
Lucrarea 17

MODULATOARE PWM PENTRU COMANDA CONVERTOARELOR C.C. – C.C.

1. Introducere

Echipamentele electronice de putere includ dispozitive semiconductoare care lucrează în comutație. *Comutația la nivelul dispozitivelor* este un proces static prin care acestea sunt basculate între două stări stabile: starea de conducție totală și starea de blocare totală. În scopul reducerii pierderilor, comutațiile din electronica de putere trebuie să se desfășoare în timpi cât mai scurți. Momentele în care trebuie să fie declanșate procesele de comutație și intervalele pe durata cărora dispozitivele trebuie să-și păstreze starea de conducție sau de blocare sunt fixate prin **semnale de comandă**.

O tendință în electronica de putere modernă este de a utiliza structuri de forță care includ dispozitive semiconductoare din categoria tranzistoarelor de putere (BJT, MOSFET, IGBT etc.) cu ajutorul cărora poate fi realizată o *comutație forțată* a curenților între ramurile de circuit. În majoritatea cazurilor comanda acestor structuri se bazează pe tehnica de **modulare în lățime a impulsurilor** numită și **tehnica de comandă PWM (Pulse Width Modulation)** descrisă în Referatul 4. Dintre echipamentele electronice care utilizează comanda PWM amintim: redresoarele active (PFC, PWM), convertoarele c.c. – c.c., invertoarele PWM, filtrele active etc. Semnalele de comandă aferente tranzistoarelor de putere din structura acestor echipamente se numesc **semnale de comandă PWM**.

Trebuie făcută diferența între semnalul de comandă aplicat efectiv pe terminalul de comandă al unui dispozitiv semiconductor de putere și **semnalul logic de comandă PWM**. Acesta din urmă este un semnal purtător de informație având două nivele logice: un nivel corespunzător informației de deschidere a dispozitivului (*ON*) și un nivel corespunzător informației de blocare a dispozitivului (*OFF*). Semnalele logice PWM pot fi generate cu ajutorul unor structuri microelectronice numite **modulatoare PWM**. Modulatoarele pot fi implementate cu ajutorul unor componente de tip analogic sau de tip numeric, respectiv cu ajutorul unor componente discrete sau cu ajutorul unor circuite integrate specializate. Sunt variante de circuite specializate capabile să interfațeze cu structuri numerice complexe dedicate controlului anumitor procese. În acest caz semnalul de comandă sub formă numerică, generat periodic de sistemul de control în urma rulării unui algoritm specific, este convertit în unul sau mai multe semnale PWM. În variantă modernă microcontrolerele sau procesoarele de semnal (DSP) dedicate controlului acționărilor electrice sau altor procese includ blocuri proprii specializate pentru generarea semnalelor PWM dedicate comenzii

convertoarelor c.c. – c.c., invertoarelor PWM etc. Oricare ar fi modulatorul PWM, tehnicile care stau la baza generării semnalelor logice modulate în lățime sunt aceleași, fie că sunt realizate cu circuite analogice, fie că sunt realizate cu circuite numerice. În continuare este prezentată una din cele mai utilizate modalități de generarea a semnalelor PWM.

2. Generarea semnalelor de comandă PWM

O primă modalitate de generare a unui semnal modulat în lățime cu o frecvență de comutație (f_c) fixă este prezentată în Fig.17.1.

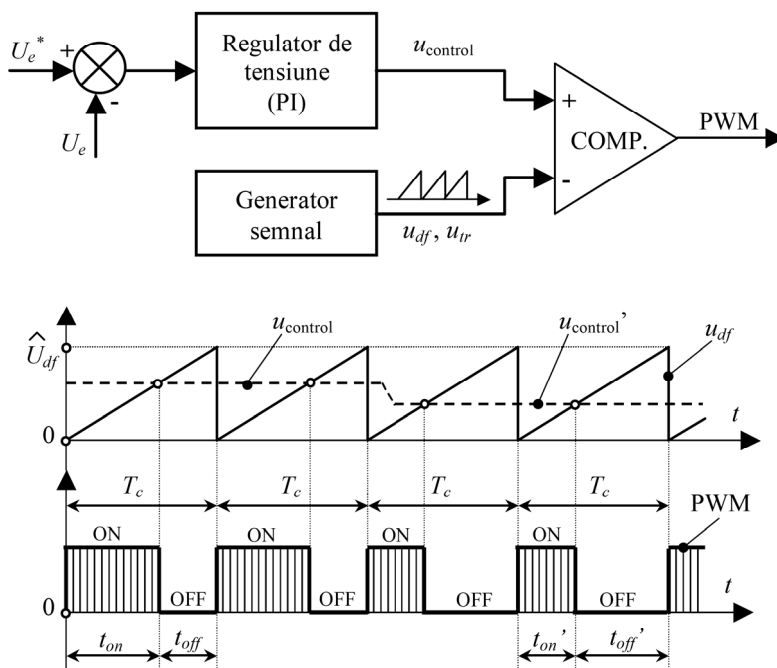


Fig. 17.1 Generarea semnalelor logice de comandă PWM utilizând ca undă purtătoare un semnal dinte de fierăstrău (u_{df}).

Pentru a înțelege mai bine funcționarea unui modulator PWM, în Fig.17.1 este prezentată o structură de control prin care este reglată tensiunea de ieșire a unui convertor c.c. – c.c. Structura include o buclă cu reacție negativă cu ajutorul căreia valoarea reală a tensiunii de ieșire U_e este comparată cu o valoare de referință U_e^* , eroarea rezultată fiind aplicată unui regulator de tensiune. Regulatorul furnizează la ieșire o tensiune de control ($u_{control}$) prin care este modificată durata relativă de

conducție a unuia sau a mai multor elemente de comutație din structura de forță a convertorului.

Unele din cele mai răspândite tehnici de generare a semnalelor logice PWM constă în compararea tensiunii de control (*semnal modulator*), considerată constantă pe intervale mici, cu un semnal periodic *dinte de fierăstrău* (u_{df}) sau cu un semnal periodic triunghiular (u_{tr}) de către un comparator (COMP.). Semnalul periodic mai poartă denumirea și de *undă purtătoare*, iar perioada acesteia T_c fixează frecvența semnalului PWM și implicit frecvența de comutație a convertorului: $f_c = 1/T_c$.

a) Generarea semnalelor PWM utilizând ca undă purtătoare un semnal dinte de fierăstrău

Așa cum este prezentat în diagramele din Fig.17.1, atunci când tensiunea $u_{control} > u_{df}$ comparatorul furnizează la ieșire un semnal logic ridicat (1 logic – 1L). În momentul în care rampa tensiunii u_{df} egalează și depășește tensiunea $u_{control}$ comparatorul basculează și furnizează un semnal logic coborât (zero logic – 0L). Astfel, se obține la ieșirea comparatorului un semnal logic PWM al cărui factor de umplere este proporțional cu $u_{control}$ în măsura în care aceasta nu depășește valoarea de vârf \hat{U}_{df} a semnalului dinte de fierăstrău:

$$\left. \begin{aligned} D_{RC} &= \frac{t_{on}}{T_c} \\ \frac{t_{on}}{T_c} &= \frac{u_{control}}{\hat{U}_{df}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow D_{RC} = \frac{u_{control}}{\hat{U}_{df}} \quad (17.1)$$

Efectul modificării duratei relative de conducție odată cu modificarea tensiunii de comandă este ilustrat în Fig.17.1 unde s-a prezentat un exemplu pentru o variație a comenzii de la $u_{control}$ la $u'_{control}$, obținându-se noua durată relativă de conducție: $D'_{RC} = t'_{on} / T_c$.

b) Generarea semnalelor PWM utilizând ca undă purtătoare un semnal triunghiular

Dacă se utilizează u_{df} ca semnal purtător, semnalul modulator $u_{control}$ trebuie să fie tot timpul pozitiv. Sunt aplicații sau tehnici de modulare PWM în care semnalul de control poate sau trebuie să ia, atât valori pozitive, cât și valori negative. Este cazul, de exemplu, a modulării sinusoidale utilizate pentru comanda invertoarelor PWM. Într-o asemenea situație se folosește ca undă purtătoare un semnal periodic triunghiular, așa cum se prezintă în Fig.17.2. Acesta prezintă variații între o valoare de vârf pozitivă ($+\hat{U}_{tr}$) și o valoare de vârf negativă ($-\hat{U}_{tr}$), astfel încât semnalul apare simetric față

de axa absciselor. În acest fel, semnalul de control poate să prezinte variații bipolare între cele două limite sau, în anumite cazuri, chiar poate să le și depășească (supramodularea la invertoarele PWM).

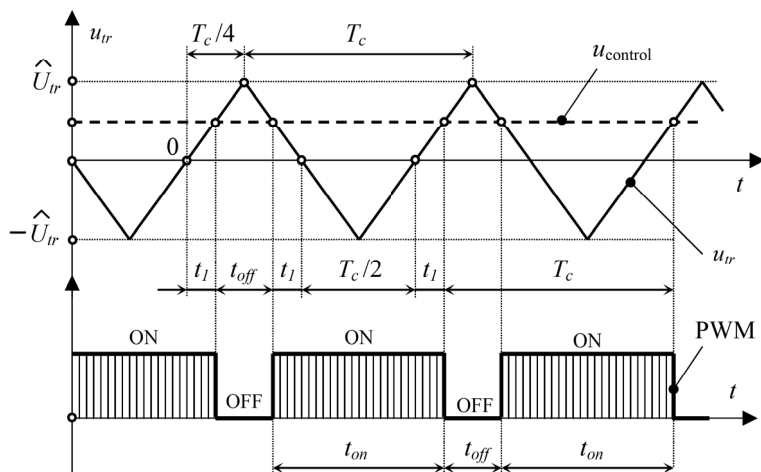


Fig. 17.2 Generarea semnalelor logice de comandă PWM utilizând ca undă purtătoare un semnal triunghiular (u_{tr}).

Logica de generarea a semnalului PWM este asemănătoare cu cea descrisă pentru cazul semnalului dinte de fierăstrău. Astfel, conform celor prezentate în diagramele din Fig.17.2, atunci când tensiunea $u_{control} > u_{tr}$ comparatorul generează la ieșire un semnal logic ridicat (1L), iar în momentul în care rampa semnalului u_{tr} depășește tensiunea $u_{control}$ comparatorul basculează și furnizează la ieșire un semnal logic coborât (0L).

Pentru a calcula legătura dintre valoarea semnalului $u_{control}$ și mărimea duratei relative de conducție trebuie cunoscute valoarea de vârf a semnalului triunghiular \hat{U}_{tr} și perioada (frecvența) acestuia $T_c (= 1/f_c)$. Considerând punctul zero în poziția reprezentată în Fig.17.2, poate fi scrisă ecuația dreptei care trece prin origine și care se suprapune cu rampa crescătoare a semnalului triunghiular:

$$u_{tr}(t) = \frac{\hat{U}_{tr}}{T_c/4} \cdot t \quad \text{unde } 0 < t < T_c/4 \quad (17.2)$$

Se observă din Fig.17.2 că timpul de conducție t_{on} este o sumă de intervale conform relației:

$$t_{on} = \frac{T_c}{2} + 2 \cdot t_1 \tag{17.3}$$

unde t_1 poate fi calculat egalând valoarea semnalului triunghiular, dat de relația (17.2), cu valoarea semnalului de control:

$$u_{ir}(t_1) = u_{control} \Leftrightarrow \frac{\hat{U}_{ir}}{T_c/4} \cdot t_1 = u_{control} \Rightarrow t_1 = \frac{u_{control}}{\hat{U}_{ir}} \cdot T_c/4 \tag{17.4}$$

Introducând (17.3) și (17.4) în expresia duratei relative de conducție se obține:

$$D_{RC} = \frac{t_{on}}{T_c} = \frac{T_c/2 + 2 \cdot t_1}{T_c} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{u_{control}}{\hat{U}_{ir}} \right) \tag{17.5}$$

Relația (17.5) evidențiază că și în cazul utilizării unui semnal triunghiular pentru generarea unui semnal modulat în lățime durata relativă de conducție poate fi modificată prin intermediul semnalului de control $u_{control}$, dar după o altă relație față de cazul utilizării unui semnal periodic dinte de fierăstrău.

Structura de reglare a tensiunii din Fig.17.1 împreună cu modulatorul PWM formează un **regulator PWM** utilizat cu precădere de către convertoarele c.c.-c.c. stabilizatoare (surse de putere în comutație).

În aplicațiile cu convertoare c.c. – c.c. care utilizează în structura lor topologii „braț de punte” cum ar fi în cazul convertoarelor cu funcționare în două și patru cadrane sunt necesare perechi semnale **PWM complementare cu timp mort**. Formele de undă pentru o asemenea pereche sunt prezentate în Fig.17.3.

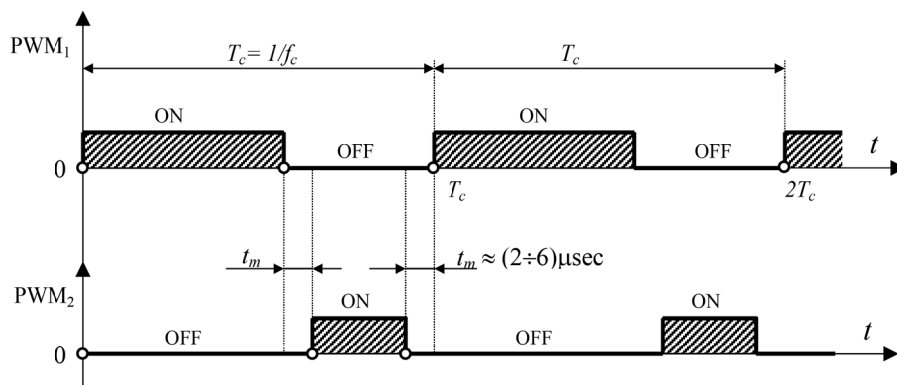


Fig. 17.3 Formele de undă a două semnale PWM complementare cu timp mort (t_m).

Semnalele PWM₁ și PWM₂ comandă fiecare câte un tranzistor din cele două aparținând unei structuri braț de punte. Timpul mort t_m corespunde intervalului în care ambele tranzistoare sunt comandate pentru blocare pentru a permite tranzistorului ce a

condus să se blocheze ferm înainte de a-l deschide pe celălalt. Se evită, în acest fel, situația de a apare o suprapunere în conducția celor două tranzistoare ceea ce ar fi echivalent cu un scurt circuit și distrugerea lor. Valoarea timpului mort este în funcție de tipul tranzistoarelor utilizate, sau mai exact, în funcție de rapiditatea acestora. Astfel, dacă sunt utilizate tranzistoare MOSFET timpul mort este în gama $(1\div 2)\mu\text{sec.}$, dacă se utilizează tranzistoare IGBT timpul mort este $t_m = (2\div 4)\mu\text{sec.}$, dacă se utilizează tranzistoare bipolare timpul mort este $t_m = (4\div 6)\mu\text{sec.}$ etc.

Cele două semnale complementare cu timp mort sunt obținute, de obicei, pornind de la un semnal PWM de bază (ex. PWM_1) din care cu ajutorul unor scheme de inserare a timpului mort sau cu ajutorul unor circuite specializate (ex. IXDP630, IXDP631) se generează și al doilea semnal (ex. PWM_2). Există posibilitatea ca la aceste circuite să se ajusteze prin diferite mijloace valoarea timpului mort. Sunt și circuite integrate specializate care generează simultan la ieșire câte două semnale PWM complementare cu timp mort (ex. IXDP610). De asemenea sunt microcontrolere sau procesoare de semnal DSP care pot genera mai multe perechi de asemenea semnale, utilizate, de exemplu, pentru comanda invertoarelor PWM trifazate.

3. Controlerul PWM integrat IXDP 610

În Laboratorul Electronică de putere sunt utilizate mai multe modulatori PWM pentru comanda convertoarelor c.c. – c.c. Unele au fost realizate cu ajutorul integrelor specializate, iar altele cu ajutorul sistemelor moderne de control numeric bazate microcontrolere (μC) sau procesoare numerice de semnal (DSP). În referatul de față vor fi descrise două variante de modulatori PWM, ușor de utilizat în laboratorul didactic, realizate cu ajutorul controlerului numeric IXDP610 fabricat de firma *IXYS Semiconductor*. Acest circuit integrat generează două semnale PWM complementare cu parametrii (frecvență, factor de umplere, timp mort) programabili.

Controlerul specializat IXDP 610 este un dispozitiv CMOS, integrat pe scară largă (LSI), care interfațează cu magistralele unui microsistem numeric de 8 biți pentru a genera două semnale modulate în durată (PWM) complementare, cu timp mort. Principalele caracteristici ale circuitului sunt:

- este compatibil cu magistralele standard a unui microprocesor;
 - are două ieșiri complementare pentru comanda directă a unor structuri de putere în punte sau brațe de punte;
 - factorul de umplere este programabil în gama 0 - 100%;
 - frecvența de comutație maximă este de 300 kHz;
 - posibilitate de programare a timpului mort;
 - ieșirile pot fi dezactivate atât pe cale hardware, cât și pe cale software;
 - existența unui bit pentru zăvorârea stării programate pentru a preveni avarii la nivelul circuitelor de forță comandate.
-

Circuitul IXDP 610 este integrat într-o capsulă de 18 pini a căror configurație este prezentată în Fig.17.4. Alimentarea se face cu o tensiune de $V_{cc} = 5V$.

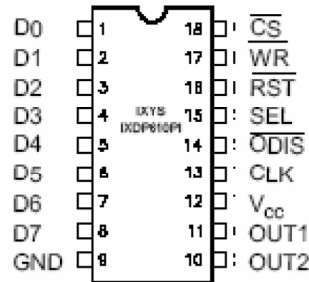


Fig. 17.4 Capsula circuitului IXDP 610.

Schema bloc funcțională a circuitului IXDP610 este prezentată în Fig.17.5.

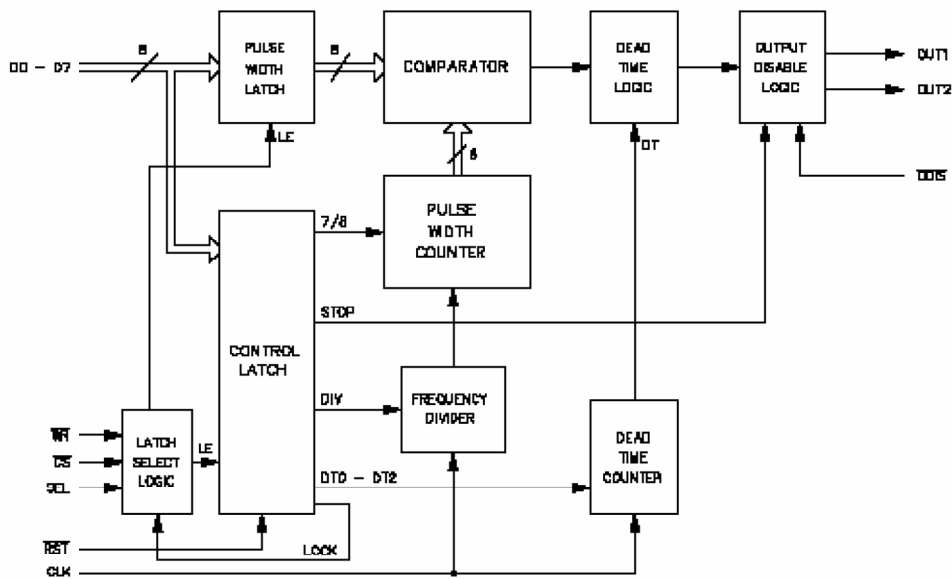


Fig. 17.5 Schema bloc a controlerului IXDP 610 (după catalog IXYS).

Se observă că, pentru a putea funcționa, controlerul IXDP610 trebuie să fie conectat la magistrala de date (D0÷D7) a unui sistem numeric. În plus, mai are nevoie de următoarele semnale:

- \overline{CS} (*Chip Select*) – semnal activ în zero logic 0L prin care se permite preluarea cuvintelor de 8 biți de pe magistrala de date;

- \overline{RST} (*Reset*) – semnal activ în 0L prin care circuitul este inițializat;
- SEL (*Select*) – semnal logic prin care sunt selectate cele două registre *Control Latch* și *Pulse Width Latch*. SEL=0L permite înscrierea cuvântului de 8 biți de pe magistrala de date în registrul *PW Latch* prin care se fixează factorul de umplere al semnalelor PWM complementare de la ieșire. SEL=1L permite selecția registrului *Control Latch* în care se înscrie un cuvânt de control prin care se programează funcționarea controlerului;
- \overline{WR} (*Write*) – tranziția din 0L în 1L a acestui semnal determină înscrierea efectivă a cuvântului de pe magistrala de date în unul din cele două registre, în funcție de valoarea semnalului SEL. Condiția este ca semnalul \overline{CS} să fie activ;
- \overline{ODIS} (*Output Disable*) – semnal activ în 0L prin care cele două semnale PWM de la ieșirile OUT_1 și OUT_2 sunt dezactivate (ambele sunt forțate în zero);
- CLK (*Clock*) – reprezintă semnalul de tact al circuitului prin care este fixată frecvența semnalelor PWM ($f_c = f_{clock} / 256$ sau $f_c = f_{clock} / 128$) și determină tranzițiile în schema numerică internă a controlerului.

Tehnica de generare a semnalelor PWM este aceeași cu cea descrisă în secțiunea anterioară bazată pe unda modulatorie dinte de fierăstrău. Semnalul dinte de fierăstrău este obținut de controler sub formă numerică cu ajutorul numărătorului *Pulse Width Counter* care numără ciclic 256 perioade de *clock* dacă este selectată rezoluția de 8 biți sau 128 dacă este selectată rezoluția de 7 biți prin cuvântul de control. Numărul sub formă binară generat de *PW Counter* după fiecare perioadă de *clock* (T_{clock}) este comparat cu numărul înscris în registrul factorului de umplere (*PW latch*). Comparatorul numeric din Fig.17.3 joacă exact același rol cu cel notat cu COMP în schema principială din Fig.17.1.

Blocul *Dead Time Logic* introduce un anumit timp mort (*dead time*) în forma de undă a celor două semnale complementare PWM. Valoarea timpului mort este programată pentru un număr întreg de perioade de *clock* (max. $7 \times T_{clock}$) și este impusă de blocul *Dead Time Counter*. Logica de timp mort dezactivează cele două ieșiri PWM la fiecare tranziție a comparatorului pe intervalul timpului mort fixat.

Cele două ieșiri OUT_1 și OUT_2 furnizează semnale PWM complementare capabile să asigure un curent de 20mA la nivelele de tensiune TTL (5V). Astfel, controlerul IXDP 610 este capabil să comande direct optocuploare sau module de putere inteligente.

Pentru sistemul numeric controlerul IXDP610 este văzut ca două porturi I/O care pot fi înscrise (programate) prin intermediul magistralei de date D0÷D7. Primul port corespunde registrului *Pulse Width Latch* în care se înscrie, de câte ori se dorește, noua valoare a factorului de umplere pentru cele două semnale PWM complementare. Înscrierea cuvântului PWM nu trebuie sincronizată cu semnalul CLK și nici nu trebuie

să țină cont de un anumit moment în care se află semnalele PWM. Imediat ce semnalul /WR este activat registrul *PW Latch* este înscris și noua valoare a factorului de umplere acționează imediat. Al doilea port corespunde registrului *Control Latch* în care se înscrie un *cuvânt de control* de 8 biți prin care este programată funcționarea controlerului. Structura cuvântului de control este dată în Fig.17.6.

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
STOP	7/8	DIV	LOCK	-	DT	DT	DT

Fig. 17.6 Structura cuvântului de control înscris în registrul *Control Latch*.

Semnificația celor 8 biți ai cuvântului de control este următoarea :

- D2, D1, D0 - sunt folosiți pentru programarea timpului mort (*Dead Time -DT*). Poate fi utilizată orice combinație. Dacă toți cei 3 biți sunt setați în 0L în formele de undă a celor două semnale PWM complementare nu se introduce timp mort. Dacă toți cei 3 biți sunt setați în 1L în formele de undă a celor două semnale PWM complementare se introduce un timp mort de 7 perioade T_{clock} ;
- D3 este neutilizat – trebuie aplicat unui semnal permanent de 0L pe acest bit.
- D4 este bitul de zăvorâre (*lock*) a cuvântului de control. Dacă se înscrie 1L la această poziție cuvântul de control nu mai poate fi schimbat decât prin trimiterea unui semnal de *Reset*. Dacă se înscrie 0L la această poziție cuvântul de control poate fi schimbat prin trimiterea unui alt cuvânt;
- D5 este folosit pentru divizarea cu doi a *clock*-ului aplicat la pinul 13 al integratului. Dacă D5 = 0L semnalul CLK nu este divizat. Dacă D5 = 1L semnalul CLK este divizat cu doi;
- D6 este folosit pentru selectarea rezoluției numărătorului *PW Counter* și a cuvântului PWM. Dacă D6 = 0L rezoluția este de 7 biți, iar dacă D6 = 1L rezoluția este de 8 biți.
- D7 permite blocarea software a celor două semnale PWM (sunt aduse în zero) pe toată durata cât acest bit este menținut în 0L.

Cuvântul de control este înscris în registrul *Control Latch*, de obicei, o singură dată atunci când este pus în funcțiune, după care sistemul numeric lucrează numai cu registrul PWM pentru a actualiza periodic valoarea factorului de umplere. Numai dacă se dorește modificarea *on-line* a parametrilor semnalelor PWM se va reînscris un nou cuvânt de control după un protocol care va ține cont de valoarea setată inițial a bitului D4 (*lock*).

4. Modulator PWM comandat prin portul paralel al unui calculator

Pentru a obține o variantă flexibilă și ușor de utilizat a modulatorului PWM realizat cu integratul specializat IXDP610 s-a ales varianta interfațării acestuia cu un calculator obișnuit IBM-PC prin intermediul portului paralel. Astfel, modulatorul poate fi conectat la calculator cu ajutorul unui cablu prelungitor standard asemănător cablului de imprimantă.

Interfața paralelă standard implementată în calculatoarele IBM-PC a fost concepută pentru transmiterea datelor către o imprimantă conform protocolului Centronics. Portul paralel constă în 8 linii de date (D0÷D7), 4 linii de comandă, 5 linii de stare. Acesta este accesibil din exterior prin intermediul unui conector RK25 - mamă (25 pini). Liniile de semnal sunt gestionate prin intermediul a 3 registre corespunzătoare: registrul de date, registrul de comenzi și registrul de stare. În general, registrul de date este prevăzut să funcționeze numai în mod ieșire dar la unele variante de implementare el poate fi trecut în înaltă impedanță, portul de date devenind bidirecțional. Registrul de comandă are ieșirile de tip *open collector* și poate fi utilizat ca un port bidirecțional. Într-un calculator IBM - PC pot fi implementate până la 3 porturi paralele (LPT1, LPT2 și LPT3 - LPT = Line PrinTer), fiecare dintre acestea ocupând câte 8 adrese consecutive în harta de I/O pornind de la o adresa de bază BAZA până la BAZA + 7.

Schema modulatorului PWM este prezentată în Fig.17.7. În scopul protecției în ambele sensuri, atât a calculatorului, cât și a integratului specializat semnalele portului paralel sunt preluate prin intermediul unor *buffer-e* (U_1 și $U_2 \rightarrow 74LS245$) și transmise controlerului integrat IXDP610. Prin intermediul unor semnale de comandă și de stare ale portului paralel (1- *Strobe*, 14 - *Auto linefeed*, 16 - *Reset*, 17 - *Select printer*) sunt controlați pinii integratului specializat: \overline{RST} , \overline{WR} , \overline{CS} și SEL. Astfel, prin intermediul unui program, special conceput pentru a gestiona semnalele portului paralel, este activat mai întâi semnalul de *reset* \overline{RST} pentru a inițializa circuitul. Urmează operația de programare a circuitului prin care este înscris octetul cuvântului de control în registrul corespunzător (*Control Latch*). Acest cuvânt este preluat de pe magistrala D0÷D7 a portului activând semnalele \overline{CS} , SEL=0L și \overline{WR} . În etapa a doua de programare se fixează duratele relative de conducție (factorul de umplere) a celor două semnale PWM complementare. Pentru acesta este înscris periodic registrul PWM al integratului (*PWM Latch*) activând semnalele \overline{CS} , SEL=1L și \overline{WR} . Mărimea duratelor relative de conducție este fixată de combinația de pe magistrala de date a portului D0÷D7. Odată înscris registrul PWM, la ieșirile controlerului (pinii 10 și 11) se obțin semnalele analogice PWM₁ și PWM₂. Pentru a proteja integratul specializat cele două semnale PWM sunt trecute prin două canale libere ale *buffer-ului* U2 înainte de a fi aplicate convertorului. Nivelul logic al semnalelor PWM este de 5V (nivel TTL).

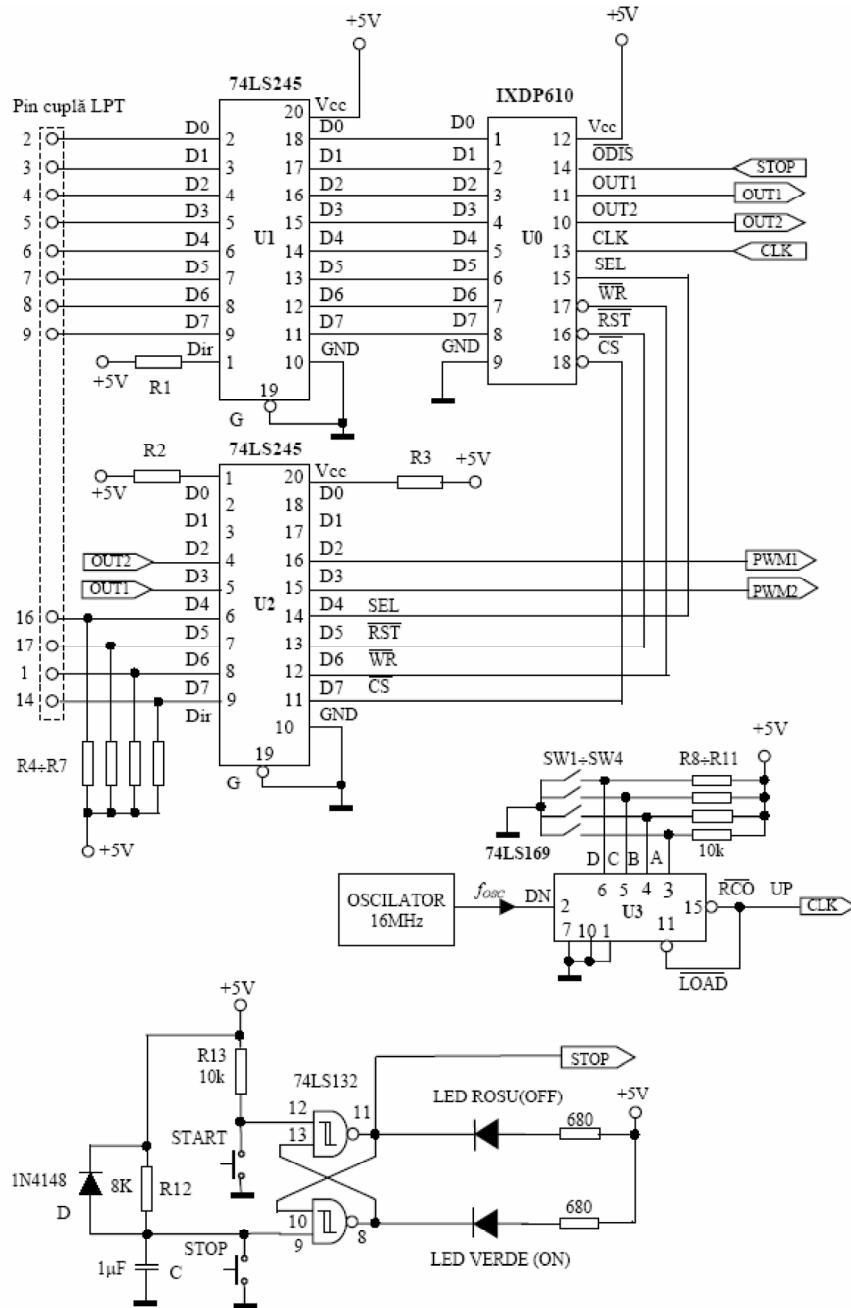


Fig. 17.7 Schema modulatorului PWM comandat prin intermediul portului paralel al unui calculator obișnuit IBM-PC

Pentru a putea funcționa, controlerul IXDP610 are nevoie de un semnal de tact (*clock* CLK) a cărui frecvență fixează și frecvența de comutație (de lucru) a convertorului electronic de putere comandat de controler. În acest scop s-a utilizat un oscilator de cuarț în 4 puncte de 16MHz. Ajustarea frecvenței f_{clock} aplicate integratului se poate face în trepte prin intermediul numărătorului U3 (74LS169) programat manual cu ajutorul micro-comutatoarelor SW1÷SW4 (*switchs*). Există și posibilitatea ajustării frecvenței de comutație și prin intermediul calculatorului impunând divizarea cu 2 a semnalului de CLK de către controlerul însuși.

Pentru a evita pornirea necontrolată a modulatorului PWM, precum și de a permite blocarea voită a semnalelor de comandă PWM s-a utilizat un circuit de START/STOP. La punerea sub tensiune a sistemului întotdeauna bistabilul format din cele două porți NAND 74LS132 se așează pe poziția corespunzătoare blocării semnalelor de comandă datorită circuitului format din rezistența R12, capacitatea C și dioda D. Starea de blocare a semnalelor logice de comandă PWM generate de integratul IXDP610 este pusă în evidență de aprinderea LED-ului de culoare roșie din schemă. Deblocarea se realizează prin apăsarea butonului de START, iar starea de funcționare este pusă în evidență de aprinderea LED-ului de culoare verde. Blocarea voită a semnalelor se poate face prin apăsarea butonului de STOP. În urma acestei manevre este basculat bistabilul și se generează un semnal de /STOP care comandă pinul 14 (/ODIS) al integratului.

Întreaga schemă se alimentează de la o tensiune unică de 5Vcc. Pentru aceasta a fost realizată o sursă clasică (liniară).

Schema modulatorului PWM împreună cu schema de generare a semnalului CLK, schema de START/STOP și schema sursei de alimentare au fost implementate practic pe o placă, a cărei imagine este prezentată în Fig.17.7.

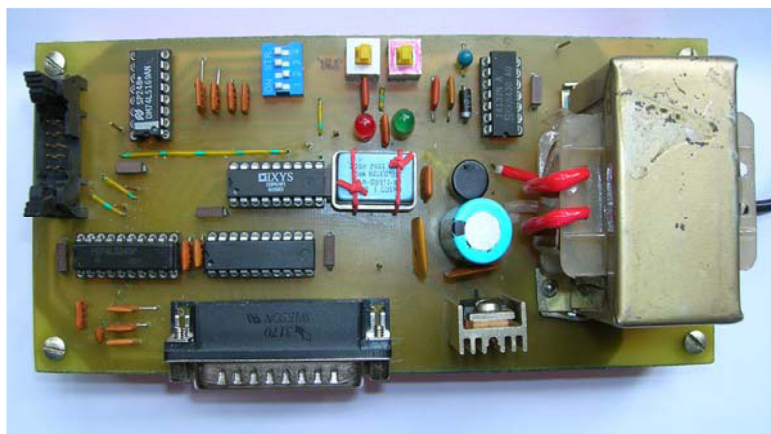


Fig. 17.7 Imaginea modulatorului PWM comandat prin intermediul portului paralel.

5. Modulator PWM cu două posibilități de comandă: manual sau prin portul paralel al unui calculator

În afară de modulatorul PWM realizat cu integratul specializat IXDP610 în variantă controlată exclusiv prin intermediul portului paralel a unui calculator s-a mai realizat un modulator PWM cu același circuit specializat conceput a fi controlat mixt, atât prin intermediul portului paralel, cât și manual. Schema acestui modulator este prezentată în Fig.17.9. Alegerea uneia din cele două variante de control, prin intermediul calculatorului (PC) sau manual (MAN) poate fi selectată prin intermediul unui comutator (SW10). Dacă se alege varianta PC schema va funcționa la fel ca cea descrisă în secțiunea anterioară. Pe magistrala de date (D0÷D7) vor fi regăsite semnalele portului paralel preluate prin intermediul *buffer*-ului U3, iar semnalele de control vor preluate prin intermediul *buffer*-ului U4A. Ambele *buffer*-e vor fi activate de semnalul logic PC/MAN pe nivelul 0L (comutatorul SW10 este închis). În același timp celelalte circuite cu acces la magistrala de date și control (U1, U2, U4B) sunt inactice (ieșiri în starea de înaltă impedanță), neexistând conflicte pe magistrale.

Dacă se trece comutatorul SW10 în poziția manual (deschis) semnalul PC/MAN va avea o valoare ridicată (1L) și va satura tranzistorul T (2N2222). Astfel, poate fi activat convertorul analog/numeric ADC0804 deoarece pinul 1, de selecție (/CS), este conectat de tranzistor la masă. Obținerea efectivă la ieșirile convertorului A/D a rezultatelor conversiei are loc atunci când pinul 2 al acestuia (/RD) este adus în 0L. După cum se observă în schema din Fig.17.9, nivelul logic al pinului 2 depinde de semnalul SEL aplicat controlerului IXDP610. Atunci când SEL = 0L este selectat registrul intern *PW Latch* al controlerului și convertorul ADC0804 depune pe magistrala de date cuvântul de 8 biți rezultat în urma conversiilor semnalului analogic U_{PWM} dat de potențiometrul P1. Acest cuvânt va fi înscris în registrul PWM al controlerului.

Conversia A/D a semnalului U_{PWM} este realizată periodic cu o frecvență aleasă prin intermediul constantei de timp a circuitului R_1-C_1 . Între două conversii *valoarea numerică* a semnalului U_{PWM} de la ieșirea convertorului se păstrează. Repetarea conversiei este utilă pentru a sesiza variațiile tensiunii U_{PWM} obținute la cursorul potențiometrului în urma modificării manuale a poziției acestuia. Fiecare perioadă de conversie este inițiată de semnalul INTR, obținut la pinul 5 al convertorului A/D. Acesta este aplicat pinului 3 (/WR) al aceluiași circuit și intrării *buffer*-ului U4B pentru a fi transmis mai departe controlerului IXDP610 în scopul reactualizării registrului PWM. Prima conversie a circuitului ADC0804 este declanșată de butonul START în cazul comenzii manuale a modulatorului PWM.

Selecția înscrierii celor două *latch*-uri ale controlerului IXDP610 se face prin intermediul comutatorului SW9. În poziția închis a acestuia (SEL=0L) se selectează *PW Latch*, iar în poziția deschis (SEL=1L) se selectează *Control Latch*.

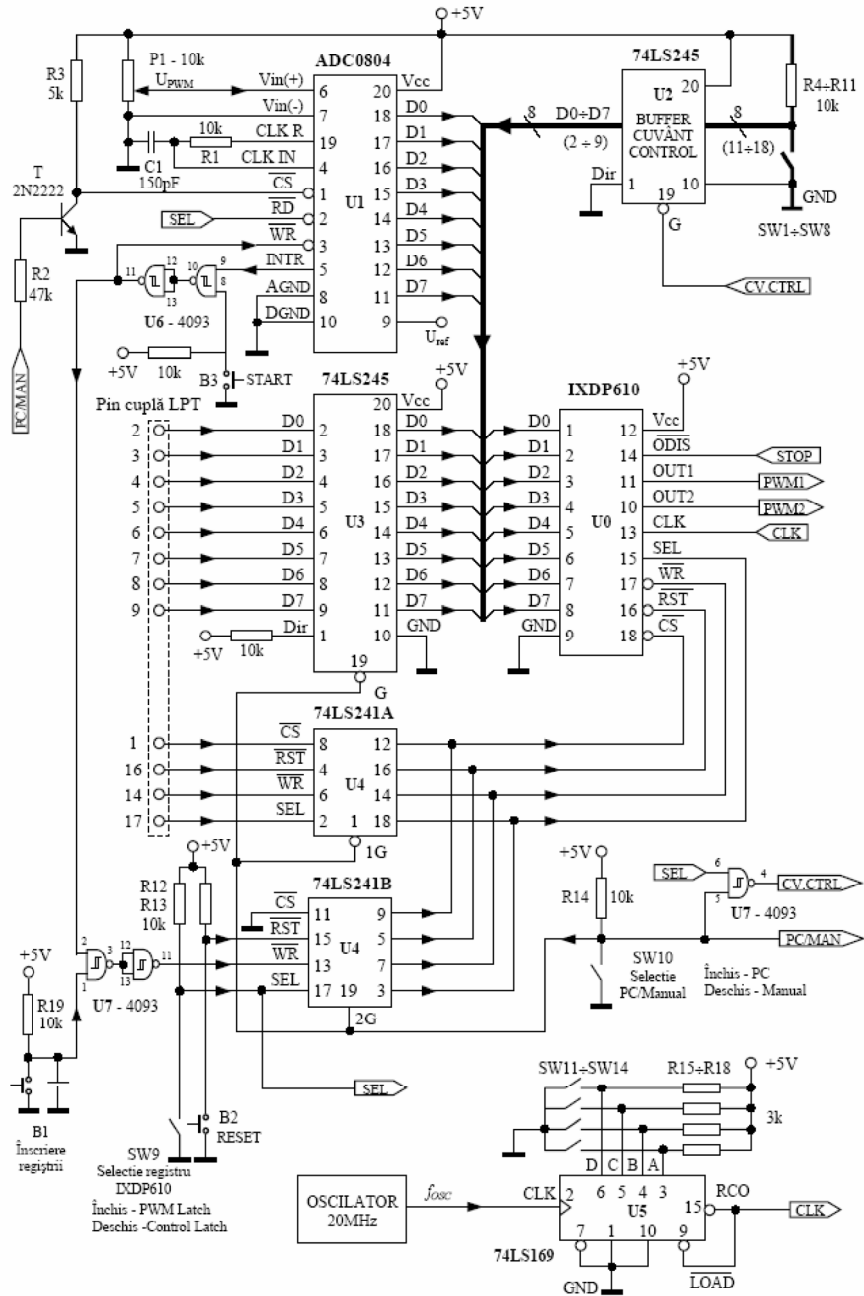


Fig. 17.9 Schema modulatorului PWM cu două posibilități de comandă: manual sau prin intermediul portului paralel al calculatorului.

O problemă deosebită în cazul comenzii manuale a modulatorului o constituie programarea acestuia înainte de a fi pus în funcțiune. În acest scop trebuie parcurși următorii pași succesivi:

- 1) Selectarea registrului de control (*Control Latch*) al controlerului IXDP610 prin deschiderea comutatorului SW9 (SEL=1L);
- 2) Apăsarea butonului B2 de *Reset* pentru a inițializa controlerul;
- 3) Apăsarea butonului B1 pentru a scrie cuvântul de control în registrul *Control Latch*;
- 4) Selectarea registrului PWM al controlerului IXDP610 prin schimbarea poziției comutatorului SW9 (SEL=0L);
- 5) Apăsarea butonului de START pentru a porni simultan convertorul A/D și controlerul IXDP610.

După cum reiese din Fig.17.9 cuvântul de control în cazul comenzii manuale este format prin intermediul celor 8 *switch*-uri SW1÷SW8. Combinația o alege utilizatorul pornind de la combinația necesară pentru cei 8 biți ai cuvântului de control dat în Fig.17.6. Această combinație este depusă pe magistrala de date atunci când este activat *buffer*-ul cuvântului de control (U2), respectiv atunci când semnalul CVCTRL ia valoarea 0L, după ce s-a ales SEL = 1L și comutatorul SW10 este pe poziția corespunzătoare comenzii manuale (PCMAN = 0L). În momentul în care comutatorul SW9 este trecut înapoi în poziția corespunzătoare registrului PWM (*PW Latch*) *buffer*-ul cuvântului de control este dezactivat, trecându-și ieșirile în starea de înaltă impedanță, iar magistrala de date este preluată de ieșirile D0÷D7 a convertorului A/D.

Și în cazul acestui modulator semnalul de *clock* (CLK) necesar controlerului IXDP610 se obține cu ajutorul unui oscilator în patru puncte cu cristal de cuarț (20MHz) și un divizor realizat în jurul numărătorului U5 (74LS169). Frecvența semnalului de tact obținută după numărător poate fi modificată în trepte prin intermediul micro-întrerupătoarelor SW11÷SW14. De asemenea, ca și în cazul modulatorului PWM prezentat în secțiunea anterioară și acest modulator include aceeași schemă de START/STOP prezentată în Fig.17.10.

O facilitate foarte importantă a modulatorului PWM, care oferă flexibilitate pentru diferite instalații în laborator, este etajul final prevăzut cu mai multe variante de acces la cele două semnalele PWM, așa cum se prezintă în Fig.17.10. Mai întâi din considerente de protecție a controlerului IXDP610 semnalele PWM sunt trecute prin *buffer*-ul neinversor U9 (7407). Mai departe, semnalele PWM₁ și PWM₂ sunt furnizate la ieșire, fie pe două nivele (5V, 15V), fie cu posibilitatea activării unor optocuploare pentru a le transmite unor scheme de forță separate galvanic, fie cu posibilitatea preluării individuale a acestora prin intermediul unor conectori, fie cu posibilitatea preluării ambelor printr-o cuplă de 10 pini (nivel TTL).

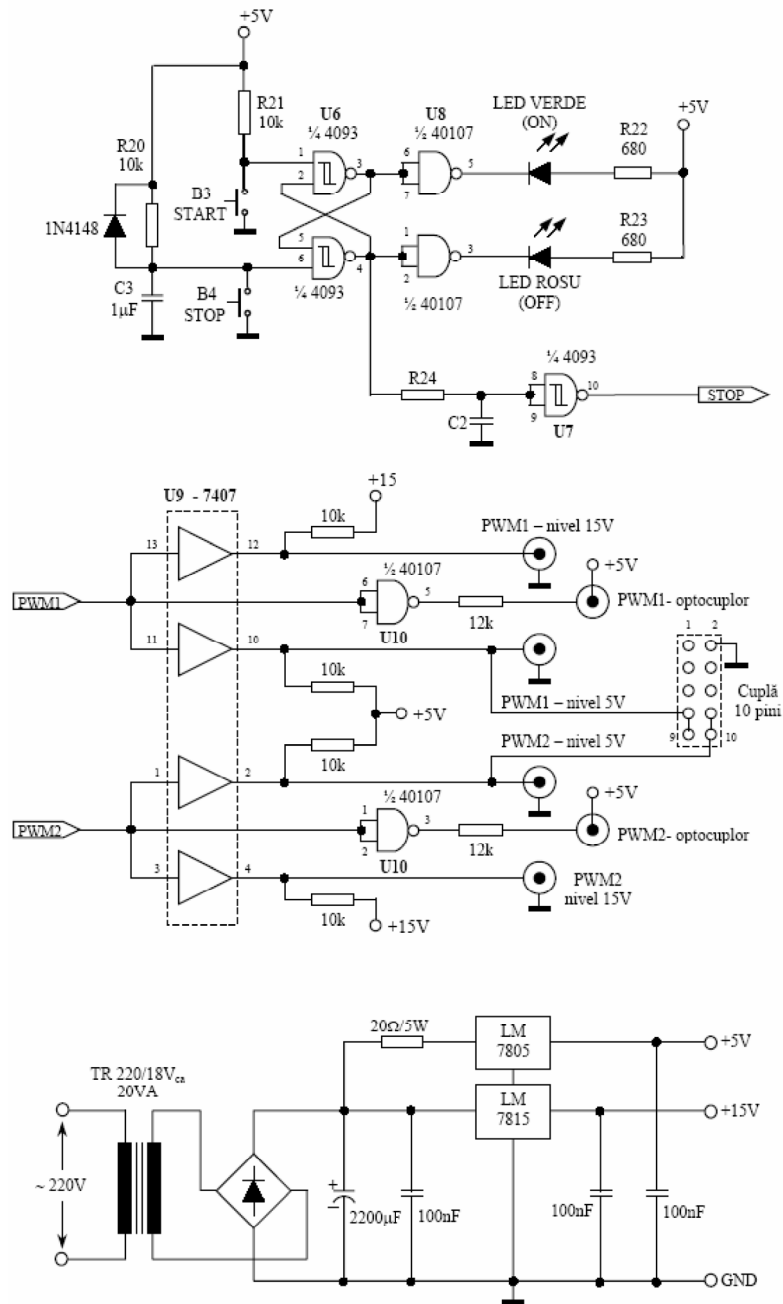


Fig.17.10 Schema de START/STOP, etajul de ieșire și sursa de alimentare a modulatorului PWM cu comandă mixtă.

Deoarece la acest modulator PWM sunt necesare două tensiuni, $5V_{cc}$ și $15V_{cc}$, sursa prezentată în Fig.17.10 include două stabilizatoare în 3 puncte (LM7805 și LM7815).

Imaginea modulatorului PWM realizat cu integratul specializat IXDP610 conceput a fi controlat mixt, atât prin intermediul portului paralel, cât și manual, este prezentată în Fig.17.11.

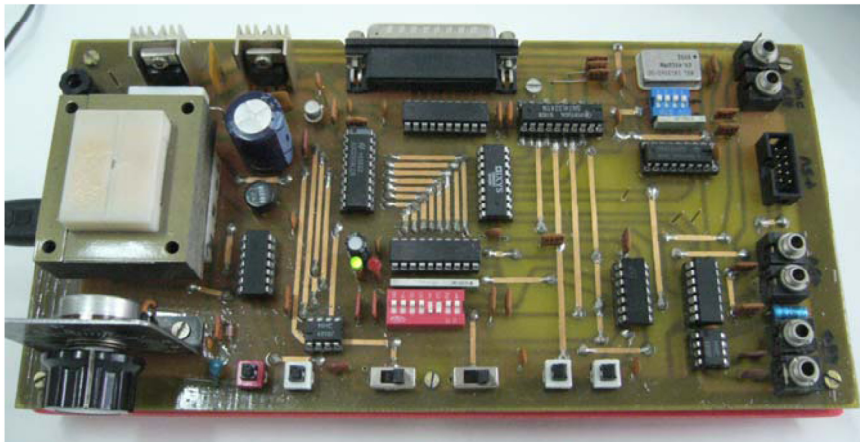


Fig. 17.11 Imaginea modulatorului PWM cu două posibilități de comandă: manual sau prin intermediul portului paralel al calculatorului.

5. Modul de lucru

1. Se va studia din prima parte a referatului aspectele teoretice cu privire la modulatoarele PWM: locul și rolul lor într-un sistem electronic de putere, tehnici de generare a semnalelor PWM, formele de undă ale unei perechi de semnale PWM complementare cu timp mort și parametrii acestora (frecvența și perioada de comutație, factor de umplere, timp mort etc.);
2. Se va analiza schema bloc a controlerului IXDP 610, vor fi trecute în revistă semnalele necesare pentru ca acest integrat specializat să lucreze, se va aprofunda modul în care integratul este programat înainte de a fi adus în funcțiune și modul în care poate fi ajustat în timpul funcționării factorul de umplere al celor două semnale PWM de la ieșire;
3. Se va realiza montajul de laborator, așa cum se prezintă în Fig.17.12, pentru a testa varianta a doua de modulator PWM în varianta cu comandă manuală;

4. Se va fixa combinația cuvântului de control cu ajutorul pachetului de 8 micro-întrerupătoare SW1÷SW8 (de culoare roșie) ținând cont de semnificația biților din componența acestui cuvânt dat în Fig.17.6. De exemplu, se poate fixa combinația inițială ca fiind: $D7÷D0 = 11110111$ ($7 \times T_{clock}$ pt. timpul mort t_m);
 5. Se va alimenta modulatorul PWM, se va selecta varianta MAN (manual) de la comutatorul PC/MAN și se va programa funcționarea acestuia (se va înscrie cuvântul de control în *Control Latch*) după protocolul descris în secțiunea anterioară;
 6. Se va oscilografia semnalul de *clock* (CLK) după divizorul realizat cu ajutorul numărătorului 74LS169 și se va pune în evidență variația în trepte a frecvenței acestui semnal dacă este modificată combinația de închidere a celor patru micro-întrerupătoare SW11÷SW14 (de culoare albastră);
 7. Se va alege frecvența cea mai joasă a semnalului CLK (toate cele patru micro-întrerupătoare SW11÷SW14 deschise), se vor conecta sondele osciloscopului cu două canale la ieșirile de măsură a celor două semnale PWM marcate pe placa modulatorului, se va poziționa cursorul potențimetrului P_1 la jumătatea cursei, în dreptul diviziunii 5 și se va apăsa butonul de START;
 8. Se vor analiza, în corespondență, formele de undă a celor două semnale PWM oscilografiate. Acestea trebuie să fie identice cu cele din Fig.17.3 și cu cele prezentate în imaginea osciloscopului din Fig.17.12. Se va constata complementaritatea lor și existența timpului mort;
 9. Se va schimba poziția cursorului potențimetrului, se va observa modificarea factorului de umplere al celor două semnale PWM în sensuri contrare și faptul că mărirea timpului mort nu se schimbă pe durata reglajului;
 10. Se vor bloca cele două semnale PWM prin apăsarea butonului de STOP și se va modifica combinația cuvântului de control pentru a schimba valoarea timpului mort. Se poate fixa combinația: $D7÷D0 = 11110011$ ($3 \times T_{clock}$ pentru t_m);
 11. Se va înscrie noul cuvânt de control în *Control Latch* după protocolul cunoscut și se va apăsa butonul de START. Cele două semnale PWM oscilografiate vor avea acum aceeași frecvență ca în experimentul anterior, dar timpul mort va fi diferit;
 12. Se menține același cuvânt de control și aceeași poziție a potențimetrului în timp ce se va modifica frecvența semnalului CLK cu ajutorul combinației celor patru micro-întrerupătoare SW11÷SW14. Se va observa schimbarea frecvenței semnalelor PWM odată cu modificarea semnalului CLK. De asemenea, se va observa că mărirea timpului mort va avea aceeași pondere procentuală raportat la perioada de comutație.
-

13. Se va deconecta alimentarea modulatorului PWM și se va realiza montajul de laborator pentru a testa modulatorul PWM în varianta cu comandă prin intermediul calculatorului. În acest sens se va cupla modulatorul prin cablul special conceput la portul paralel al calculatorului și comutatorul PC/MAN va fi poziționat pe poziția PC (stânga);
14. Se va fixa o frecvență pentru semnalul CLK (de exemplu frecvența cea mai mică) și se va alimenta modulatorul;
15. Se va porni calculatorul și se va lansa programul special conceput pentru a testa în laborator modulatorul PWM. Așa cum se va vedea, programul dispune de ferestre prin care se poate programa cuvântul de control, respectiv cuvântul PWM, cuvinte trimise controlerului prin intermediul portului paralel;
16. Se vor realiza aceleași teste ca în cazul comenzii manuale, toate modificările fiind de data aceasta realizate după o **logică programată**, soluție mult mai flexibilă și mai rapidă decât în cazul anterior realizată prin mijloacele **logicii cablate**.

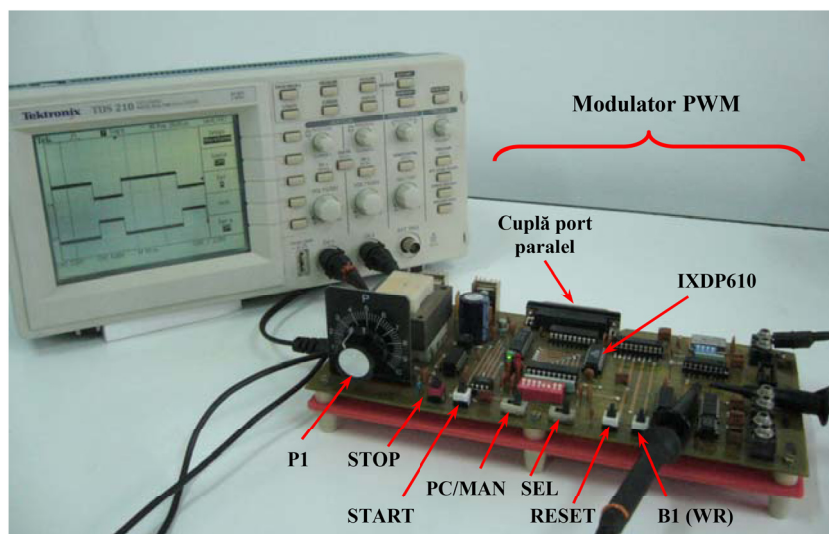


Fig. 17.12 Imaginea montajului de laborator pentru analiza funcționării modulatorului PWM în varianta comenzii manuale.