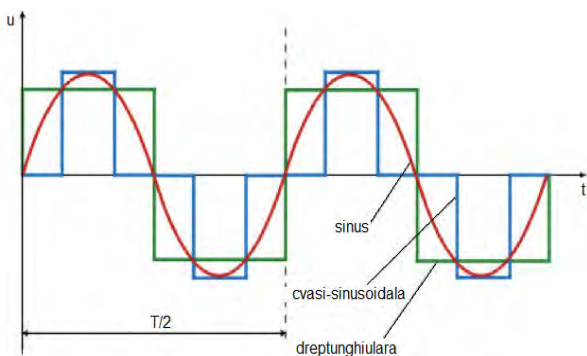


Fig. 1

Forme de undă ale tensiunii de ieșire la invertoarele de putere monofazate: dreptunghiulară, cvasi-sinusoidală și sinusoidală

Formele de undă ale tensiunii alternative de la ieșirea invertoarelor pot fi: undă dreptunghiulară, undă modificată sinusoidală, pulsuri sinusoidale, undă pur sinusoidală (figura 1). Prețul de cost și complexitatea cresc spre ultimul tip de inverter.

La invertoarele de putere, forma de undă sinusoidală se obține cel mai dificil (controlul este complex, iar transformatorul și elementele

semiconductoare se încălzesc puternic pentru că funcționează la frecvență ridicată).

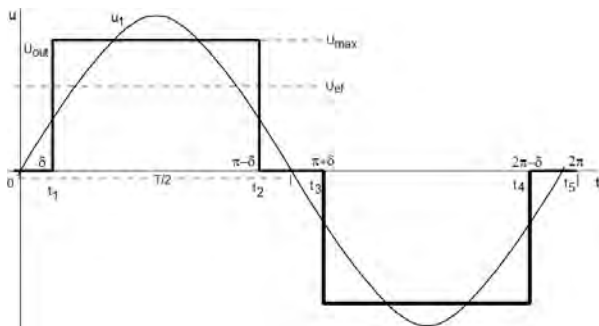


Fig. 2 Tensiune cvasi-sinusoidală și armonica fundamentală de tensiune de la ieșirea invertoarelor monofazate

Tensiunea dreptunghiulară și cvasi-sinusoidală se obțin mai ușor

decât forma de undă sinusoidală (figura 2). Teoretic, tensiunea dreptunghiulară se obține din seria Fourier. Pentru semnalele simetrice față de timp, armonicile de ordin par lipsesc (componentele care au funcția cos sunt 0) [1,5]:

$$u = \sum_{i=1}^n U_i \cdot \sin(i \cdot \omega_0 \cdot t) \quad (1)$$

unde  $U_i$  este tensiunea maximă a unei armonice,  $i$  este rangul armonice,  $\omega_0$  este pulsația semnalului, iar  $n$  numărul maxim de armonice care se iau în considerare. Tensiunea fundamentală este:

$$u_1 = U_1 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \quad (2)$$

Dacă se notează cu:

$$\varphi_0 = \omega_0 \cdot t \quad (3)$$

Pentru un semnal dreptunghiular, tensiunea fundamentală se poate calcula cu [4]:

$$U_1 = \frac{2 \cdot U_{DC}}{\pi} \int_{\delta}^{\pi-\delta} \sin(\varphi_0) d\varphi_0 = \frac{4 \cdot U_{DC}}{\pi} \cdot \cos \delta \quad (4)$$

unde  $U_{DC}$  este tensiunea continuă de alimentare a invertorului. Pentru  $U_{DC}$  constant, modificarea tensiunii fundamentale se poate face prin modificarea lui  $\delta$ . Pentru un semnal dreptunghiular, tensiunea unei armonice  $i$  se poate calcula cu:

$$U_i = \frac{2 \cdot U_{DC}}{\pi} \int_{\delta}^{\pi-\delta} \sin(i \cdot \varphi_0) d\varphi_0 = \frac{4 \cdot U_{DC}}{i \cdot \pi} \cdot \cos(i \cdot \delta_i) \quad (5)$$

Pornind de la această relație, se poate diminua o singură armonică prin modificarea timpului de comutație ( $\delta_i$ ) prin impunerea următoarei condiții:

$$i \cdot \delta_i = \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

Pentru frecvența de 50 Hz a inverterului, în tabelul 1 s-a calculat cu (6) unghiul  $\delta_i$ . Tabelul 1 sistematizează valorile lui  $\delta_i$  în funcție de tipul de control.

Tabelul 1

Tipul de control	Control simplu	Control cu diminuarea armoniceii 3	Control cu diminuarea armoniceii 5	Control cu diminuarea armoniceii 7	Control cu diminuarea armoniceii 9	Control cu diminuarea armoniceii 11
$\delta_i [^\circ]$	0,018	30	18	12,85	10	8,18

### 3. Invertoare monofazate de putere cu transformator

Aceste tipuri de invertoare au un transformator de putere, care funcționează de obicei la frecvență industrială. Pentru puteri mici comanda transformatorului (cu priză mediană în primar) se poate face cu două (uneori grupuri-fig.3) tranzistoare de putere (BJT, MOSFET sau IGBT) care funcționează în contra-timp [2,3].

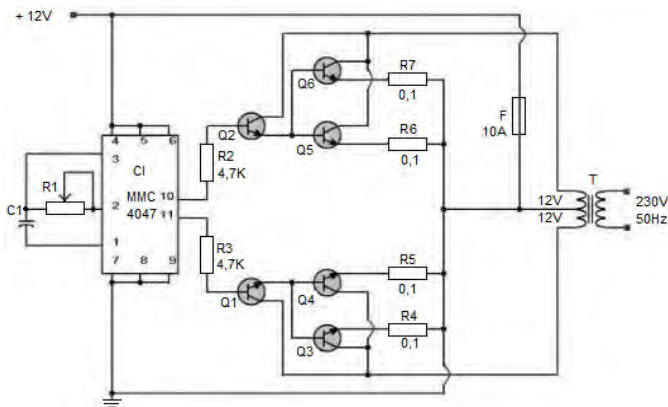


Fig. 3

Invertor de putere comandat de circuitul astabil MMC 4047

În figura 3 este prezentată schema electronică a unui invertor monofazat care utilizează la comanda lui un circuit astabil MMC 4047. Perioada semnalului dreptunghiular de la ieșire depinde de  $R_1$  și  $C_1$ :

$$T = 4,4 \cdot R_1 \cdot C_1 \quad (7)$$

Pentru frecvența de 50 Hz, se pot alege:  $R_1 = 45,45 \text{ k}\Omega$ , iar  $C_1 = 100 \text{ nF}$ . La ieșirea astabilului (figura 3) se utilizează tranzistoare amplificatoare în curent ( $Q_1$  și  $Q_2$ ) și tranzistoare de putere (BJT) conectate în paralel ( $Q_3$  cu  $Q_4$ ,  $Q_5$  cu  $Q_6$ ) pentru a comanda alternativ înfășurările primare ale transformatorului de putere T. Se menționează că există scheme de comandă a invertoarelor și fără circuit astabil, prin utilizarea unor înfășurări suplimentare în circuitul primar care comandă alternativ tranzistoarele de putere (între B și E). Cu aceste tipuri control nu se poate face modificarea timpului de comutație al tranzistoarelor de putere, pentru perioada constantă a tensiunii.

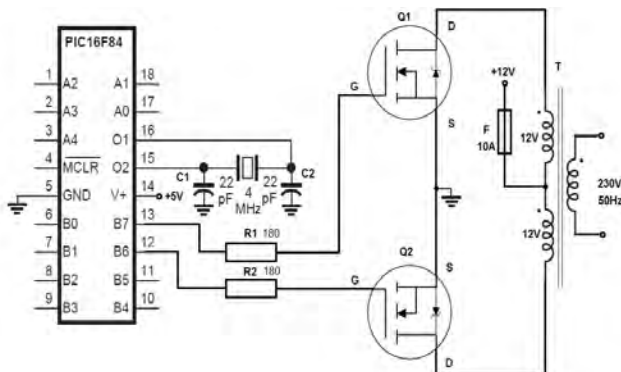


Fig. 4

Invertor de putere comandat de microcontroler PIC

Tranzistoarele de putere MOSFET pot înlocui tranzistoarele de

putere BJT în invertoare. Comanda lor se face mai simplu (în tensiune). Comanda unui invertor de putere se poate realiza cu microcontroler PIC 16F84A (fig.4). Modificarea timpului de comutație (respectiv a unghiului de comutație, tabelul 1) a tranzistoarelor de putere  $Q_1$ , respectiv  $Q_2$  (care intră în conducție alternativ) se face prin program. În figura 4 se utilizează pinii portului B, B6 respectiv B7, care au fost configurați ca ieșiri.

#### 4. Experimentarea invertoarelor monofazate

La experimentări s-a utilizat invertorul prezentat în figura 4. Sursa de alimentare de tensiune continuă ( $U_{DC}$ ) este tip MPS-52350, 230 V/4A/50Hz și +12V/29A. La această sursă există un potențiomtru de reglare a tensiunii de ieșire  $U_{DC}$  între 10,83 și 13,22 V. Transformatorul de putere este în primar, cu priză mediană (2x12V/230V). Miezul este realizat din tole. Pentru că transformatorul este de mică putere, experimentările s-au realizat la o tensiune de ieșire de 100,6 V. Tranzistoarele de putere ale invertoarelor sunt

MOSFET de tip IRFP 260 (2 buc.) cu diodă între drenă și sursă. Consumatorul electric al inverterului a fost o lampă incandescentă 100W/230V (figura 5).



Fig. 5  
Aspect de la  
experimentarea  
inverterului monofazat

Programele s-au făcut în JAL (versiunea 2.18), iar programarea microcontrolerului s-a realizat cu ajutorul lui PicKit 2 Programmer (Microchip). La realizarea experimentărilor s-a utilizat placa de dezvoltare K8048 (Velleman). Microcontrolerul utilizat este PIC 16F84A cu quartz de 4 MHz. S-au realizat șase tipuri de control ale inverterului: control simplu (tip  $\delta_1$ , tensiune dreptunghiulară, cu timp mort de 2  $\mu$ s) și cinci tipuri de control pentru diminuarea armonicilor de ordinul  $i$ ,  $i = 3, 5, 7, 9, 11$  (tip  $\delta_i$ ). În tabelul 2 (Valoarea tensiunii continue de alimentare a inverterului pentru a obține  $U_1 = V$  tensiunea fundamentală în primarul transformatorului ridicător, pentru cele șase tipuri de control - relația (4)), s-au calculat timpii pentru cele 6 tipuri de control.

Tabelul 2

$U_{DC1}$ [V]	$U_{DC3}$ [V]	$U_{DC5}$ [V]	$U_{DC7}$ [V]	$U_{DC9}$ [V]	$U_{DC11}$ [V]
11,781	13,603	12,387	12,089	11,962	11,902

Tabelul 3 conține timpii de comandă a elementelor semiconductoare pentru cele șase tipuri de comandă (figura 2). În tabelul 4 (Tensiunea armonicilor și valoarea raportată la fundamentală pentru controlul simplu) s-au prezentat valorile efective ( $U_i$ ) și raportate la fundamentală ( $\Delta U_i$ ) ale tensiunii fundamentale și ale armonicilor la controlul simplu al inverterului.

Tabelul 3

	$t_{1c}$ [ms]	$t_{2c}$ [ms]	$t_{3c}$ [ms]	$t_{4c}$ [ms]	$t_{5c}$ [ms]
$\delta_1$	0,001	9,999	10,001	19,999	20
$\delta_3$	1,67	8,34	11,67	18,34	20
$\delta_5$	1	9	11	19	20
$\delta_7$	0,713	9,286	10,714	19,286	20
$\delta_9$	0,555	9,444	10,555	19,444	20
$\delta_{11}$	0,454	9,545	10,454	19,545	20

Tabelul 4

Control simplu	$U_1$ [V]	$U_3$ [V]	$U_5$ [V]	$U_7$ [V]	$U_9$ [V]	$U_{11}$ [V]
Valoare efectivă tensiune	94,5	29,9	16,9	11	7,9	5,9
Control simplu	$\Delta U_1$ [%]	$\Delta U_3$ [%]	$\Delta U_5$ [%]	$\Delta U_7$ [%]	$\Delta U_9$ [%]	$\Delta U_{11}$ [%]
Valoare raportată la fundamentală	100	31,9	18	11,7	8,4	6,3

În tabelele 5 (Tensiunea și curentul la intrarea și ieșirea inverterului în funcție de tipul controlului), 6 (Coeficienții totali de distorsiune armonică a tensiunii, curentului de la ieșire, tensiunea fundamentală și armonică de tensiune) și 7 (Coeficienții totali de distorsiune armonică a tensiunii, curentului de la ieșire, tensiunea fundamentală și armonică de tensiune) s-au determinat experimental parametrii electrici ai inverterului, la intrarea și la ieșirea lui, când la ieșire se utilizează o lampă incandescentă (100W/230V), pentru cele 6 tipuri de control. În tabelul 5, s-a măsurat și tensiunea efectivă a armonicei  $n$  ( $n = 3,5,7,9,11$ ), precum și valorile lor raportate la armonicele corespunzătoare controlului simplu (tabelul 5).

Tabelul 5

Tip c-trol	$f$ [Hz]	$U_{DC}$ [V]	$I_{DC}$ [A]	$U_{out}$ [V]	$I_{out}$ [A]
$\delta_1$	48,38	11,04	5,05	100,8	0,3
$\delta_3$	47,89	13,16	4,33	100,6	0,25
$\delta_5$	50,37	12,04	4,93	100,6	0,25
$\delta_7$	47,70	11,88	4,97	100,6	0,25
$\delta_9$	47,49	11,41	4,99	100,6	0,25
$\delta_{11}$	47,49	11,64	5,00	100,6	0,25

În figurile 6-11 s-au realizat măsurători experimentale (cu CA 8334B, Chauvin-Arnoux) asupra tensiunii și curentului la ieșirea inverterului, pentru cele șase tipuri de control.

Tabelul 6

Tip c-trol	$THD_U$ [%]	$THD_I$ [%]	$U_1$ [V]	$U_n$ [V]	$\Delta U_n$ [%]
$\delta_1$	40,9	40,7	93,1	-	-
$\delta_3$	27,8	27,6	96,4	$U_3=3,9$	4,1
$\delta_5$	25,4	25,1	96,6	$U_5=4,1$	4,2
$\delta_7$	28,7	28,5	96,3	$U_7=3,5$	3,4
$\delta_9$	31,1	31,0	95,9	$U_9=2,8$	3,0
$\delta_{11}$	31,5	31,4	95,4	$U_{11}=4,6$	4,7

Tabelul 7

Tip c-trol	P [W]	Q [VAR]	S [VA]	PF [-]	DPF [-]
$\delta_1$	25,5	2,2 c	25,5	0,996	1
$\delta_3$	25,1	2,25 c	25,2	0,995	1
$\delta_5$	25,85	2,25 c	25,5	0,996	1
$\delta_7$	25,8	2,25 c	25,7	0,996	1
$\delta_9$	25,75	2,25 c	25,8	0,996	1
$\delta_{11}$	26,0	2,25 c	26,2	0,996	1

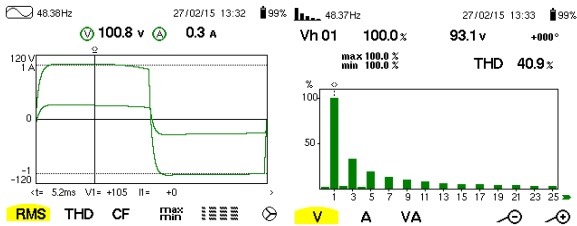


Fig. 6 Formele de undă (tensiune și curent) și analiza armonică a tensiunii la comanda simplă a invertorului

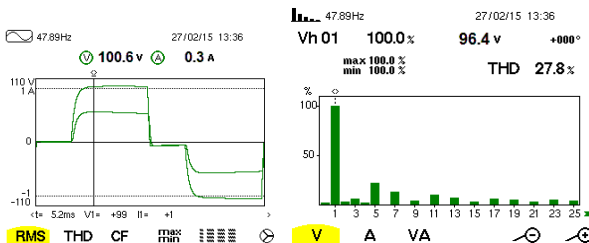


Fig. 7 Formele de undă (tensiune și curent) și analiza armonică a tensiunii la comanda pentru eliminarea armoniciei 3

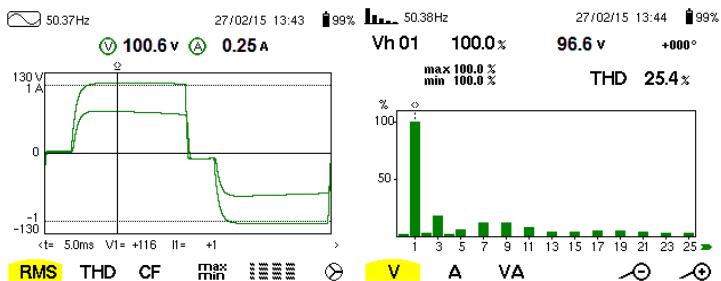


Fig. 8 Formele de undă (tensiune și curent) și analiza armonică a tensiunii la comanda pentru eliminarea armoniciei 5



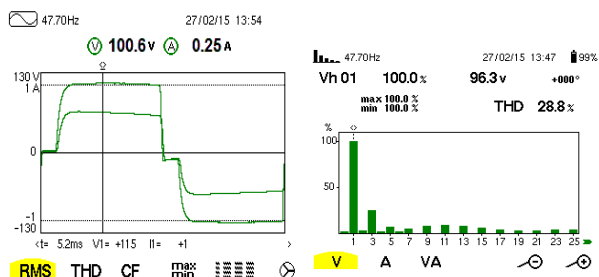


Fig. 9 Formele de undă (tensiune și curent) și analiza armonică a tensiunii la comanda pentru eliminarea armoniciei 7

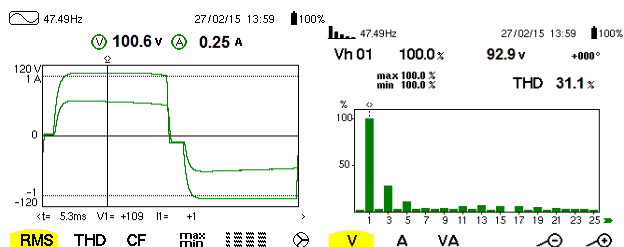


Fig. 10 Formele de undă (tensiune și curent) și analiza armonică a tensiunii la comanda pentru eliminarea armoniciei 9

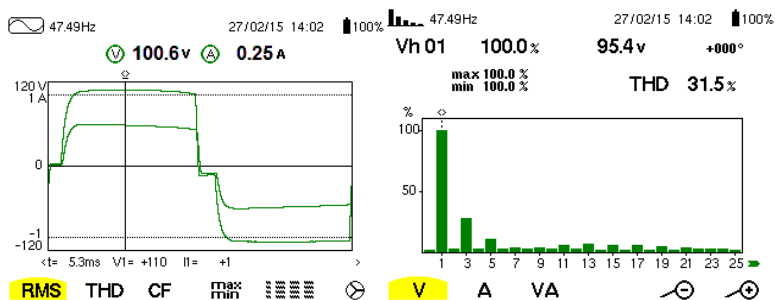


Fig. 11 Formele de undă (tensiune și curent) și analiza armonică a tensiunii la comanda pentru eliminarea armoniciei 11

Comparativ cu controlul clasic al inverterului (figura 6), în cazurile tipurilor de control cu diminuarea armonicilor, se observă diminuarea armoniciei de tensiune (figurile 7-11). THD-ul cel mai mic este pentru cazul în care controlul se face pentru diminuarea armoniciei 5 (figura 8). La controlul armoniciei 11, diminuarea nu mai este semnificativă,

datorită setărilor care se pot face în program (s-au utilizat timpi cu rezoluția minimă de 0,1 ms).

## 5. Concluzii

■ Lucrarea prezintă un studiu asupra diminuării armonicelor de tensiune de ordinul 3,5,7,9 sau 11.

■ De obicei, la invertoarele cu formă de undă cvasi-sinusoidale, armonica de ordinul 3 și multiplu de 3, acestea trebuie cel mai mult diminuate.

■ Lucrarea, demonstrează, teoretic și practic, că această diminuare ale armonicelor de tensiune se poate realiza prin control inteligent.

## BIBLIOGRAFIE

[1] Czarkowski, D., Chudnovsky, D.V., Chudnovsky, G.V., Selesnick, I.W., *Solving the Optimal PWM Problem for Single-Phase Inverters*, IEEE Transactions on Circuits and Systems – I: Fundamental Theory and Applications, vol.49, nr.4, aprilie 2002, pag. 465-475.

[2] Gerards, G., *Simple 12 to 230 V Power Inverter*, Elektor Electronics, nr.2, 2004, pag.30-34.

[3] Hahn, J.H., *Modified Sine-Wave Inverter Enhanced*, Power Electronics Technology, August 2006, pag 20-23.

[4] Perreault, D., *Power Electronics*, cours no.6334, MIT Open Course Ware, USA, 2007.

[5] Samosir, A.S., Yatim, A.H.M., *Dynamic Evolution Controller for Single Phase Inverter Application*, 2009 IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications, octombrie 4-6, Kuala Lumpur, Malaysia, pag 530-535.

[6] Bejan, M., *În lumea unităților de măsură*. Ediția a doua revăzută și adăugită. Editura Academiei Române și Editura AGIR, București, 2005.

Conf.Dr.Ing. Gabriel Nicolae POPA  
Senior Member IEEE, membru AGIR, e-mail: gabriel.popa@fih.upt.ro

Conf.Dr.Ing. Iosif POPA  
membru AGIR, e-mail: iosif.popa@fih.upt.ro

Șef lucr.Dr.Ing. Corina Maria DINIȘ  
membru IEEE, membru AGIR, e-mail: corina.dinis@fih.upt.ro

Conf.Dr.Ing. Sorin DEACONU  
membru IEEE, membru AGIR, e-mail: sorin.deaconu@fih.upt.ro

Asist.Dr.Ing. Cristian ABRUDEAN  
e-mail: cristian.abrudean@fih.upt.ro

Facultatea de Inginerie Hunedoara, Universitatea „Politehnica” Timișoara