

Raport de Cercetare

Grant: *Cercetarea, proiectarea hardware si software, realizarea și testarea unui bloc electronic de comandă inteligentă pentru un sistem de transport pe pernă de aer*

Autor: Prof. dr. ing. Marius OTEȘTEANU
Universitatea Politehnica din Timișoara

Cuprins

Cuprins	1
1. OBIECTIVELE GRANTULUI	3
2. TRANSPORTUL PE PERNĂ DE AER	4
2.1. Comanda transportoarelor pe pernă de aer	4
2.2. Tipuri de semnale de comandă	5
2.3. Configurații complexe de transportoare	5
3. DEZVOLTAREA SOLUȚIILOR TEHNICE	7
3.1. Stadiul actual al comenzii transportoarelor pe pernă de aer	7
3.1.1. Comportamentul sistemelor pneumatice	7
3.1.2. Necesitatea comenzii cu buclă de reacție	7
3.2. Identificarea parametrilor necesari comenzii unui transportor	8
3.2.1. Condițiile generale	8
3.2.2. Semnalele de interfațare	8
3.2.3. Comenzile	9
3.2.4. Funcțiile	9
3.2.5. Configurațiile	9
3.2.6. Parametrii sistemului	9
3.3. Evaluarea mijloacelor hardware, software și de interfață	10
3.3.1. Arhitectura hardware necesară	10
3.3.2. Algoritmul de comandă a direcției	15
3.4. Proiectarea hardware și software a blocurilor electronice	16
3.4.1. Modulul <i>mPWM</i>	16
3.4.2. Modulul <i>mLENK</i>	16
3.4.3. Modulul <i>mCOMP</i>	17
3.4.4. Principiile urmărite în proiectarea software	18
3.4.5. Proiectarea software	20

4.	REALIZAREA ȘI TESTAREA MODELELOR EXPERIMENTALE	24
4.1.	Proiectarea de ansamblu și a cablajelor imprimate	24
4.1.1.	Modulul de comandă PWM a propulsiei, <i>mPWM</i>	24
4.1.2.	Modulul de comandă a direcției, <i>mLENK</i>	25
4.1.3.	Modulul complex de comandă, <i>mCOMP</i>	26
4.2.	Integrarea software – hardware	27
4.2.1.	Funcția de comandă PWM a propulsiei	27
4.2.2.	Funcția de comandă PWM a direcției	27
4.2.3.	Funcțiile modulului de control	27
4.3.	Testarea modulelor cu echipamente pneumatice	28
4.3.1.	Testarea individuală în condiții de laborator	28
4.3.2.	Testarea individuală cu subansambluri utilizate în transportoarele pe pernă de aer	28
4.3.3.	Testarea ansamblului modulelor pe un transportor pe pernă de aer	28
5.	COMANDA UNOR CONFIGURAȚII PARTICULARE DE TRANSPORT PE PERNĂ DE AER	29
5.1.	Comanda multiprocesor a unui tandem de transportoare	29
5.1.1.	Configurația tandem	29
5.1.2.	Standarde de comunicație serială	29
5.1.3.	Proiectarea și implementarea comunicației seriale	31
5.2.	Ghidarea automată a unui transportor pe pernă de aer	31
5.2.1.	Stabilirea configurației de senzori	32
5.2.2.	Algoritmul de control adaptiv pentru urmărirea benzii de ghidare	33
5.2.3.	Implementarea algoritmului de comandă	34
5.3.	Testarea aplicațiilor	34
6.	SISTEM DE DEZVOLTARE PENTRU RECONFIGURAREA APLICAȚIILOR	35
6.1.	Problema reproiectării	35
6.2.	Interfața grafică	35
6.3.	Pașii de proiectare	36
6.3.1.	Definirea intrărilor digitale	36
6.3.2.	Definirea ieșirilor digitale	37
6.3.3.	Definirea intrărilor analogice	39
6.3.4.	Definirea ieșirilor PWM	39
6.4.	Proiectul de reconfigurare	40
7.	SISTEM EMBEDDED MODULAR CU MAGISTRALĂ DE EXTENSIE	41
7.1.	Problema sistemelor embedded	41
7.2.	Soluția modulară cu magistrală de extensie	41
7.3.	Implementarea achiziției numerice	41
7.4.	Implementarea generării semnalelor digitale	42
7.5.	Metoda de identificare a modulelor	42
7.6.	Modulele de uz general și analogice	43
7.7.	Magistrala de extensie generală	44
7.8.	Implementarea software	44
7.9.	Implementarea magistralei de extensie	44
8.	CONCLUZII	46

1. OBIECTIVELE GRANTULUI

Tema de cercetare abordează comanda electronică inteligentă a unui sistem de transport uzinal pe pernă de aer, implicând cunoștințe interdisciplinare, ca:

- acționări pneumatice,
- interfețe electronice analogice și numerice,
- sisteme microprogramabile,
- algoritmi de reglaj adaptiv.

Pentru realizarea unui prototip al acestui sistem și pentru implementarea acestuia pe un transportor real, colectivul de cercetare a beneficiat de finanțare din partea **CNCSIS**, pe durata a 3 ani, precum și de cofinanțare din partea firmei **Delu – Luftkissen-Transportgerätetechnik GmbH** din Nürnberg, Germania, producător de sisteme de transport pe pernă de aer.

Primul an al contractului a fost destinat:

1. identificării, împreună cu specialiștii firmei *Delu*, a parametrilor necesari sistemului electronic de comandă, ce urma a fi dezvoltat și implementat;
2. evaluării mijloacelor hardware, software și de interfață electro-mecanică disponibile și abordabile;
3. proiectării hardware și software a modulelor electronice, dedicate funcțiilor de propulsie, de direcție și de comandă;
4. întocmirii documentației necesare realizării prototipurilor celor trei module, în anul următor,

fiind finalizat cu două faze: **Dezvoltarea soluțiilor tehnice** și, respectiv, **Documentația hardware și software**.

Anul al doilea al grantului, cu obiectivele:

1. proiectarea de ansamblu și proiectarea cablajelor imprimate, pe baza schemelor electronice concepute și proiectate în primul an, a unui set de module electronice specializate,
2. integrarea software – hardware a programelor, algoritmilor și a subrutinelor dezvoltate individual în anul precedent,
3. testarea individuală a fiecărui modul, cu echipamente electronice de laborator,
4. testarea funcționării modulelor:
 - cu echipamente pneumatice, la sediul din Timișoara al firmei *Delu-Team S.R.L.* și, ulterior,
 - pe un transportor pe pernă de aer, la sediul din Nürnberg al firmei germane *DELU GmbH*,

a avut o fază unică, **Realizarea și testarea modelelor experimentale ale circuitelor electronice de comandă pe un transportor pe pernă de aer**.

Al treilea an al grantului a abordat obiectivele:

1. implementarea unei aplicații multiprocesor de comandă a unui tandem (*master – slave*) de transportoare,
2. implementarea unei aplicații de ghidare automată a unui transportor,
3. testarea aplicațiilor pe un transportor pe pernă de aer,

fiind finalizat cu faza unică **Dezvoltarea și implementarea tehnicilor și algoritmilor pentru comanda și controlul unor configurații particulare în utilizarea transportoarelor pe pernă de aer**.

Realizări suplimentare, față de obiectivele grantului, au fost determinate de necesitatea dezvoltării unei familii de sisteme dedicate, hardware și software, adaptate parametrilor diverselor aplicații particulare de transport pe pernă de aer:

1. interfață grafică pentru un sistem de dezvoltare de reconfigurare a unui sistem cu microcontroler,
2. arhitectură modulară, flexibilă și deschisă pentru extinderea performanțelor unui sistem cu microcontroler.

2. TRANSPORTUL PE PERNĂ DE AER

Transportorul pe pernă de aer este un vehicul industrial utilizat, de obicei în interiorul halelor industriale, la deplasarea diferitelor sarcini, cu greutate cuprinse între zeci de kg și sute de tone, oferind posibilitatea poziționării acestora, cu precizie, în orice configurație.

Folosirea transportoarelor pe pernă de aer pe liniile de asamblare pentru deplasarea autoturismelor, autobuzelor, tramvaielor, vagoanelor de tren sau a avioanelor duce la reducerea simțitoare a suprafeței ocupată în halele uzinelor producătoare, oferind astfel un avantaj financiar major. Pentru a folosi eficient spațiul limitat, corespunzător halei de asamblare, transportorul trebuie să fie controlat cu precizie, în viteză, înainte și înapoi, și în direcție unghiulară, dreapta sau stânga etc.

Pentru a satisface cerințele referitoare la precizia necesară poziționării și deplasării, la încadrarea în anumite configurații și, nu în ultimul rând, datorită dimensiunilor mari ale sarcinii, comanda transportorului trebuie să fie precisă, adaptivă, flexibilă. În acest scop a fost dezvoltată o familie de soluții hardware și software, concretizate în module specializate (*embedded systems*), care implementează toate funcțiile de control necesare.

2.1. Comanda transportoarelor pe pernă de aer

Pentru transportul pe pernă de aer, suprafața trebuie să fie orizontală, continuă și fără asperități. Transportorul utilizează cel puțin 4 perne de aer, pentru stabilitate, și cel puțin 2 roți active, pentru propulsie și direcție (fig. 1).

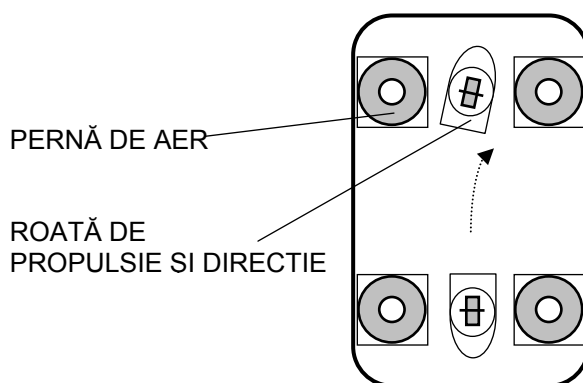


Fig. 1. Configurația de bază a transportoarelor pe pernă de aer

Când este oprit, pernele de aer au o presiune scăzută, iar transportorul se sprijină pe roți cu toată greutatea sa. Înainte de pornire, presiunea din pernele de aer este mărită, astfel că transportorul este ridicat de la sol câteva fracțiuni de milimetru, datorită fluxului de aer. Aproape toată greutatea este preluată de pernele de aer, roțile fiind apăsată doar de un procent mic din greutatea totală. Acest lucru este necesar unui contact optim între roți și suprafață, în vederea deplasării transportorului, prin controlarea propulsiei și a direcției. Pentru propulsie înainte sau înapoi, se utilizează cel puțin roata din față. Pentru direcție la dreapta sau la stânga, sub un anumit unghi, se utilizează doar roata din față.

Pentru fiecare roată este necesar un motor pentru propulsie (rotire în plan vertical) și un motor pentru direcție (rotire sub un anumit unghi în plan orizontal), astfel că structura de bază cu 2 roți necesită 4 motoare. Teoretic, motoarele pot fi electrice, hidraulice sau pneumatice. Practic însă sunt preferate motoarele pneumatice, deoarece există toate componentele și subansamblurile unui sistem pneumatic: compresor de aer, conducte flexibile la perne, supape electrice, regulatoare pneumatice etc, astfel că soluția cu motoare pneumatice rezultă mai ieftină, comparativ cu o soluție hibridă.

Pentru performanțe sporite în controlul transportorului, sunt necesare funcții suplimentare. În vederea minimizării suprafeței de lucru, la transportarea încărcăturilor uriașe, se poate reduce raza curbei, prin comanda ambelor roți, poziționate în unghiuri opuse. Cea mai mică rază necesară descrierii unui cerc se obține pentru un unghi de 45°, corespunzător funcției *cerc*. Parcarea laterală, paralelă cu un perete, prezintă, de asemenea, importanță. Aceasta se realizează prin intermediul funcției *lateral*, obținută prin rotirea ambelor roți la 90°. În acest mod, ambele roți sunt comandate pentru propulsie. Cele două funcții suplimentare sunt evidențiate în fig. 2.

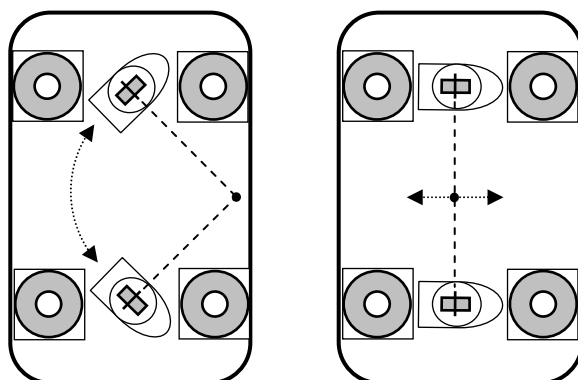


Fig. 2. Funcții suplimentare de comandă: *cerc* și *lateral*

2.2. Tipuri de semnale de comandă

Indiferent de mărimea, forma sau încărcătura transportorului, principalele semnale de comandă sunt *înainte* și *înapoi*, pentru propulsie, respectiv *stânga*, *dreapta*, *cerc* și *lateral*, pentru direcție. În modul de comandă manual, cu operator, toate semnalele de propulsie și de direcție pot fi furnizate prin intermediul unui panou de comandă, prezentat în fig. 3. Propulsia este controlată printr-un joystick (digital sau proporțional), iar direcția este controlată printr-un alt joystick (digital sau proporțional). Funcțiile suplimentare sunt controlate prin intermediul comutatoarelor.

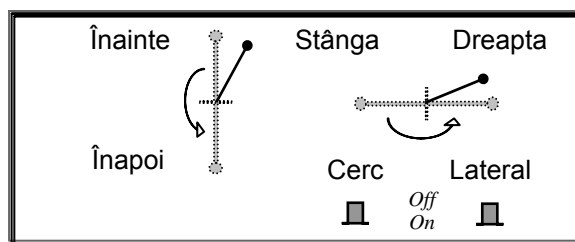


Fig. 3. Panou de comandă pentru propulsie și direcție

În modul de comandă autoghidat, semnalele pot fi generate de sistem în formă analogică sau numerică. În ambele moduri, semnalele de control sunt:

- **numerice**, de la joystick-urile digitale și de la comutatoarele de pe panou sau generate de circuite electronice,
- **analogice**, de la joystick-urile proporționale de pe panou sau generate de circuite electronice.

Tipul semnalelor utilizate, fie ele analogice sau numerice, este determinat de fiecare aplicație în parte. Motoarele pneumatice utilizate la transportoare sunt caracterizate de inerție. În comparație cu motoarele electrice, motoarele pneumatice au un răspuns lent la comenzi de tip impuls, ca urmare a compresiei inerente a aerului. Acesta este motivul pentru care comanda digitală poate fi utilizată doar în aplicații în care sunt acceptate anumite erori de traiectorie sau de poziționare. Pentru o ghidare de precizie ridicată, se recomandă comanda proporțională.

2.3. Configurații complexe de transportoare

Aplicațiile industriale de transport pot necesita configurații mai complexe ale transportorului cum ar fi:

- 3 roți, pentru transportoare mai lungi, cu o roată în mijloc controlată fie doar de funcția *lateral* fie cu capacitate deplină de ghidare, conform reprezentării din fig. 4;
- 4 roți, controlate integral pentru ghidare cu unghiuri de rotire individuale;
- transportoare în tandem, pentru încărcături supradimensionate, care necesită comunicarea parametrilor în cadrul unui sistem multiprocesor, pentru calculul unghiurilor individuale;

- autoghidat, urmând o linie, implicând senzori și traductoare magnetice sau optice, de obicei cu ieșiri digitale.

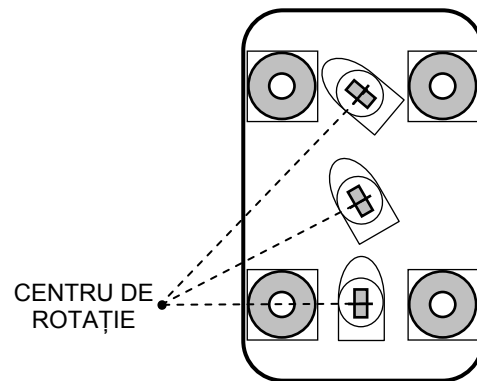


Fig. 4. Transportor cu 3 roți direcționale

3. DEZVOLTAREA SOLUȚIILOR TEHNICE

3.1. Stadiul actual al comenzii transportoarelor pe pernă de aer

Documentarea specifică aplicației a fost sprijinită de filiala din Timișoara a firmei *Delu*, care a oferit baza materială și de documentare necesară.

3.1.1. Comportamentul sistemelor pneumatice

Motoarele pneumatice utilizate în transportoare prezintă inerție. Datorită compresiei aerului, motoarele pneumatice prezintă un răspuns lent la comanda în comutație, comparativ cu motoarele electrice. Din acest motiv, comanda digitală poate fi utilizată numai în aplicații în care pot fi tolerate unele abateri de la traiectorie și erori de poziționare. Pentru un control mai precis, însă, este nevoie de comanda proporțională.

Un control precis în ceea ce privește propulsia *înainte – înapoi* presupune un start rapid, deplasare la viteză relativ ridicată și oprire la punct fix. În general, în cazul roților comandate pneumatic, se obțin erori de poziționare de până la $5 \div 10$ mm.

În cazul direcției *stânga – dreapta*, când un al doilea motor pneumatic comandă rotirea în plan orizontal a roții de propulsie, un control precis înseamnă poziționarea roții la 0° (deplasare *înainte – înapoi*), la 90° (deplasare *laterală*) sau la orice alt unghi stabilit. Erorile unghiulare obținute în mod uzual sunt de până la $3^\circ \div 5^\circ$.

În cazul comenzii numerice tradiționale, *on / off*, datorită compresiei aerului, precizia nu poate fi îmbunătățită, rezultând o inerție foarte mare, mai ales în cazul sarcinilor de sute de tone. Alternativa controlului PWM nu este una adecvată pentru acționarea dispozitivelor mecanice, ca electroventilele.

Deoarece mecanismele pneumatice utilizate depind de presiunea aerului comprimat, de comportamentul aerului comprimat în circuitele pneumatice și, nu în ultimul rând, de modul în care este controlată admisia și evacuarea aerului, este necesar ca toți acești factori să fie luați în considerare ca și premise în găsirea unei soluții tehnice.

O primă abordare a fost orientată asupra parametrilor legați de presiunea aerului introdus în circuitele pneumatice. S-a constatat că pentru valori ridicate ale presiunii aerului, de $5 \div 6$ Bar, mecanismul se comportă foarte bine pe toată durata mișcării, cu excepția zonei de poziționare, unde continua să se miște cu aceeași viteză ridicată. Atunci când se consideră că poziția impusă a fost atinsă și se ia decizia opririi admisiei aerului, datorită compresiei aerului, acesta urmează un proces de destindere foarte larg până la atingerea presiunii atmosferice. Pe parcursul acestui proces de destindere, însă, deplasarea transportorului continuă dincolo de poziția țintă, producându-se astfel o eroare de poziționare foarte mare, $\pm E / 2$.

S-au făcut teste și la presiuni mai mici de $2,5 \div 3$ Bar, dar s-a constatat că la aceste presiuni echipamentul pneumatic răspunde greoi și nu este capabil să deplaseze transportorul la poziția indicată în condițiile unui timp maxim acceptat de 5 s. În aceste condiții, s-ar fi impus folosirea unui dispozitiv pneumatic de control al admisiei și evacuării aerului. Din păcate, însă, utilizarea unor asemenea dispozitive implică costuri mari și oferă precizii de poziționare modeste.

O altă abordare a fost orientată pe posibilitatea modificării circuitelor de aer, prin introducerea unor elemente de volum variabil. Prin mărirea volumului acestor elemente la intrarea în zona de poziționare se reduce presiunea aerului și, în consecință, viteza de deplasare. Prin această metodă, precizia de poziționare poate fi substanțial îmbunătățită, însă dezavantajul major este că se impune utilizarea unui sistem de control care să decidă momentul și perioada de timp în care volumul este modificat. O posibilă soluție ar fi utilizarea unor electroventile proporționale, cunoscute și sub numele de *booster*-e, dar și această soluție implică costuri deosebit de ridicate, fiind utilizată numai în sisteme ultraperformante.

Cea de-a treia abordare a fost și cea mai adecvată pentru soluția ce urma a fi implementată. Această abordare încearcă să găsească un compromis între problemele anterioare, prin controlul presiunii aerului și a admisiei aerului în echipament, astfel putându-se obține o presiune cvasivariabilă, controlabilă între anumite limite, care să permită obținerea unor erori de poziționare unghiulară de până la $\pm 0,25^\circ$.

3.1.2. Necesitatea comenzii cu buclă de reacție

Echipamentele tradiționale de comandă pneumatică a direcției lucrează în regim *on / off*, adică admisia aerului este controlată în regim *totul sau nimic*. Acest mod de comandă, chiar implementat cu module electronice de comandă, care să urmărească continuu poziția curentă a mecanismului (fig. 5), implică o inerție mare, care se materializează într-o eroare de poziționare mare. În acest caz, sistemul poate chiar să oscileze, deoarece nu este capabil să se oprească în interiorul ferestrei de eroare cerute.

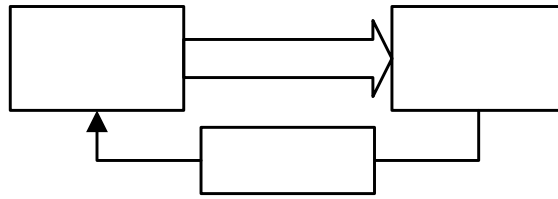


Fig. 5. Echipament pneumatic comandat de un sistem electronic

Pentru a opri mecanismul în apropierea poziției impuse, cu o eroare foarte mică, este necesară reducerea vitezei de deplasare în mod dinamic și aproape liniar, prin controlul presiunii aerului în circuitul pneumatic. Se obține astfel un efect similar cu cel al unei frânări mecanice până la poziția dorită. Fig. 6 evidențiază posibilitatea apariției instabilității, atunci când se utilizează o presiune mare în combinație cu o fereastră de eroare îngustă (precizie ridicată), $\pm e / 2$.

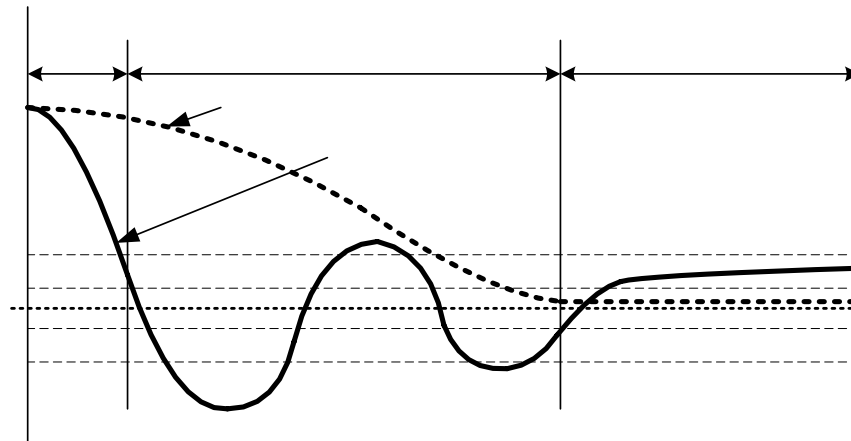


Fig. 6. Comportamentul sistemelor pneumatice în apropierea ferestrei de eroare tolerată

3.2. Identificarea parametrilor necesari comenzii unui transportor

Pentru realizarea unui ansamblu de circuite electronice de comandă, care să poată fi implementat într-un transportor real, este necesar să fie definite cu precizie:

- condițiile generale de funcționare (tensiune de alimentare etc.),
- semnalele de interfațare (analog / numeric / intrare / ieșire etc.),
- comenzile pe care sistemul poate să le interpreteze,
- funcțiile pe care sistemul trebuie să le îndeplinească,
- configurațiile de transportor și, respectiv, de comandă electronică,
- parametrii cu care trebuie să funcționeze ansamblul.

Principalele cerințe pentru un sistem electronic de comandă inteligentă a unui transportor au fost stabilite de echipa de cercetare împreună cu specialiștii firmei germane *Delu*, producător de echipamente de transport pe pernă de aer, în cadrul unei vizite de documentare la sediul din Nürnberg.

3.2.1. Condițiile generale

- alimentarea ansamblului de la tensiunea unică de +24 V,
- interfațarea cu semnale numerice de intrare și de ieșire de +24 V, în logică pozitivă,
- interfațarea cu semnale numerice de intrare de la circuite electronice de +5 V,
- interfațarea cu semnale analogice cu domeniul $0 \div 5$ V, $0 \div 10$ V, $0 \div 10$ mA,
- configurația de bază a transportorului: 2 roți (față și spate) motoare și de direcție.

3.2.2. Semnalele de interfațare

- intrări analogice:
 - maneta de comandă a vitezei (viteza înainte și înapoi),
 - maneta de comandă a direcției (unghiul de virare stânga și dreapta),
 - senzori de poziție a roților (2, 3 sau 4 direcție);

- intrări numerice:
 - sensul de deplasare (*înainte* sau *înapoi*),
 - direcția de virare (*stânga* sau *dreapta*),
 - moduri de virare (cu o roată, deplasare *laterală*, rotire în *cerc*),
 - gradul de încărcare cu sarcină,
 - senzori de presiune, de proximitate, de limită de deplasare etc.;
- ieșiri numerice:
 - comandă a motoarelor (propulsie, direcție) cu nivel constant,
 - comandă a motoarelor în impulsuri (PWM),
 - indicatoare optice și acustice;
- ieșiri analogice:
 - în condițiile în care se implementează un sistem de comunicații de date între modulele unui transportor, respectiv între transportoare diferite, s-a considerat că nu sunt necesare ieșiri analogice.

3.2.3. Comenzile

- propulsie la deplasarea *înainte* sau *înapoi* (manetă numerică sau proporțională)
 - se comandă doar roata din față, pe direcția de mers;
- direcție pentru viraj la *stânga* sau la *dreapta* (manetă numerică sau proporțională),
 - se rotește doar roata motoare;
- deplasare *laterală* (comutator și 2 manete de propulsie pentru cele 2 roți),
 - se rotesc ambele roți la 90°, apoi propulsia roților este independentă;
- deplasare în *cerc* (comutator și maneta de direcție),
 - se rotesc ambele roți, în față conform comenzii α , în spate cu $-\alpha$.

3.2.4. Funcțiile

- controlul vitezei de deplasare conform manetei de propulsie,
- condiționarea deplasării de existența presiunii în perne, de senzorii de limitare și protecție (lungimea furtunului cu aer, proximitate, sarcină etc.),
- calibrarea direcției pentru pozițiile de referință 0° și 90°,
- calculul automat al deviațiilor, conform manetei de direcție,
- reglajul automat al pozițiilor comandate,
- condiționarea comenzii direcției de starea de deplasare a transportorului.

3.2.5. Configurațiile

- transportorul poate fi construit într-o varietate de configurații:
 - cu 2 roți, față – spate, ambele cu propulsie și direcție,
 - cu 3 roți, cu cea din mijloc doar pentru deplasare laterală,
 - cu 3 roți cu comandă completă de direcție,
 - cu 4 roți în diverse variante etc.
- transportorul poate funcționa într-o varietate de configurații:
 - de sine stătător,
 - în tandem *master – slave*, cuplat față – spate,
 - în tandem *master – slave*, cuplat stânga – dreapta,
 - în cuplaje de 3, 4 transportoare etc.
- comanda electronică trebuie să se adapteze necesităților de automatizare:
 - transportor simplu, doar cu propulsie și direcție,
 - transportor complex, cu sistem de comandă, propulsie și direcție,
 - transportor ghidat automat etc.

3.2.6. Parametrii sistemului

- eroarea maximă de poziționare a transportorului prin propulsie: ± 1 mm,
- eroarea maximă unghiulară la direcția roților: $\pm 0,5^\circ$,
- funcționare adaptivă în funcție de suprafața de lucru, de sarcină etc.
- blocarea automată a transportorului în cazuri de alarmă (senzori) sau de absență a operatorului (contact de control).

Ținând cont de multitudinea de variabile ce caracterizează un ansamblu transportor, am convenit realizarea unei structuri **modulare** a blocului de comandă, astfel încât:

- aplicațiile simple să fie implementate cu un număr mic de module (1 - 2) de complexitate limitată – unul pentru propulsie, **mPWM**, respectiv unul pentru comanda direcției a 2 roți, **mLENK**, în timp ce
- aplicațiile complexe să beneficieze de un modul cu mare capacitate de comandă și control, **mCOMP**, ce poate fi utilizat, dacă este cazul, împreună cu modulele de complexitate mai redusă.

Structura modulară și arhitectura deschisă permit o optimizare a raportului performanțe / costuri pentru o mare varietate de transportoare.

3.3. Evaluarea mijloacelor hardware, software și de interfață

3.3.1. Arhitectura hardware necesară

În cadrul acestei arii largi de aplicații posibile, configurația sistemului dedicat (*embedded system*) trebuie optimizată pentru a putea controla multitudinea de funcții ale transportorului: numărul și domeniul intrărilor analogice și digitale, numărul și tipul ieșirilor digitale etc.

Utilizarea unui microcontroler pentru implementarea soluției este oportună având în vedere posibilitatea de a integra pe un singur chip mai multe module, precum procesor, memorie, convertoare A/N și N/A, numărătoare, comparatoare, module PWM etc. Schema bloc a unui astfel de sistem comandat de un microcontroler este prezentată în fig. 7.

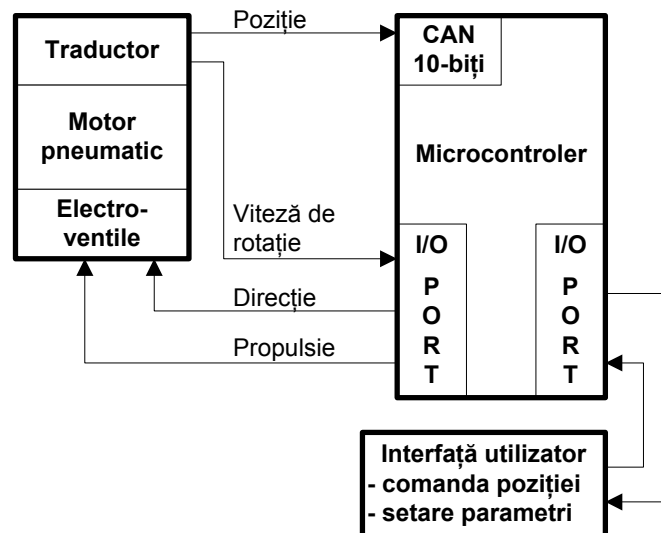


Fig. 7. Sistem electronic de comandă cu microcontroler

O caracteristică importantă este rezoluția convertorului analog-numeric. Controlul direcției implică folosirea unor unghiuri între $\pm 45^\circ$, iar pentru deplasarea *laterală* este necesar un unghi de 90° , rezultând o gamă totală de variație a unghiurilor de 135° ($-45^\circ \div 90^\circ$). Utilizând un CAN pe 10 biți, cu 1024 trepte de cuantizare, se poate obține o rezoluție de $0,13^\circ$, necesară pentru a limita erorile la $\pm 0,25^\circ$.

Familia de microcontrolere *Microchip* PIC16F87x îndeplinește aceste cerințe și, în plus, oferă câteva periferice suplimentare care permit implementarea comunicației seriale prin interfețele RS232, RS485 și I²C. Prin aceste interfețe sistemul poate comunica cu alte sisteme similare sau cu un terminal inteligent, PC.

Pentru realizarea modulelor microprogramate, *mLENK* și *mCOMP*, a fost ales microcontrolerul firmei *MicroChip* PIC16F873, cu o structură extrem de eficientă pentru aplicații industriale, cu memorie *flash* și cu parametri de viteză și capacitate de memorare medii. Datorită memoriei nevolatile și a blocurilor hardware interne, circuitul oferă o flexibilitate deosebită pentru un circuit cu doar 28 de pini.

Mediul de dezvoltare a aplicațiilor cu microcontrolerul PIC, pachetul software MPLAB, utilizabil gratuit, este un argument în plus în favoarea alegerii făcute.

Pentru interfațarea cu circuitele pneumatice, pe care ne-am propus să le comandăm în impulsuri modulate în durată, PWM, din considerente de precizie, au fost identificați electroventilele care răspund cel mai bine

acestui tip de comandă. În acest caz, producătorului transportorului îi revine sarcina de a utiliza electroventile proporționale, cu fiabilitate mare la comutații frecvente.

3.3.1.1. Semnalele analogice

Pentru algoritmul de ghidare, software-ul realizează o comparație continuă între:

- valoarea **țintă**, indicată de joystick (manual) sau de sistem (automat),
 - în comanda numerică, ținta este reprezentată de unghiul maxim aferent aplicației,
 - în modul proporțional, ținta este comanda actuală (ex. poziția joystick-ului),
- valoarea **actuală**, dată de un traductor, care măsoară faza de rotație a roții în plan orizontal.

Traductoarele și joystick-urile proporționale necesită interfețe analogice adecvate, urmate de un convertor analog-numeric. Dacă se consideră structura de bază a transportorului cu 2 roți, rezultă un număr de minimum 4 intrări analogice. Dacă se dorește setarea manuală a poziției în procedura de calibrare sau în prezența a mai mult de două roți sunt necesare canale analogice de intrare suplimentare.

Modulul de bază, *mLENK*, folosit în configurațiile simple, poate utiliza în mod direct cele 5 canale analogice existente, cu domeniul de 0 ÷ 5V (fig. 8). Fiecare canal de intrare este filtrat și trecut prin buffere cu ajutorul unor circuite externe, apoi este convertit în format numeric de către convertorul intern al microcontrolerului PIC 16F873.

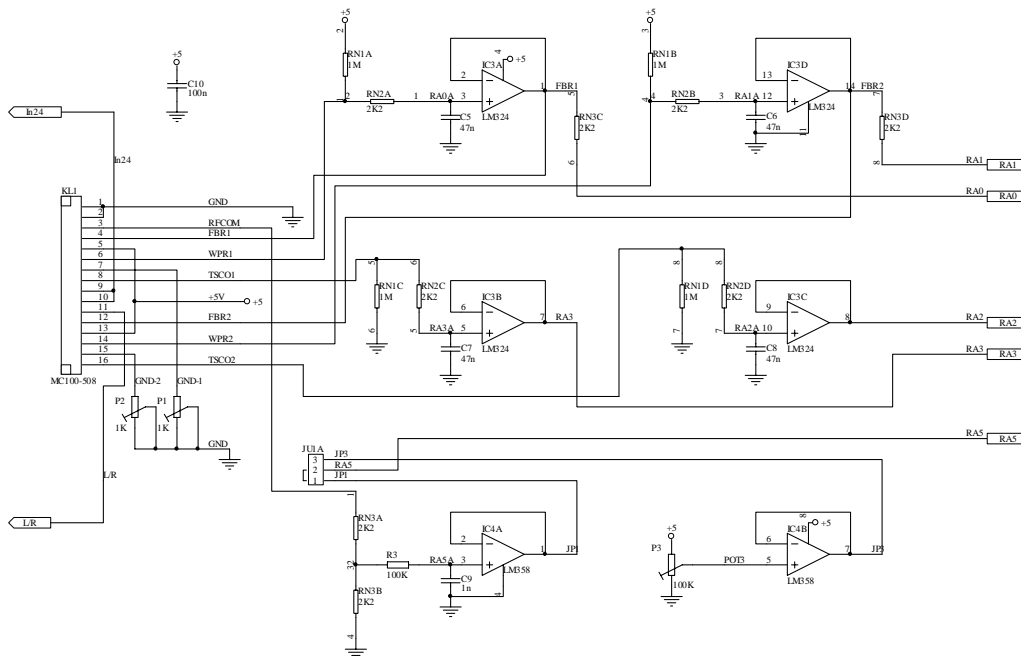


Fig. 8. Interfața analogică pentru *mLENK*

Modulul extins, *mCOMP*, folosit în configurațiile complexe, utilizează 4 canale de intrare dedicate operației principale de ghidare, în timp ce canalul 5 este format prin multiplexarea altor 6 semnale externe și a 2 semnale interne (fig. 9). Pentru 4 canale, domeniul de intrare, în curent sau tensiune, poate fi setat cu ajutorul a 8 jumperi (*K1* și *K2*).

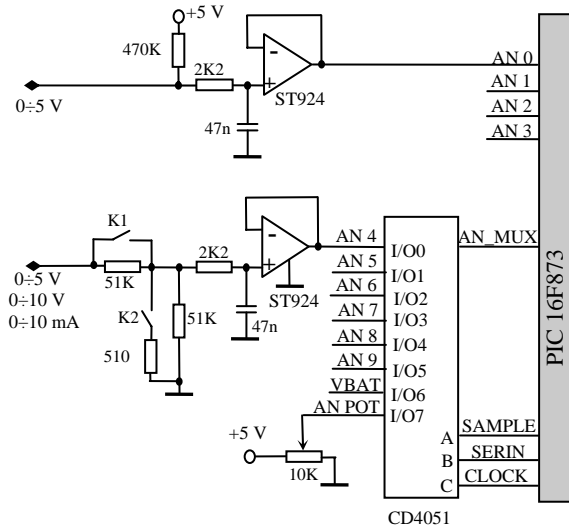


Fig. 9. Interfața analogică pentru *mCOMP*

3.3.1.2. Semnalele de comandă

În mediul industrial, semnalele digitale folosite au amplitudine mai mare. Pentru a adapta nivelurile de tensiune de la intrările digitale, de până la 24 V, la tensiunea de alimentare a sistemului, de 5 V, sunt folosite opto-cuploare. Ledurile de pe fiecare linie de intrare, sunt folosite pentru test și depanare.

Intrările digitale principale sunt aferente celor 6 semnale definite în fig. 3: *înainte* și *înapoi*, pentru propulsie, și *stânga*, *dreapta*, *cerc* și *lateral*, pentru direcția de deplasare a transportorului. Așa că, modulul de bază, dezvoltat pentru configurațiile simple de transportor, este proiectat, acoperitor, cu 8 canale de intrare digitale, folosind 8 pini dedicați ai microcontrolerului.

În configurațiile complexe de transportoare, sunt folosite multe alte semnale, prelucrate sau vizualizate: presiune și senzori de auto-ghidare, comutatoare de limitare și de protecție etc. Acesta este motivul pentru care modulul extins este proiectat cu o capacitate de 32 de intrări digitale, *DI 1 ÷ DI 32* cu adaptoare de nivel de tensiune corespunzătoare. Semnalele furnizate de partea electronică de recepție a sistemului de comandă sunt de 5 V. Pentru această interfață, fără opto-cuploare, sunt alocate 24 de intrări digitale.

Este evident că nici un procesor nu poate manipula direct toate canalele. Pentru achiziția serială a mai multor semnale numerice a fost propusă metoda prezentată în fig. 10, care parcurge următoarele etape:

- achiziția paralelă într-un registru de deplasare, comandată cu semnalul *SAMPLE*,
- deplasarea serială a intrărilor eșantionate, sincronizată cu semnalul de tact *CLOCK*,
- încărcarea într-un registru intern, printr-un singur pin al microcontrolerului, *DATA IN*.

Soluția utilizează exclusiv *latch*-uri ca hardware extern și două semnale de control, *SAMPLE* și *CLOCK*, generate prin software. La fiecare impuls de tact, un bit de la intrarea *DATA IN*, corespunzător unui canal de intrare, este citit de microcontroler începând cu *IN1*.

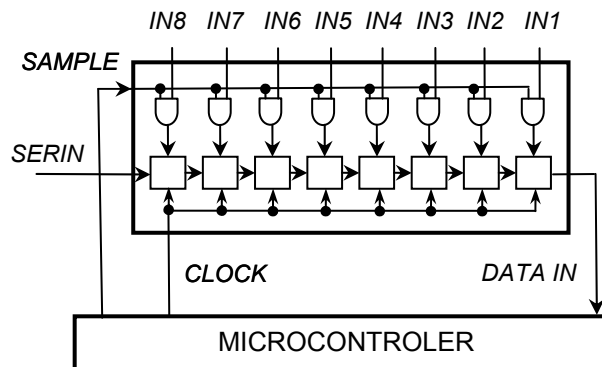


Fig. 10. Metoda de achiziție a semnalelor numerice

Chiar folosind versiunea de 4 MHz a microcontrolerului, frecvența de eșantionare rezultă suficient de mare, pentru orice semnal corespunzător aplicației. Achiziția a 32 de canale, realizată prin cascada a 4 registre de 8 biți, este reprezentată în fig. 11.

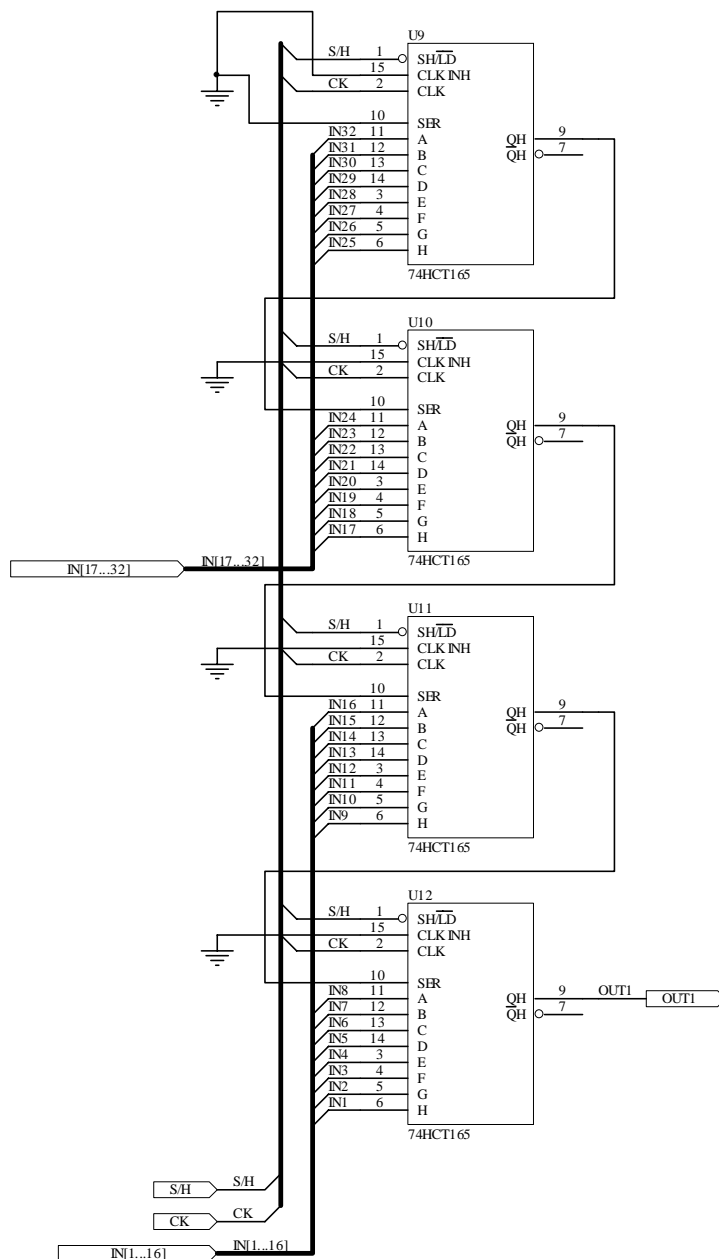


Fig. 11. Achiziția semnalelor numerice de intrare

3.3.1.3. Semnalele de ieșire

Ieșirile digitale trebuie să fie semnale de putere, pentru comanda motoarelor pneumatice prin electroventile, astfel că este necesară utilizarea unor circuite integrate de putere, de 24 V. Structura minimală implică 4 semnale: dirijarea spre *stânga* și *dreapta* a roții din față și asemănător pentru roata din spate.

Din cauza preciziei necesare, este obligatorie frânarea înainte opririi. Pentru ieșirea digitală, acest lucru este posibil prin folosirea semnalelor PWM, astfel că modulul de bază are 4 ieșiri digitale PWM.

Pentru că ieșirea PWM comandă sisteme mecanice, semnalul de comandă are perioade lungi. Electroventile funcționează numai cu impulsuri mai lungi de 10 ms. Fig. 12 arată o frânare controlată de o ieșire PWM.

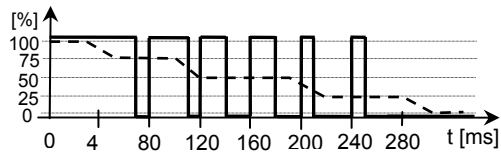


Fig. 12. Comanda PWM a motoarelor pneumatice

În aplicațiile complexe, se utilizează un număr mare de ieșiri digitale pentru validarea comutatoarelor în funcție de condițiile de protecție, pentru comanda dispozitivele de semnalizare, pentru generarea de alarme sonore etc.

Soluția propusă pentru generarea semnalelor de ieșire digitale, utilizează, ca hardware extern, două niveluri de *latch*-uri și semnale de control, *STROBE* și *CLOCK*, generate prin software. Metoda, prezentată în fig. 13, presupune parcurgerea următoarelor etape:

- primul nivel de *latch*-uri este încărcat serial prin pinul *DATA OUT*,
- deplasarea serială a eșantioanelor semnalelor generate este sincronizată cu semnalul de tact *CLOCK*,
- al doilea nivel de *latch*-uri este încărcat paralel, operație comandată cu semnalul *STROBE*.

La fiecare impuls de tact, un bit de la ieșirea *DATA OUT*, corespunzător unui canal de ieșire digital, este transmis de către microcontroler, începând cu O8.

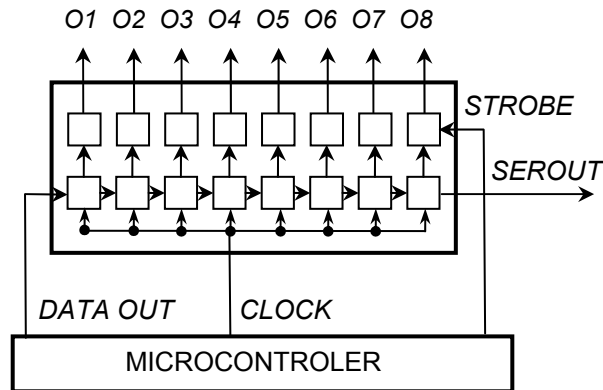


Fig. 13. Metoda de generare a semnalelor numerice

Conform metodei, modulul extins este proiectat cu 16 ieșiri digitale, utilizând 2 registre de 8 biți încărcate serial prin semnalele *SDI* și *SDO*, conectate conform fig. 14.

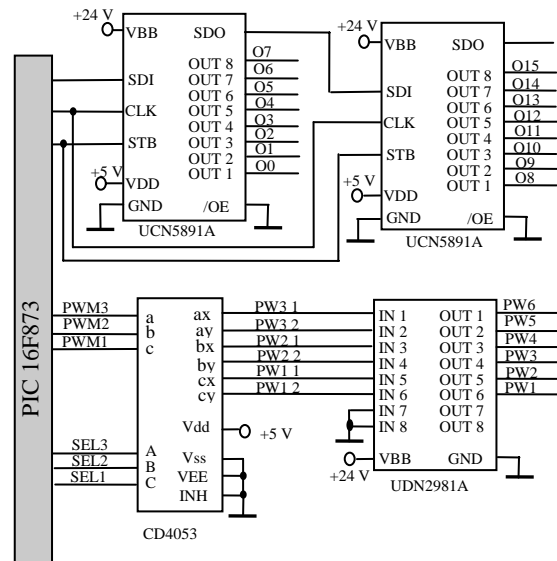


Fig. 14. Driverile de ieșiri digitale și PWM

Suplimentar, microcontrolerul generează 3 semnale PWM, demultiplexate în 6 ieșiri de putere, care conduc fie 3 roți, fie 2 roți și motorul de propulsie. Acest lucru este posibil deoarece doar o ieșire din 2 este activă la un moment dat: *stânga* sau *dreapta*, *înainte* sau *înapoi*. Se remarcă faptul că propulsia, controlată manual sau de către sistem, nu prezintă reacție, astfel că nu este necesar un semnal analogic de intrare.

3.3.2. Algoritm de comandă a direcției

Deoarece nu există senzori de presiune care să permită monitorizarea acestui parametru de către sistemul electronic, singurul mod de a obține informații despre starea echipamentului pneumatico-mecanic, este prin utilizarea unor traductoare de poziție unghiulară. Aceste traductoare oferă informații despre poziția mecanică a echipamentului acționat pneumatic, prin intermediul unor semnale electrice. Aceste informații sunt prelucrate de un sistem electronic inteligent, care calculează distanța între poziția actuală și poziția țintă, determinând momentul și poziția în care se va realiza o frânare adecvată, astfel încât mișcarea dispozitivului să înceteze atunci când se atinge poziția indicată. Sistemul electronic va modifica presiunea aerului în circuitul pneumatic în concordanță cu valorile calculate.

Soluția pentru implementarea acestei metode este comandarea electroventilelor care controlează admisia aerului în circuitul pneumatic cu impulsuri electrice de durată variabilă, după cum se arată în fig. 15.

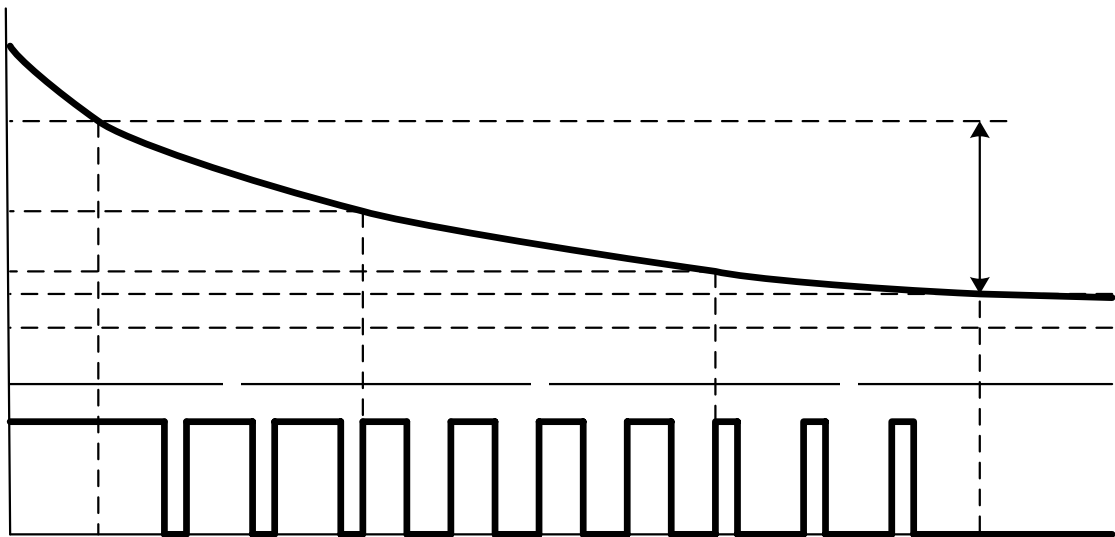


Fig. 15. Comanda PWM a electroventilelor

Algoritm de control inteligent este implementat în două etape:

- în prima etapă se calculează distanța unghiulară dintre poziția curentă și poziția țintă și se decide dacă această distanță este mare sau mică; dacă distanța este mare, admisia aerului este comandată continuu, până când, luând în calcul viteza de rotație și unghiul rămas de parcurs, se ia decizia de frânare;
- în a doua etapă, se consideră că distanța până la poziția țintă este mică și începe procesul de frânare prin comanda impulsuri (PWM) a admisiei aerului.

Când distanța unghiulară până la poziția țintă este mică încă de la început (cazul unor deviații foarte mici) se trece direct la comanda PWM a admisiei. Primele impulsuri vor avea o lățime mai mare pentru a asigura presiunea necesară punerii în mișcare a mecanismului. Apoi, după ce mecanismul începe să se miște, lățimea impulsurilor va scădea odată cu apropierea de poziția țintă.

Prin utilizarea impulsurilor de lățime variabilă, este ținută sub control admisia aerului în echipamentul pneumatic, reducerea lățimii impulsurilor determinând reducerea vitezei de rotație. Această metodă asigură o bună flexibilitate, deoarece, în cazul în care s-ar dori modificări ulterioare, acestea ar afecta doar partea electronică, în special software-ul, care permite modificarea parametrilor necesari unui control eficient, precum și a unor valori care depind de modurile de operare.

p2

p3

+e/2

Această soluție oferă un bun compromis între precizia de poziționare și costurile echipamentului, părțile mecanică și pneumatică rămânând neschimbate, singura modificare fiind adăugarea modului electronic de comandă dezvoltat.

3.4. Proiectarea hardware și software a blocurilor electronice

Conform cerințelor de proiectare și a concepției modulare, au fost dezvoltate soluțiile tehnice și au fost proiectate blocurile electronice în următoarele configurații.

3.4.1. Modulul *mPWM*

Modulul, cu reglaje electronice și fără elemente programabile, este destinat propulsiei roților unui transportor. Comanda este cu impulsuri modulate în durată, conform comenzii proporționale de la o manetă de comandă:

- 2 intrări analogice, 0 ÷ 10 V (*înainte, înapoi*),
- 2 ieșiri PWM, de 24 V (*înainte, înapoi*).

Modulul poate fi utilizat independent sau, dacă este cazul, alături de modulul de bază, *mLENK*, sau de modulul complex, *mCOMP*. Este de observat că funcția modulului hardware *mPWM* poate fi implementată și software, chiar în modulul *mCOMP*, în anumite configurații.

3.4.2. Modulul *mLENK*

Modulul este destinat comenzii direcției pentru 2 roți ale transportorului și este proiectat hardware și software pe baza microcontrolerului PIC16F873.

Comanda de la maneta de direcție poate fi numerică sau proporțională, reglajul automat al poziției roții se bazează pe traductorul de poziție al roții, iar semnalele de ieșire, cu modulația impulsurilor în durată, acționează motoarele *stânga – dreapta* ale fiecărei roți:

- 5 intrări analogice, 0 ÷ 5 V (2 de la manetă, 2 de la senzorii de poziție, 1 pentru reglajul manual de calibrare inițială la 0° și la 90°),
- 8 intrări numerice de 24 V (comenzi *față, spate, stânga, dreapta* și moduri de lucru *cerc* sau *lateral*),
- 4 ieșiri PWM de 24 V (*stânga față, dreapta față, stânga spate, dreapta spate*).

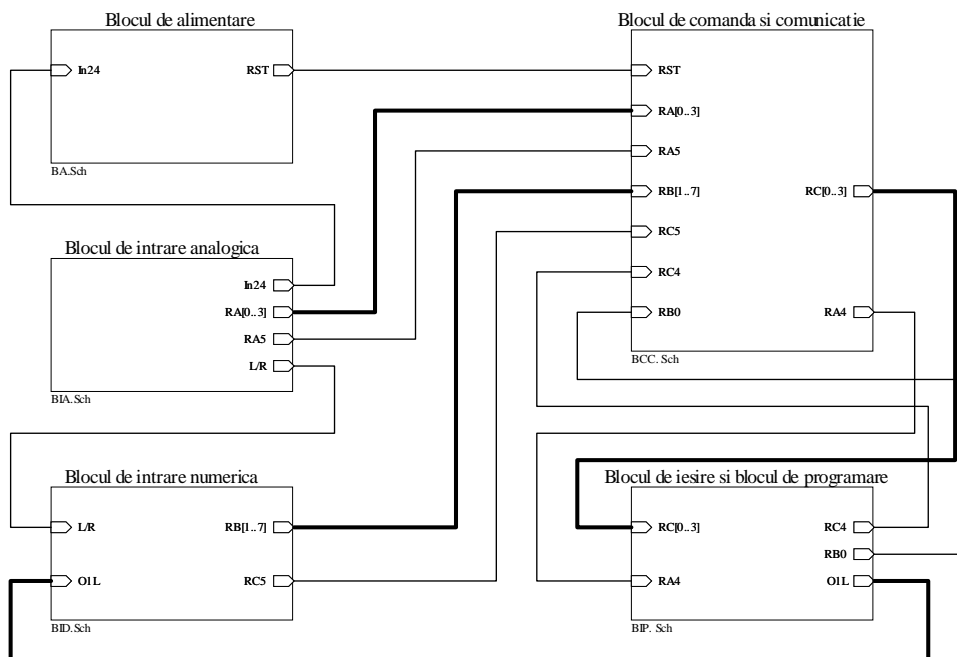


Fig. 16. Schema bloc a modului de direcție

Circuitul este proiectat, conform schemei bloc a modului de direcție din fig. 16, în 5 scheme electronice de detaliu:

- blocul de comandă și comunicație (unitatea centrală și sistemul de intercomunicație cu alte module cu microcontroler),
- blocul de intrare analogică (amplificarea și multiplexarea semnalelor),
- blocul de intrare numerică (adaptarea de nivel de la 24 V la 5 V prin opto-cuploare),
- blocul de ieșire și blocul de programare (ieșirea de putere la 24 V și programarea parametrilor),
- blocul de alimentare (sursa de 5 V a sistemului).

Pachetul software conține mai multe secțiuni:

- procedura de calibrare și calculul automat al unghiurilor de viraj;
- interpretarea parametrilor programabili manual în blocul de programare hardware:
 - precizia, pentru evitarea oscilației,
 - tipul de frânare a rotației roții, pentru oprire fermă la valoarea dată,
 - durata frânării, în funcție de frecare;
- algoritmul de reglaj automat a poziției, în funcție de valoarea măsurată în timp real;
- gestionarea modurilor de lucru:
 - *înainte* (direcția doar pe roata 1),
 - *înapoi* (direcția doar pe roata 2),
 - *lateral* (ambele roți la 90°),
 - *cerc* (roțile comandate în opoziție);
- algoritmul de generare a semnalului PWM, cu factor de umplere variabil, în funcție de tipul și durata frânării;
- procedură de autotest.

Modulul poate fi utilizat independent pe transportoarele cu 2 roți. Pentru transportoare cu 3 sau 4 roți pot fi utilizate 2 module *mLENK* în paralel. În cazul utilizării modulului complex *mCOMP* pentru un transportor cu 2 roți, modulul *mLENK* nu este necesar. În aplicații complexe, modulele *mLENK* și *mCOMP* pot fi utilizate împreună, intercomunicația fiind realizată numeric serial.

3.4.3. Modulul *mCOMP*

Modulul este conceput a realiza toate funcțiile unui transportor inteligent, de complexitate medie. El este proiectat hardware și software pe baza microcontrolerului PIC16F873. Modulul dispune, în acest scop, de:

- 10 intrări analogice, 0 ÷ 5 V, 0 ÷ 10 V sau 0 ÷ 10 mA, selectabil,
- 32 de intrări numerice de 24 V, izolate optic,
- 24 de intrări numerice de 5 V,
- 16 ieșiri de putere de 24 V,
- 6 ieșiri PWM de putere, de 24 V.

Circuitul este proiectat, conform schemei bloc a modulului de comandă din fig. 17, în 12 scheme electronice de detaliu:

- microcontrolerul (unitatea centrală),
- interfața analogică (selectabilă pentru diferite semnale de intrare),
- blocul de achiziție analogică (multiplexarea semnalelor),
- interfața de intrare numerică 1 (16 canale cu optocuploare și vizualizare pe LED-uri),
- interfața de intrare numerică 2 (16 canale cu optocuploare),
- interfața de intrare numerică de 5 V (24 de canale de la circuite electronice),
- achiziția numerică (a celor 32 + 24 canale),
- ieșirea numerică de putere (16 canale la 24 V),
- ieșirea PWM de putere (6 canale la 24 V),
- interfața de comunicație (RS232 și RS485),
- blocul de alimentare (sursa de 5 V a sistemului),
- conectoarele exterioare.

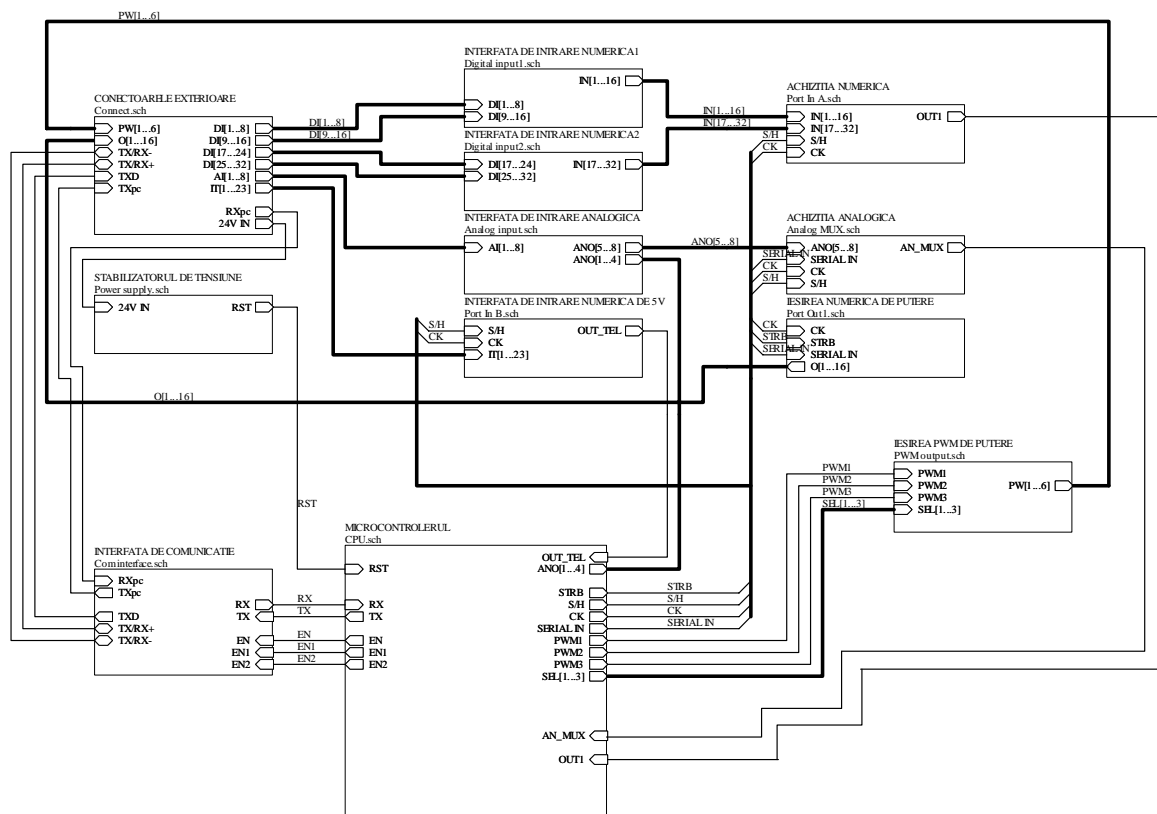


Fig. 17. Schema bloc a modului de comandă

Majoritatea semnalelor pot fi alocate liber, în funcție de aplicație. Pentru cele bine precizate, au fost dezvoltate și subrutinele software. **Pachetul software** conține mai multe secțiuni:

- toate funcțiile modului *mLENK*, pentru 2 roți (4 ieșiri PWM); celelalte 2 ieșiri PWM pot fi folosite, în funcție de necesități pentru
 - comanda direcției unei a treia roți sau pentru
 - realizarea propulsiei (în locul modului *mPWM*);
- achiziția celor 32 + 24 semnale de intrare și comanda celor 16 semnale de ieșire,
- condiționarea funcționării sistemului de senzori și întrerupătoare de protecție,
- realizarea comunicației seriale cu un modul *mLENK* suplimentar (dacă este necesar la un transportor cu mai mult de 3 roți) pe interfața RS232,
- comanda unui bloc de afișare alfanumeric (pentru mesaje adresate operatorului) pe interfața RS232,
- realizarea programării *on-line*, de la un calculator PC, pe interfața RS232,
- procedură de autotest.

După cum s-a detaliat mai sus, modulul poate fi utilizat singur, pe transportoarele cu 2 roți (propulsie și direcție), sau cu module suplimentare *mLENK* și *mPWM*, pe transportoarele cu 3 sau 4 roți.

3.4.4. Principiile urmărite în proiectarea software

În implementarea software este necesară optimizarea următorilor doi parametri:

- durata minimă a impulsului de comandă care poate determina deschiderea electroventilului, denumită și timp minim de răspuns, și
- frecvența maximă la care electroventilul poate funcționa, atunci când se utilizează o frecvență fixă a semnalului de control PWM.

Frecvențele uzuale de lucru ale electroventilelor sunt, conform specificațiilor producătorilor, limitate la 33 Hz. Timpul minim de răspuns a fost determinat experimental ca fiind de aproximativ 12 ms.

Aceste limitări sunt determinate, în principal, de componentele mecanice aflate în mișcare, care au nevoie de un interval de timp destul de mare pentru a se pune în mișcare, respectiv pentru a se opri. Astfel, pentru a realiza o comandă eficientă a electroventilelor, durata minimă a impulsurilor a fost setată la 15 ms, iar frecvența de lucru la 25 Hz (perioada de 40 ms). De asemenea, testele practice au pus în evidență faptul că este necesară modificarea duratei impulsurilor cu cel puțin 5 ms pentru a produce un efect sesizabil asupra vitezei de mișcare.

Pornind de la premisele anterioare, a fost implementat un algoritm inteligent pentru comanda electroventilelor de admisie. Reacția se bazează pe semnalul obținut de la traductorul de poziție, situat pe mecanismul rotativ. Semnalul de la ieșirea de comandă are o frecvență de 25 Hz, cu o lățime a impulsurilor ajustabilă în trepte de 5 ms, în concordanță cu viteza de deplasare și distanța unghiulară până la poziția indicată. Prin reducerea lățimii impulsurilor, pe măsură ce mecanismul se apropie de poziția țintă, se reduce viteza de rotație, astfel încât mecanismul poate fi oprit în interiorul ferestrei de eroare cerute de $\pm 0,25^\circ$. Obiectivul principal al frânării este reducerea inerției mecanice în momentul în care admisia aerului este oprită.

Execuția în timp real pe microcontroler a implementării software a algoritmului PWM nu este o problemă, deoarece toate semnalele folosite variază lent în timp. Pornind de la cele expuse mai sus, a fost ales un tact al sistemului cu o perioadă de 5 ms (fig. 18), timp suficient pentru ca microcontrolerul să poată efectua toate calculele cerute de algoritm pentru maximum 3 bucle de control, precum și alte calcule necesare prelucrării unor informații externe suplimentare.

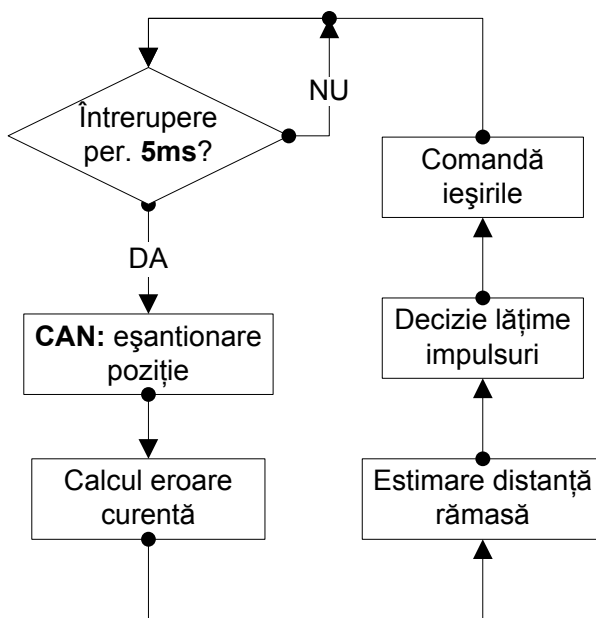


Fig. 18. Algoritm PWM

Utilizarea tactului cu perioada de 5 ms rezolvă și problema modificării cu precizie a treptelor lățimii impulsurilor de la ieșirea de comandă. Astfel, prin implementarea unui numărător, care numără 8 intervale de timp a câte 5 ms, se poate obține un semnal de comandă cu perioada de 40 ms (25 Hz). Trebuie avut în vedere faptul că durata minimă a impulsurilor pentru ca semnalul de comandă să fie activ este de 15 ms (3 intervale temporale de 5 ms), iar dacă se decide că este necesară o durată a impulsurilor mai mare, semnalul de comandă va fi făcut activ în mai multe intervale temporale. În cazul în care decizia luată este de comandă directă, toate cele 8 intervale temporale din perioada semnalului de comandă vor fi făcute active. Informațiile asigurate de traductorul de poziție sunt eșantionate periodic, la fiecare 5 ms, iar, dacă se constată că mecanismul a ajuns în poziția indicată, semnalul de comandă este dezactivat indiferent dacă ciclul PWM a fost încheiat sau nu.

Algoritm este orientat pe principiul minimizării erorii dintre poziția de referință și poziția curentă a mecanismului (cea indicată de traductor). Lățimea impulsurilor de comandă se modifică pe măsură ce mecanismul se apropie de poziția de referință. Modificarea lățimii impulsurilor se face în funcție de câțiva parametri care pot fi setați de către utilizator:

- curba de frânare,
- durata frânării,
- fereastra de eroare admisă.

În cazul ferestrelor de eroare de lățimi mari, mișcarea este stabilă, dar eroarea de poziționare poate fi și ea foarte mare. În cazul ferestrelor de eroare înguste, dacă sistemul de frânare nu este suficient de precis, pot apărea oscilații, fenomen ce poate deveni foarte periculos în cazul transportului unor sarcini mari, de ordinul tonelor. Parametrii folosiți trebuie aleși cu grijă, dintr-o gamă largă de posibilități, pentru a obține performanțe optime.

La alegerea setului de parametri trebuie să fie avuți în vedere factorii externi care influențează parametrii de lucru ai echipamentului pneumatic. Pot fi alese diverse moduri de lucru, de la frânarea abruptă într-o fereastră îngustă de timp, cu doar 2 valori posibile pentru lățimea impulsurilor, până la frânarea lentă cu 5 trepte pentru lățimea impulsurilor, rezultând în acest caz un timp mai îndelungat de frânare, după cum se arată în fig. 19.

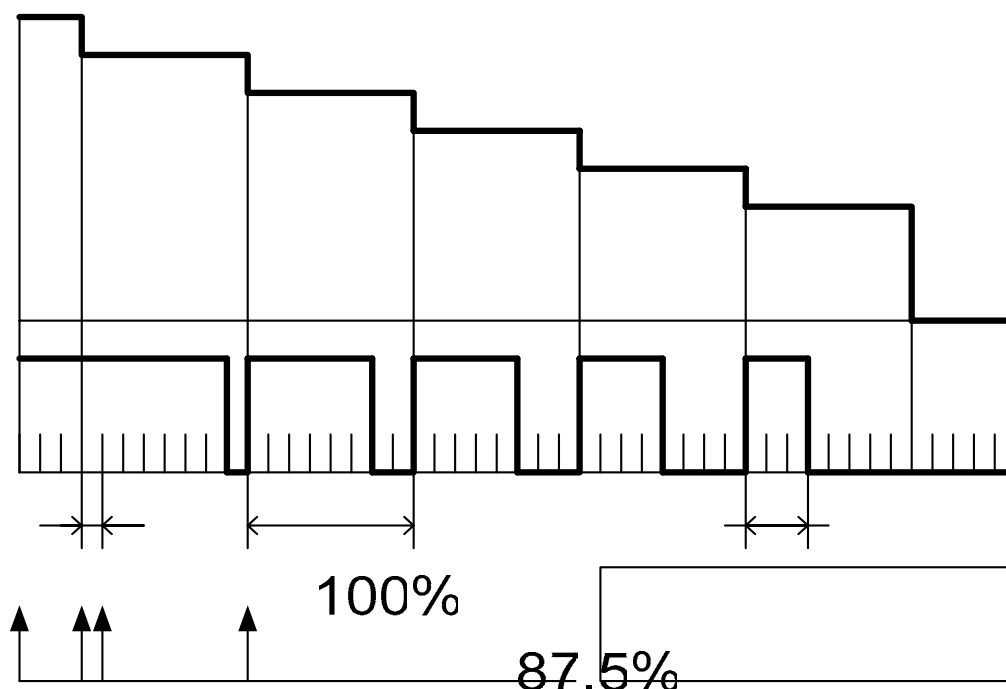


Fig. 19. Lățimile impulsurilor în cazul unei frânări în 5 pași

Aceste moduri de lucru sunt specifice cazurilor în care sistemul în mișcare întâmpină diverse grade de rezistență în încercarea de a atinge poziția indicată. Dacă la un moment dat se detectează că viteza de mișcare este prea redusă, înainte ca mecanismul să se fi apropiat suficient de poziția țintă, algoritmul va decide creșterea lățimii impulsurilor semnalului de comandă. Astfel presiunea generală în echipamentul pneumatic crește, determinând o mărire a vitezei mecanismului de poziționare. În acest mod se evită posibilitatea de blocare a mecanismului datorită presiunii insuficiente.

3.4.5. Proiectarea software

Software-ul, creat în asamblor, este proiectat să funcționeze în oricare dintre modurile de comandă prezentate:

- digital, cu joystick digital în mod manual,
- proporțional (tensiune analogică), cu joystick analogic în mod manual,
- comandă a sistemului (valoarea digitală corespunzând tensiunii analogice), în aplicații de auto-ghidare.

Organigrama programului principal este prezentată în fig. 20. În modulul *de bază*, *mLENK*, toți parametrii programabili sunt încărcăți în mod direct, prin intermediul unui conector cu 8 comutatoare, prin rularea procedurii software adecvată, fără deconectarea din sistem. În modulul extins, *mCOMP*, se utilizează o interfață serială pentru încărcarea programului sau a datelor de la un PC, fără deconectarea modulului din sistem.

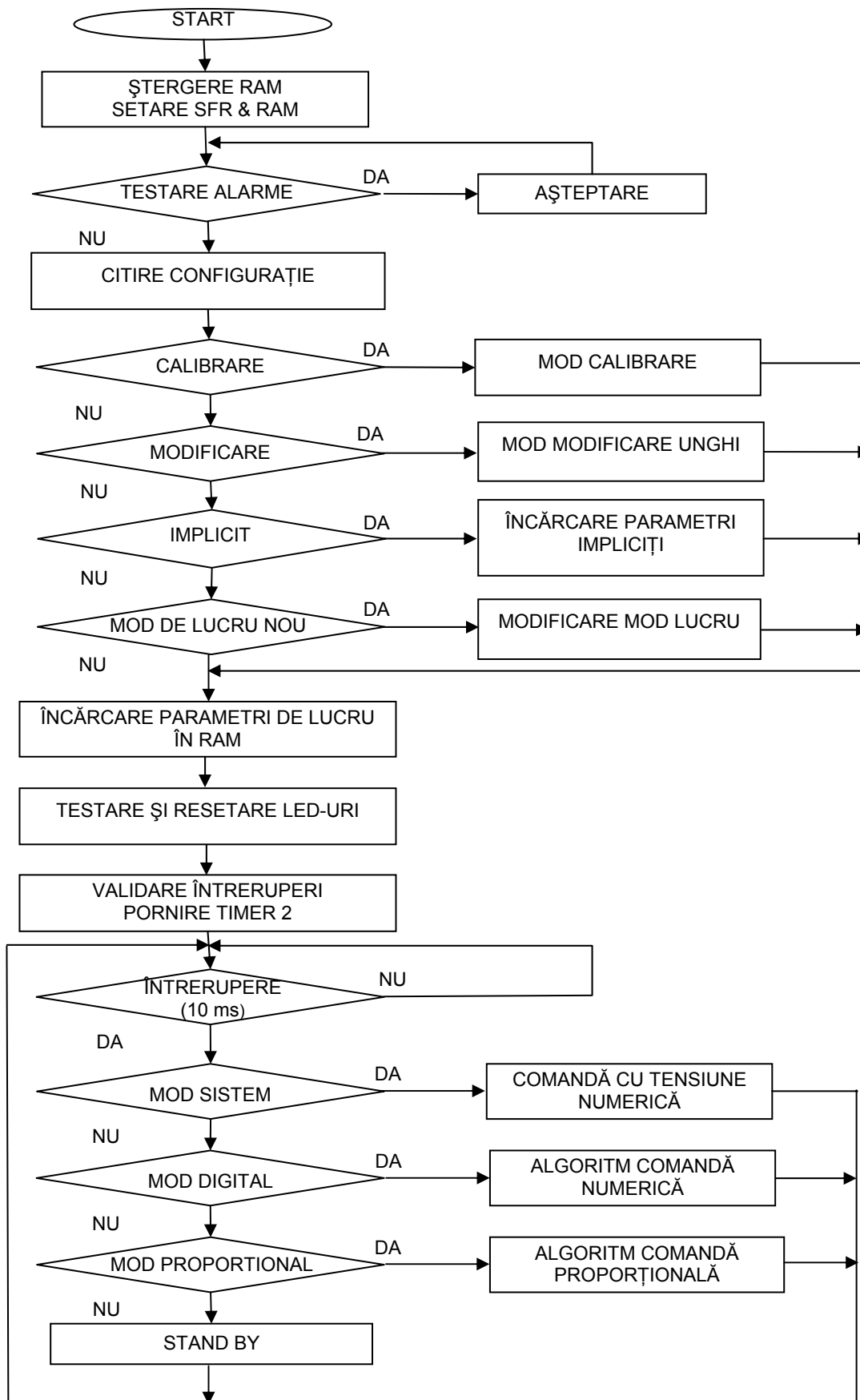


Fig. 20. Programul principal de control al direcției

3.4.5.1. Procedura de calibrare

Controlul direcției este realizat prin compararea continuă dintre poziția actuală a roții și poziția dorită. Poziția actuală a roții este măsurată cu un senzor de deviație, care furnizează o tensiune proporțională nu numai cu deviația, ci care depinde și de parametrii mecanici caracteristici fiecărui transportor: dimensiuni, viteză etc. Astfel, dacă parametrii mecanici sunt diferiți, senzorul de deviație va furniza valori diferite de tensiune pentru același unghi. Poziția dorită depinde de modul de comandă utilizat.

În vederea asigurării unei concordanțe între sistemul electronic de comandă și parametrii mecanici variabili, este necesară o procedură de calibrare:

- calibrare 0° – roata este poziționată pentru deplasarea drept înainte, controlată de sistem prin ajustări manuale (potențiometru conectat la una din intrările analogice ale modului), cu memorarea valorii actuale,
- calibrare 90° – cu pași similari,
- calculul automat al valorii digitale pentru 1° și a valorilor pentru orice alt unghi de deviație.

Astfel, tensiunile analogice sunt adaptate comenzii direcției, pentru orice transportor, fără a fi necesară o reproiectare.

Apoi, trebuie încărcăți parametrii unui anume tip de transportor. Modulul de bază, *mLENK*, folosește drept parametrii programabili:

- forma frânării, controlată PWM, care asigură un echilibru între forță și precizie (forța mare, necesară la pornire, nu asigură oprirea cu precizie);
- durata frânării, care asigură un echilibru între timpul de răspuns și precizie;
- dimensiunea ferestrei de eroare, care optimizează stabilitatea: mișcare *înainte* precisă, fără oscilații (prin mici corecții *dreapta - stânga*).

Condițiile rămân aceleași pentru fiecare transportor, astfel că pot fi aleși parametrii corespunzători pentru operarea completă a transportorului.

Pentru modulul complex, *mCOMP*, a fost adoptat un algoritm PID adaptiv, dar și în acest caz, la instalarea sistemului, parametrii P, I și D trebuie aleși după măsurări și teste inițiale, în vederea minimizării erorii de poziționare, pentru forță și viteză rezonabile.

3.4.5.2. Principiul controlului direcției

În funcție de aplicație și de modul de comandă, trebuie fixat unghiul de deviație (în cazul comenzii numerice) și, de asemenea, este încărcată o limită pentru deviație, în vederea evitării accidentelor. Pentru modulul de bază, *mLENK*, a fost proiectată o setare manuală, cu 7 valori aferente comenzii numerice: 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°. Pentru modulul complex, *mCOMP*, valoarea unghiului este selectabilă cu o rezoluție de 1° și, apoi, este transferată serial de la un PC. Fig. 21 prezintă modul de implementare a controlului direcției, în varianta cu comandă numerică.

În ambele cazuri, această procedură nu este necesară în modul de comandă proporțional. În cazul funcției *cerc*, parametrii sunt aceiași, în timp ce la funcția *lateral* unghiul implicit este de 90°.

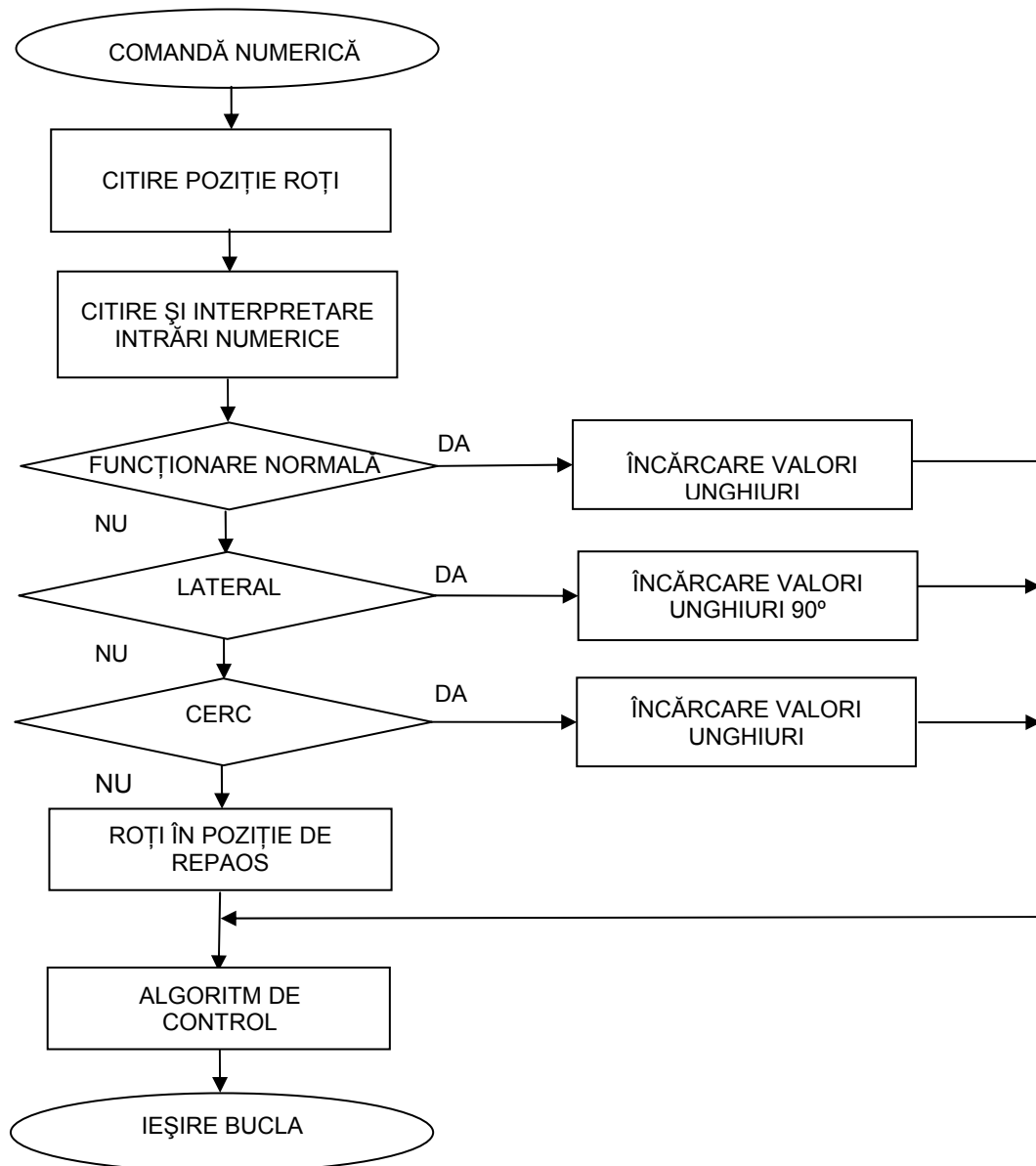


Fig. 21. Controlul direcției în cazul utilizării comenzii numerice

4. REALIZAREA ȘI TESTAREA MODELELOR EXPERIMENTALE

Pentru implementarea funcțiilor necesare comenzii unui transportor pe pernă de aer, au fost realizate modelele experimentale pentru blocurile de propulsie, *mPWM*, de direcție, *mLENK*, respectiv, de control, *mCOMP*, apoi a fost realizată integrarea hardware – software a sistemelor embedded de bază, *mLENK*, și complex, *mCOMP*.

4.1. Proiectarea de ansamblu și a cablajelor imprimate

Sistemul electronic de comandă a sistemului de transport pe pernă de aer a fost organizat în 3 module cu funcții bine individualizate:

- modulul de comandă PWM a propulsiei pneumatice,
- modulul de comandă a direcției pneumatice,
- modulul de control a condițiilor de siguranță și de validare a comenzilor la punerea în mișcare a transportorului.

Pentru testarea modelelor experimentale ale acestor module a fost realizată structura hardware necesară, prin realizarea proiectelor de execuție pentru:

- ansamblul fiecărui modul,
- cablajul imprimat, dublu strat, pentru fiecare circuit.

4.1.1. Modulul de comandă PWM a propulsiei, *mPWM*

Modulul, realizat cu elemente de reglaj, dar fără elemente programabile, este destinat propulsiei roților unui transportor, utilizând impulsuri modulate în durată (PWM), cu frecvența scăzută (25 Hz), pentru a putea comanda electroventilele utilizate în sistemele pneumatice. Desenul de ansamblu este prezentat în fig. 22.

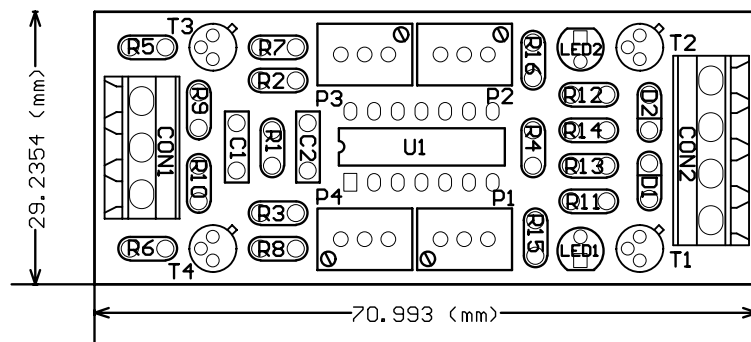


Fig. 22. Modulul de comandă a propulsiei - ansamblu

În funcție de complexitatea aplicației, pot fi avute în vedere următoarele variante funcționale:

- circuitul *mPWM* este utilizat **independent**, sub acțiunea unei manete de comandă acționate de utilizator, fără necesitatea unor programări și fără necesitatea interconectării cu alte module; soluția corespunde configurațiilor minimale, comandate direct (manual);
- circuitul *mPWM* este utilizat **alături** de modulul complex de control, *mCOMP*, situație în care comanda este controlată și validată de multitudinea de condiții de protecție și de funcționare cu care este programat respectivul bloc (poziția roții, atingerea unui obstacol, întinderea excesivă a furtunului de aer comprimat etc.); soluția corespunde configurațiilor complexe, specifice comenzii inteligente a transportorului, cu ajutorul unui bloc electronic microprogramat;
- circuitul *mPWM* **poate lipsi** în condițiile în care funcția modulului hardware de propulsie este implementat **software** chiar în modulul de control, evitându-se astfel interconexiunile de control între cele două module; soluția este utilizabilă în configurațiile complexe, cu comandă inteligentă, în condițiile în care modulul de control nu este solicitat la maximum (hardware – număr de conexiuni și software – timp de execuție și capacitate de memorie) de funcțiile specifice, putând prelua funcții suplimentare.

4.1.2. Modulul de comandă a direcției, *mLENK*

Modulul, realizat cu microcontrolerul PIC16F873, este destinat comenzii direcției pentru 2 roți ale transportorului (față și spate). Cele 4 ieșiri de comandă acționează motoarele pneumatice *stânga – dreapta* ale fiecărei roți, furnizând impulsuri PWM generate software, cu parametrii programabili. Pentru comanda de direcție (manuală sau automată), reglajul automat se realizează prin utilizarea unor traductoare de poziție unghiulară a roților, citite continuu de circuit. Desenul de ansamblu este prezentat în fig. 23.

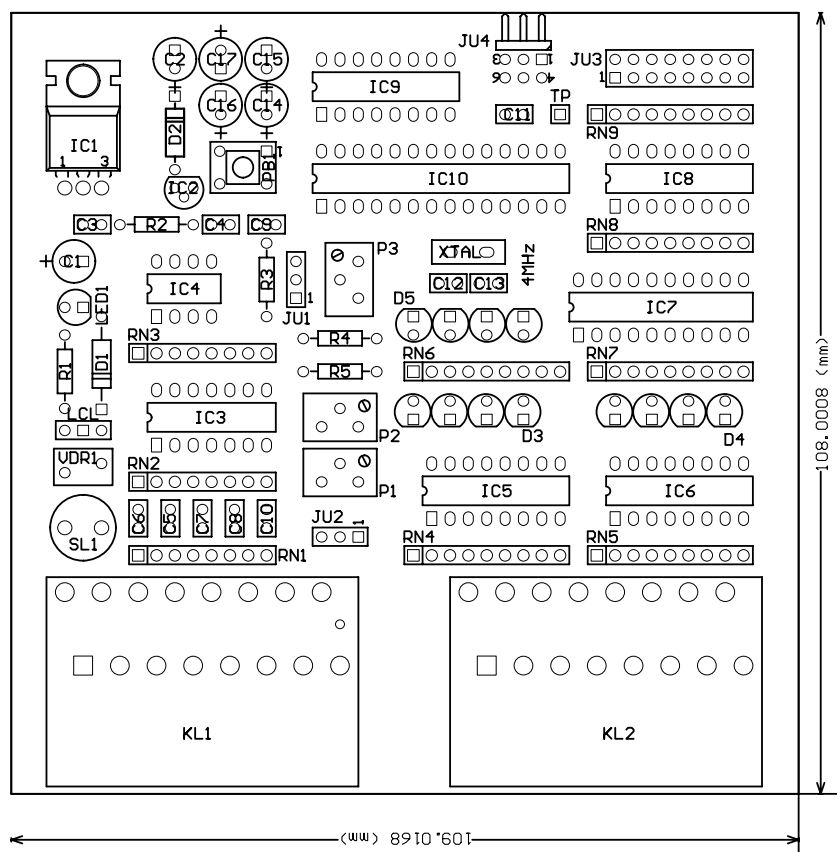


Fig. 23. Modulul de comandă a direcției – ansamblu

Soluția compactă are o interfață pentru încărcarea manuală a parametrilor și o interfață pentru comunicația serială. Modulul *mLENK* poate funcționa în următoarele configurații:

- blocul *mLENK* poate fi utilizat **independent** pe transportoarele cu 2 roți, microcontrolerul dispunând de puterea de calcul necesară acestei funcții, interfațării cu o manetă de comandă a direcției, precum și deciziilor de funcționare în siguranță (neacționarea direcției unei roți oprite, limitarea unghiurilor de viraj etc.);
 - în cazul utilizării unei manete numerice (*stânga – drept înainte – dreapta*), reglajul se face doar pentru cele 3 unghiuri – α , 0° , $+\alpha$, iar dirijarea manuală se bazează practic pe durata de comandă a virajului cu un unghi impus, depinzând de abilitatea și de experiența operatorului; soluția este destinată aplicațiilor de complexitate redusă;
 - în cazul utilizării unei manete proporționale (valori continue ale unghiurilor de viraj în intervalul $[-\alpha, +\alpha]$, poziția roții urmărește continuu poziția manetei de comandă, ceea ce permite o îmbunătățire considerabilă a preciziei de comandă; soluția este recomandată aplicațiilor pretențioase în precizie, dar în configurații de complexitate redusă;
- pentru transportoarele cu 3 sau 4 roți de direcție, blocul de comandă a direcției poate fi realizat cu **două module** *mLENK* independente, în paralel, comandate corespunzător;

soluția este aplicabilă configurațiilor speciale (transportoare lungi, cu 3 sau 4 roți în linie), dar în configurații de complexitate redusă;

- *mLENK* poate funcționa **alături** de modulul complex de control, *mCOMP*, realizând un sistem multiprocesor cu intercomunicație serială; în aceste condiții comanda direcției este dată de blocul de control, după prelucrarea comenzii de la manetă și verificarea condițiilor funcționale și de siguranță; soluția corespunde aplicațiilor complexe, în care sistemul multiprocesor este solicitat de o multitudine de semnale și condiții exterioare, cât și de algoritmi de reglaj automat ce necesită resurse importante;
- modulul de comandă a direcției **poate lipsi**, pentru un transportor cu 2 roți, în condițiile în care funcțiile sale (software al microcontrolerului) sunt preluate de *mCOMP*; soluția este utilizabilă în configurațiile complexe, cu comandă inteligentă, în condițiile în care modulul de control nu este solicitat (hardware – număr de conexiuni și software – timp de execuție și capacitate de memorie) la maximum de funcțiile specifice, putând prelua funcții suplimentare;
- ca o consecință a ultimelor două configurații, pentru transportoare cu 4 roți, este recomandată utilizarea unui sistem **multiprocesor** format dintr-un modul de direcție *mLENK* (pentru 2 roți) și un modul de control *mCOMP* (pentru celelalte 2 roți).

4.1.3. Modulul complex de comandă, *mCOMP*

Modulul de control a condițiilor de siguranță și de validare a comenzilor la punerea în mișcare a transportorului este conceput a realiza toate funcțiile unui transportor inteligent, de complexitate medie. El este proiectat hardware pe baza microcontrolerului PIC16F873, asigurând compatibilitatea software directă cu funcțiile implementate pe modulul de comandă a direcției, *mLENK*. Desenul de ansamblu este prezentat în fig. 24.

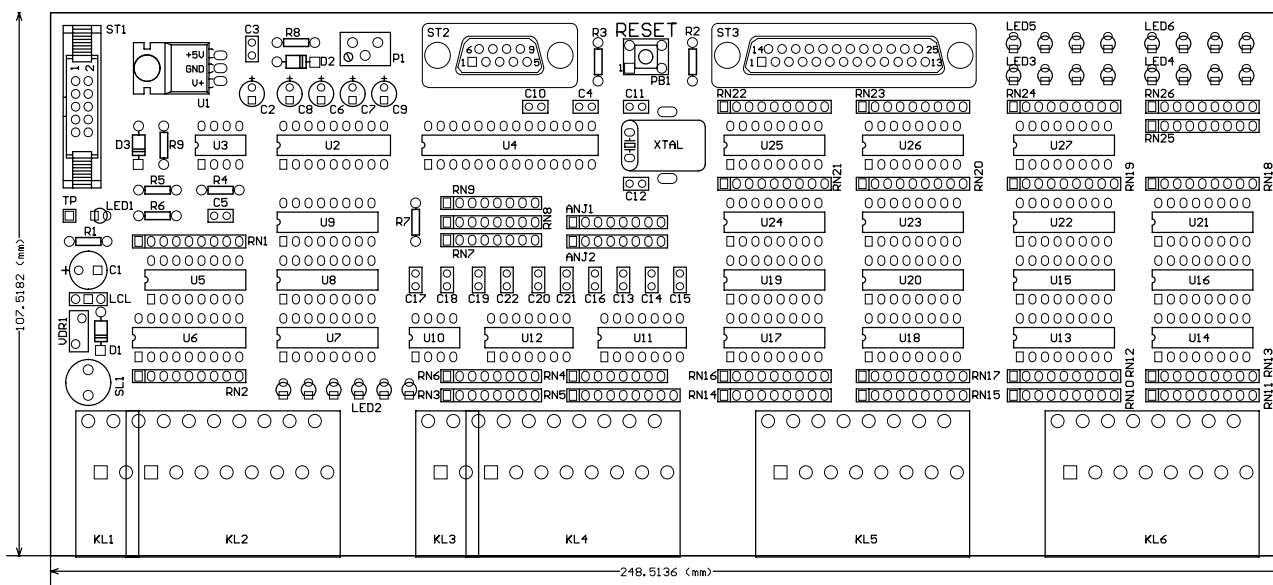


Fig. 24. Modulul complex de comandă – ansamblu

Pentru realizarea tuturor funcțiilor de comandă, precum și pentru validarea condițiilor de bună funcționare, modulul a fost conceput cu o structură complexă de interfațare: 10 intrări analogice, 32 de intrări numerice de 24 V izolate optic, 24 intrări numerice de 5 V, 16 ieșiri numerice de putere de 24 V, 6 ieșiri PWM de putere de 24 V.

O parte a acestor conexiuni sunt alocate unor semnale bine precizate, fiind deservite de subrutine dedicate. Celelalte conexiuni sunt la dispoziția proiectantului aplicației specifice, în funcție de configurația transportorului și în funcție de complexitatea blocului electronic de comandă. În funcție de acestea, modulul poate funcționa în diferite regimuri:

- *mCOMP* poate fi utilizat **singur**, pe transportoarele cu 2 roți, asigurând și funcțiile de propulsie (utilizând 2 ieșiri PWM) și de direcție (utilizând celelalte 4 ieșiri PWM); soluția corespunde majorității aplicațiilor (de complexitate medie), asigurând o structură electronică compactă (modulele specializate de propulsie și de direcție nefiind necesare);

- *mCOMP* poate comanda direcția a 3 roți (utilizând toate cele 6 ieșiri PWM), situație în care trebuie utilizat **împreună** cu modulul specializat de propulsie, *mLENK*;
- în cazul unui transportor cu 4 roți, modulul de control preia controlul propulsiei și al direcției pentru 2 roți (prin cele 6 ieșiri PWM), celelalte 2 roți fiind dirijate de modulul suplimentar de direcție, *mLENK*, cu care lucrează interconectat serial;

Ultimele 2 soluții evidențiază adaptabilitatea ansamblului electronic realizat la necesitățile particulare ale fiecărui transportor, adaptat tehnologiei particulare de fabricație deservite.

4.2. Integrarea software – hardware

Programele, algoritmi și subrutine dezvoltate prin simulare individuală au fost implementate în structurile hardware realizate ca model experimental, realizându-se verificarea funcțională prin:

- realizarea interdependenței diverselor subrutine, în execuția unor programe complexe,
- rularea programelor în timp real, pe procesorul pentru care au fost dezvoltate,
- execuția funcțiilor software în corelație cu semnale exterioare, măsurabile.

4.2.1. Funcția de comandă PWM a propulsiei

Deoarece modulul de comandă PWM a propulsiei nu este realizat cu circuite microprogramabile, varianta software a fost elaborată doar ca o alternativă, prin implementarea acestei funcții pe microcontrolerul modulului de control. Ea realizează aceiași parametri ai semnalelor de comandă modulate în durată (PWM), fiind utilizată în varianta compactă, în care toate funcțiile blocului electronic de comandă sunt concentrate într-un singur modul.

4.2.2. Funcția de comandă PWM a direcției

Implementarea algoritmilor și integrarea software cu modelul experimental hardware de comandă a direcției, *mLENK*, s-a realizat prin execuția cu microcontrolerul PIC16F873 a unui pachet software, care conține mai multe secțiuni:

- procedura de calibrare și calculul automat al unghiurilor de viraj;
- interpretarea parametrilor programabili manual în blocul de programare hardware:
 - precizia, pentru evitarea oscilației,
 - tipul de frânare a virării roții, pentru oprire fermă la valoarea dată,
 - durata frânării, în funcție de frecare;
- algoritmul de reglaj automat a virajului, în funcție de valoarea măsurată în timp real;
- gestionarea modurilor de lucru:
 - *înainte* (direcția doar pe roata 1),
 - *înapoi* (direcția doar pe roata 2),
 - *lateral* (ambele roți la 90°),
 - *cerc* (roțile comandate în opoziție);
- algoritmul de generare a semnalului PWM, cu factor de umplere variabil, în funcție de tipul și durata frânării.

Pachetul software, cu procedură de autotest, a fost conceput a rula în următoarele configurații:

- implementat pe modulul de comandă a direcției, cu funcționare independentă,
- implementat pe modulul de comandă a direcției, cu funcționare dependentă de modulul de control, cu care funcționează în regim multiprocesor,
- implementat pe modulul de control, modulul de comandă a direcției nemaifiind necesar.

4.2.3. Funcțiile modulului de control

Modulul este organizat, într-o structură complexă, în jurul microcontrolerului PIC16F873 și se bazează pe o varietate de funcții, organizate într-un pachet software, cu mai multe secțiuni, astfel încât acestea să poată fi utilizate în funcție de configurația aplicației:

- achiziția celor 32 + 24 semnale de intrare și comanda celor 16 semnale de ieșire,
- condiționarea funcționării sistemului de senzori și întrerupătoare de protecție,

- toate funcțiile modulului de comandă a direcției (pentru 2 roți, 4 ieșiri PWM), celelalte 2 ieșiri PWM putând fi folosite, în funcție de configurație, pentru
 - comanda direcției unei a treia roți sau pentru
 - realizarea propulsiei (în locul modulului de comandă a propulsiei);
- realizarea unui sistem de comunicație serială, pe interfața RS232, pentru:
 - dialogul cu un modul de comandă a direcției asociat (transportor cu 3 sau 4 roți),
 - comanda unui bloc de afișare alfanumeric (pentru mesaje adresate operatorului),
 - programarea *on-line* a sistemului montat în transportor, de la un calculator PC.

Pachetul software, cu procedură de autotest, poate rula într-o paletă de variante utile:

- de la soluția cu toate funcțiile (control, propulsie și direcție) pe acest modul,
- până la utilizarea modulelor de propulsie și de direcție externe.

4.3. Testarea modulelor cu echipamente pneumatice

Fiecare din cele 3 modele experimentale a fost testat funcțional în mai multe etape: în prima etapă – la nivel de laborator, în următoarele două – în condiții reale, pe transportor pe pernă de aer.

4.3.1. Testarea individuală în condiții de laborator

Prima etapă a constat în testarea individuală, cu echipamente electronice de laborator, cu simularea semnalelor de intrare și monitorizarea ieșirilor. S-au verificat în acest mod:

- achiziția corectă a semnalelor de comandă, analogice și numerice,
- prelucrarea corectă a datelor în algoritmi de reglaj și control,
- generarea corectă a semnalelor de acționare a componentelor pneumatice.

Testele electrice au fost efectuate în laboratoarele Facultății de Electronică și Telecomunicații din Timișoara.

4.3.2. Testarea individuală cu subsansambluri utilizate în transportoarele pe pernă de aer

Testele au fost efectuate la sediul din Timișoara al firmei *Delu-Team* S.R.L., cu sprijinul specialiștilor acestei firme. Au putut fi testate următoarele:

- achiziția corectă a semnalelor de comandă, prin utilizarea unui panou de telecomandă a propulsiei, a direcției și a unor semnale ce control,
- comanda corectă a unui motor pneumatic, cu semnale PWM, prin intermediul unor electroventile, atât a propulsiei, cât și a direcției,
- estimarea preciziei de reglaj a direcției, în funcție de parametrii programabili (tipul și durata frânării, toleranța corecției).

4.3.3. Testarea ansamblului modulelor pe un transportor pe pernă de aer

Testele au fost efectuate la sediul firmei germane *Delu GmbH*, împreună cu specialiștii acestei firme, cu ocazia deplasării la Nürnberg, în acest scop. În scopul testării a fost utilizat un transportor cu 2 roți, aflat în faza finală de asamblare, înaintea livrării.

A fost testat ansamblul blocului electronic de comandă, conectat în sistemul de telecomandă și de acționare, iar rezultatele măsurărilor au fost comparate cu cele obținute cu blocul de comandă utilizat în prezent de firma *Delu*. Am ajuns la următoarele concluzii:

- s-a asigurat compatibilitatea electrică cu sistemul existent,
- funcțiile implementate au funcționat corect,
- precizia de reglare a unghiului de viraj s-a încadrat în domeniul $\pm 0,5^\circ$, de peste 2 ori mai bună decât sistemul analogic folosit în prezent,
- precizia de reglare a poziției poate fi îmbunătățită suplimentar prin optimizarea parametrilor algoritmului de reglaj, prin teste inițiale (în funcție de suprafața de lucru și de sarcina estimată a transportorului), urmate de programarea parametrilor specifici (tipul și durata frânării, toleranța corecției).

Rezultatele testelor au confirmat creșterea preciziei de lucru și flexibilitatea sistemului de comandă proiectat și realizat în cadrul grantului.

5. COMANDA UNOR CONFIGURAȚII PARTICULARE DE TRANSPORT PE PERNĂ DE AER

5.1. Comanda multiprocesor a unui tandem de transportoare

Pentru rezolvarea acestui obiectiv, au fost parcurși următorii pași:

- stabilirea parametrilor configurației *tandem*,
- analiza comparativă a standardelor de comunicație serială compatibile cu procesoarele folosite,
- proiectarea și implementarea comunicației între procesoare.

5.1.1. Configurația tandem

Un transportor pe pernă de aer este capabil să transporte sarcini de zeci + sute de tone, de dimensiuni de câțiva metri. Există situații, relativ frecvente, când sarcina are lungime mult mai mare, peste 10 m, ca în cazul liniilor de montaj pentru tramvaie, trenuri, avioane. În aceste situații, sarcina este plasată pe mai multe transportoare independente, care, însă, trebuie să se deplaseze sincron și cu mișcări coordonate, atât din punctul de vedere al propulsiei, dar mai ales din punctul de vedere al virajelor. În țară, această configurație este folosită la linia de asamblare a trenurilor *Săgeata albastră* la întreprinderea *Astra – vagoane de călători* din Arad.

Configurația de bază, reprezentată în fig. 25, utilizează două transportoare (sunt evidențiate cele 4 perne de aer și cele 2 roți motoare și de direcție), comandate cu câte un sistem cu microcontroler. Pentru a asigura sincronismul comenzii, cele 2 sisteme trebuie să poată face schimburi de parametri, de date măsurate etc., utilizând o legătură serială, evidențiată în figură.

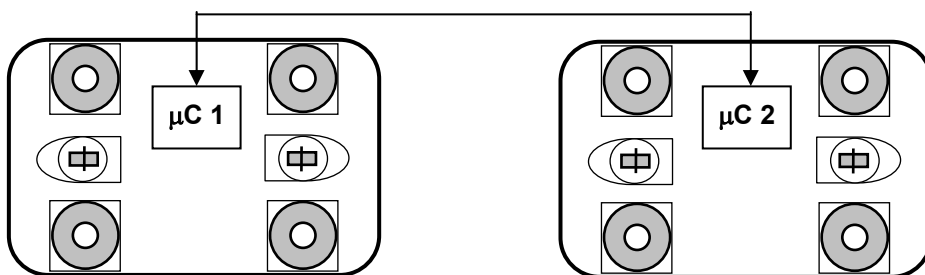


Fig. 25. Comunicația de date necesară în configurația tandem.

Este de remarcat faptul că există o varietate de structuri de tandem posibile: în prelungire, alăturate, cu 2, 3 sau 4 transportoare individuale. Independent de structură, problema funcției multiprocesor este asemănătoare.

5.1.2. Standarde de comunicație serială

Multe microcontrolere au implementat comunicația serială RS232, un standard extrem de util pentru legăturile punct la punct duplex, cu schema bloc reprezentată în fig. 26.

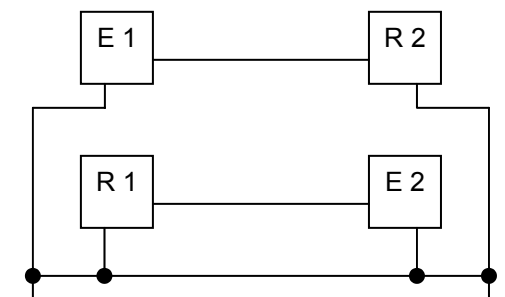


Fig. 26. Transmitere serială RS232 cu tensiuni raportate la masă.

Legătura serială, între un emițător și un receptor, se realizează prin tensiuni raportate la masă. Marginile de zgomot, impuse de nivelurile de tensiune folosite, sunt reduse, acest tip de conexiune nefiind recomandat pentru distanțe mari, în mediile cu zgomot ridicat, cum este o hală industrială, ca în cazul analizat.

Alternativa o constituie transferul diferențial, în care nivelurile logice nu mai reprezintă tensiuni raportate la masă, ci diferențe de tensiune între cele două fire ale fiecărui sens de transmisie, conform reprezentării din fig. 27.

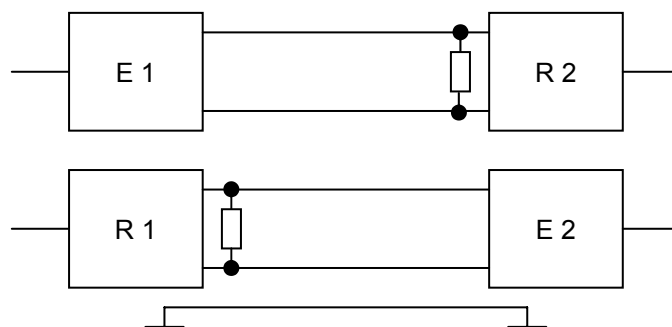


Fig. 27. Transmisie serială RS232 cu tensiuni diferențiale

Acest tip de transmisie asigură imunitate crescută la zgomote, acestea fiind compensate la recepție, prin scăderea automată a tensiunilor de pe cele două fire. Tehnica este utilă în mediile puternic zgomotoase, la distanțe și viteze mari, cu dezavantajul utilizării transmisiei pe 4 fire.

Soluțiile analizate sunt utile doar în aplicațiile cu 2 micro sisteme (tandem cu 2 transportoare). În practică există, însă, și situații în care un număr $n > 2$ de micro sisteme trebuie interconectate pentru comunicații seriale, cum ar fi ansamblurile de 3 sau 4 transportoare pentru sarcini de gabarit extrem. Pentru interconectarea mai multor microcontrolere, poate fi utilizat standardul RS485, care permite conectarea până la 32 de terminale (emisie + recepție).

În varianta cu transmisie pe 2 fire, toate terminalele (emisie și recepție) sunt conectate la aceleași 2 fire și la un fir de masă, comun, transferul fiind de tip semi-duplex, conform reprezentării din fig. 28. Pentru evitarea conflictelor, circuitele pot fi trecute în starea de înaltă impedanță, prin utilizarea semnalului *validare*.

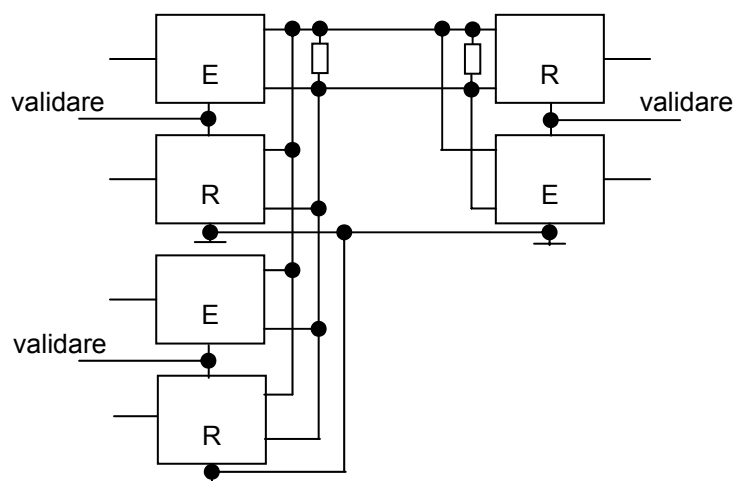


Fig. 28. Transmisie RS485 pe 2 fire

În varianta pe 4 fire, o pereche de fire este alocată blocului *master*, cealaltă pereche fiind alocată blocurilor de tip *slave*, rezultând o transmisie duplex.

O alternativă la interconectarea mai multor microcontrolere este reprezentată de magistrala serială I²C, unde fiecare modul este identificat printr-o adresă dedicată. Comunicația utilizează o linie de date, *SDA*, respectiv, o linie de tact, *SCL*, reprezentate în fig. 29.

Magistrala I²C poate fi utilizată în configurație *master - slave*, sau în configurație *multi-master*. Pentru evitarea conflictelor ce pot apărea între procesoare neierarhizate, se folosește o procedură de arbitraj, pe durata primilor biți emiși. Dispozitivele compatibile cu magistrala I²C sunt adresabile software printr-o adresă unică.

În configurația *master - slave*, rolul de *master* este îndeplinit de microcontrolerul modului de bază, ca *Microchip PIC 16F87X*, care este compatibil I²C, datorită MSSP (*Master Synchronous Serial Port*), care este o interfață serială utilizată pentru comunicația cu echipamente periferice.

Rolul de *slave* poate fi îndeplinit de un circuit compatibil I²C, care permite definirea unei adrese particulare a chipului prin 3 pini externi, *A0*, *A1* și *A2*.

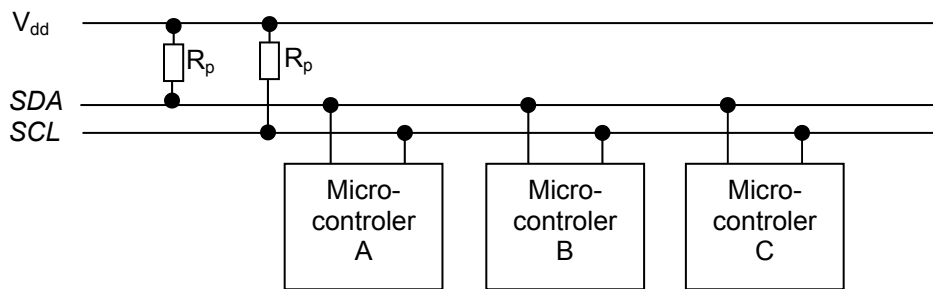


Fig. 29. Transmisie pe magistrală I²C.

Master-ul poate identifica un circuit trimițând adresa acestuia, pe linia SDA. Dacă ultimii 3 biți se potrivesc cu o combinație particulară a biților A2 A1 A0, slave-ul adresat transmite un semnal de confirmare pe aceeași linie SDA.

O interfață de tip I²C pentru transfer de date poate fi implementată de un circuit expander de intrare-ieșire pe 8 biți, după cum se poate observa în fig. 30.

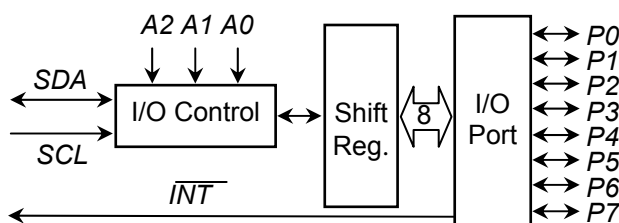


Fig. 30. Interfață pentru transferul datelor pe magistrala I²C

5.1.3. Proiectarea și implementarea comunicației seriale

Modulele de control și de direcție proiectate și realizate utilizează microcontrolerul PIC16F873, care permite implementarea fiecăruia din standardele analizate. Alegerea configurației de comunicații de date s-a făcut conform cerințelor fiecărui tip de legătură.

La nivelul unui bloc de comandă asociat unui transportor se implementează, în configurația complexă, 2 sisteme cu microcontroler: un bloc de control, *mCOMP*, și un bloc de direcție, *mLENK*. Cum acest ansamblu se află în același compartiment ecranat al transportorului, respectiv la distanță mică și neperturbabil, comunicația între procesoare este implementată conform standardului RS232.

În situația unui tandem de transportoare, condițiile sunt radical diferite: distanța între modulele de control ale fiecărui transportor este mare, iar conexiunea este afectată de perturbațiile specifice unei hale industriale. A fost implementată varianta *master-slave* a standardului RS485. Algoritmul presupune că doar unul din sisteme, numit *master*, primește comenzile de la operator. Acesta realizează, pe de o parte, acționarea propulsiei și direcției, conform comenzii, iar pe de altă parte, transmite informațiile de comandă celui de-al doilea sistem, numit *slave*. Acest sistem acționează motoarele conform datelor seriale recepționate și în funcție de semnalele de reacție locale pe care le prelucrează. Periodic, procesorul *master* interoghează procesorul *slave* asupra informațiilor de stare, de imposibilitate de execuție a comenzii, de alarmă etc.

Standardul I²C este rezervat situației cu mai multe procesoare. Acesta a fost simulat prin conectarea mai multor module cu adrese cablate. Fără a face obiectul prezentului grant, magistrala I²C a fost folosită în realizarea complementară *Sisteme embedded modulare cu magistrală de extensie*, prezentată în paragraful 7.4.

5.2. Ghidarea automată a unui transportor pe pernă de aer

Acest obiectiv a fost îndeplinit prin parcurgerea următoarelor etape:

- stabilirea unei configurații de senzori care să permită ghidarea automată a transportorului cu ajutorul unui sistem de control inteligent,
- proiectarea unui algoritm de control inteligent care să permită ghidarea automată,
- implementarea software a algoritmului pe modulul complex de comandă dedicat, *mCOMP*, dar și pe un sistem de comandă de uz general, de tip PLC (*Programmable Logical Controller*).

5.2.1. Stabilirea configurației de senzori

În modul de ghidare automată, transportorul pe pernă de aer trebuie să se deplaseze urmărind o bandă pe suprafața de lucru, ce marchează traseul de parcurs. Banda reprezintă traiectoria ideală de deplasare a vehiculului. Pentru o bandă vopsită, ghidarea se poate face cu senzori optici. Pentru o bandă metalică, încastrată în suprafața de lucru, ghidarea se bazează pe senzori magnetici. În ambele cazuri, senzorii pot fi analogici sau numerici.

Pentru prezenta aplicație s-a optat pentru un ghidaj magnetic, cu senzori magnetici cu prag, cu ieșire binară.

Pentru stabilirea cu precizie a poziției roții motoare și de ghidare față de traiectoria ideală, este necesară utilizarea mai multor senzori. În acest scop, fiecare roată a transportorului trebuie să aibă asociat un bloc de senzori: o bară perpendiculară pe axul transportorului, cu 5 senzori digitali, dispuși ca în fig. 31:

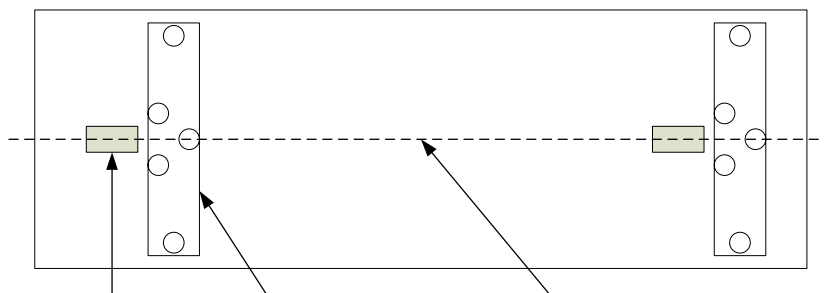


Fig. 31. Dispunerea senzorilor magnetici.

- 3 senzori sunt dispuși central, grupați sub forma unui triunghi, având rolul de a obține informații gradate despre poziția vehiculului în raport cu banda de ghidare;
- ceilalți 2 senzori sunt dispuși de o parte și de alta, la extremitățile barei, având rolul de a sesiza "pierderea" benzii de ghidare, putând fi folosiți și pentru detecția unor coduri (oprire, deplasare *lateral* etc.).

Cei 3 senzori centrali sunt dispuși în colțurile unui triunghi isoscel, astfel încât, în mod normal, la un moment dat cel mult 2 senzori detectează banda. Configurația propusă permite nu doar detectarea calitativă a abaterilor de la traiectorie (stânga sau dreapta), ci și evaluarea cantitativă a acestora, conform exemplelor din tabelul 1.

Bloc cu 5 senzori					Decodificare
Extrem	Triunghi de ghidare			Extrem	
Stânga	Stânga	Centru	Dreapta	Dreapta	
0	1	0	0	0	Abatere mare spre dreapta
0	1	1	0	0	Abatere mică spre dreapta
0	0	1	0	0	Fără abatere
0	0	1	1	0	Abatere mică spre stânga
0	0	0	1	0	Abatere mare spre stânga
x	0	0	0	x	Absență bandă
1	x	x	x	1	Capăt de linie
0	1	x	1	0	Cod eroare

Tabel 1. Decodificarea informației de la senzorii centrali.

În funcție de abaterea detectată, blocul de comandă a direcției acționează motorul de direcție *stânga-dreapta* al roții corespunzătoare. Pentru comanda adaptivă a direcției se folosesc traductoare de poziție unghiulară a fiecărei roți, care se calibrează inițial, astfel încât sistemul de control să memoreze valorile de tensiune corespunzătoare unghiurilor de 0°, respectiv 90°.

5.2.2. Algoritm de control adaptiv pentru urmărirea benzii de ghidare

Algoritmul proiectat este prezentat în fig. 32. Minimizarea abaterilor de la traiectorie și limitarea oscilațiilor au fost realizate avându-se în vedere următoarele:

- sistemul de senzori oferă informații despre mărimea abaterii,
- unghiul de corecție este ales în funcție de mărimea abaterii,
- factorul de umplere pentru impulsurile de comandă a roților este ales în funcție de distanța unghiulară de parcurs până la poziția țintă, astfel încât roata să se oprească cu precizie în dreptul poziției țintă.

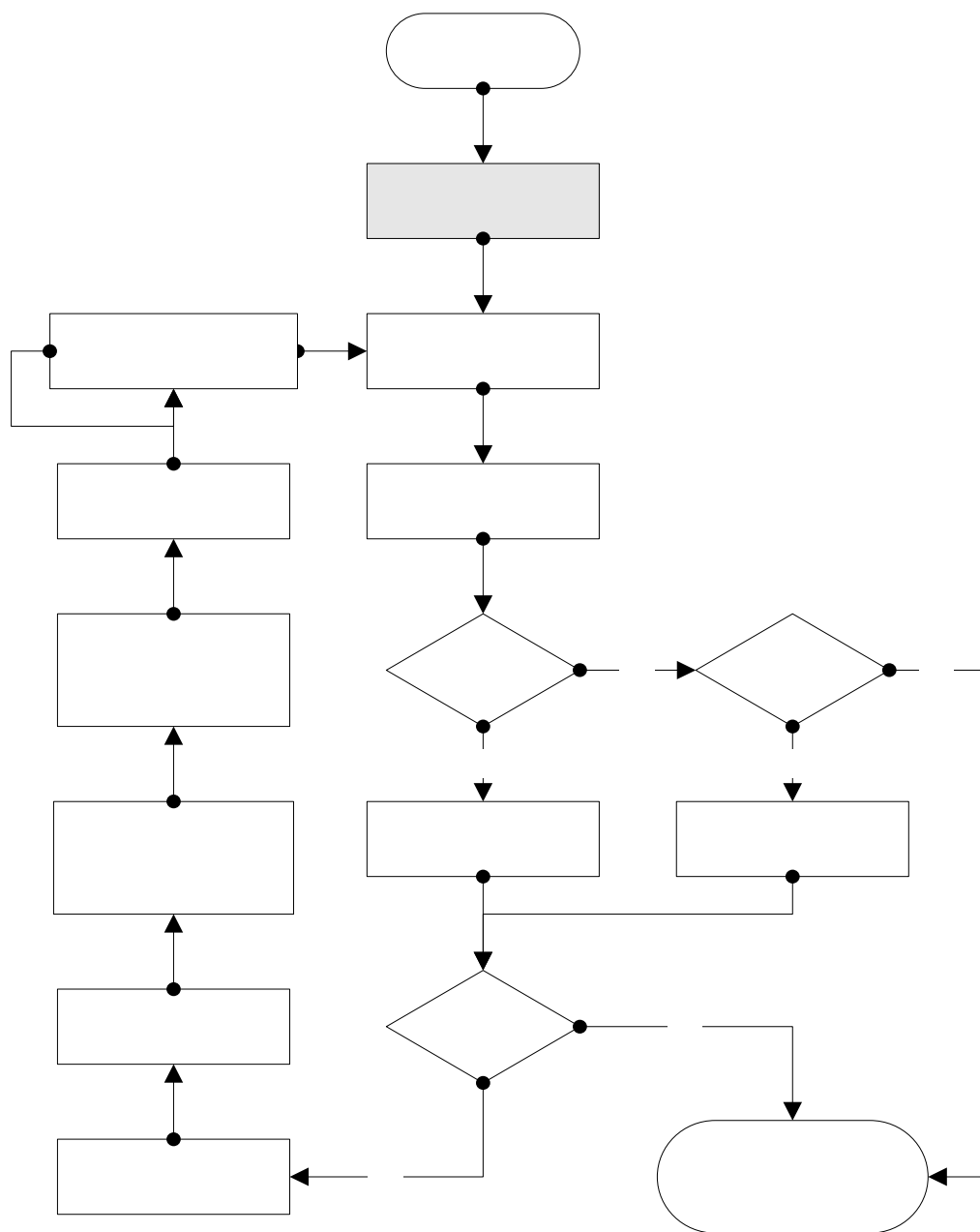


Fig. 32. Algoritm de control al ghidării automate

Așteptare întrerupere
periodică

Citire c
dig

Principalii pași ai algoritmului sunt:

- citirea periodică a senzorilor,
- decodificarea informațiilor obținute de la senzori,
- validarea informațiilor primite de la senzori,
- definirea modului de acțiune în cazul citirii de informații nevalide,
- calcularea pozițiilor țintă (unghiurilor de corecție) pentru roți,
- determinarea distanțelor unghiulare până la pozițiile țintă,
- alegerea unui factor de umplere potrivit pentru impulsurile de comandă a roților,
- comanda roților.

5.2.3. Implementarea algoritmului de comandă

Soluția software a fost implementată, prin limbaje diferite, pe platforme diferite, oferind un grad sporit de generalitate și de flexibilitate tehnicii dezvoltate.

5.2.3.1. Implementarea pe modulul dedicat *mCOMP*

Pentru implementarea algoritmului pe modulul complex de comandă, dezvoltat în cadrul grantului, au fost utilizate o parte din intrările și ieșirile digitale și analogice disponibile, nefiind necesară proiectarea unor noi module hardware. În programul existent au fost adăugate noi subrutine care controlează comportamentul sistemului în modul ghidare automată conform algoritmului descris mai sus. Rezultă o soluție compactă și de complexitate minimă, dar dependentă de comanda transportorului pe pernă de aer cu modulul *mCOMP*.

5.2.3.2. Implementarea pe un sistem de comandă PLC, de uz general

Pentru implementarea algoritmului pe acest tip de sistem a fost folosit un PLC din familia SIMATIC S7-200, produs de firma Siemens. Pentru a asigura interfațarea cu semnalele necesare aplicației, modulului de unitate centrală i-au fost atașate 2 module de extensie:

- unul pentru intrări analogice,
- unul pentru intrări și ieșiri numerice.

Avantajul acestei implementări este că folosește exclusiv module hardware comerciale, standardizate. Principalele dezavantaje ale soluției sunt complexitatea (prețul) mult superioară, precum și posibilitatea piratării software-ului.

5.3. Testarea aplicațiilor

Cele 2 aplicații, comanda unui tandem de transportoare și ghidarea magnetică automată a unui transportor au fost testate, într-o primă fază, prin simularea unor funcții, respectiv a algoritmului de ghidare, în laboratoarele Facultății de Electronică și Telecomunicații din Timișoara. În final, testarea s-a făcut la sediul firmei germane *Delu GmbH*, împreună cu specialiștii acestei firme.

Prima aplicație a fost testată prin comanda a două motoare pneumatice, prin blocurile electronice de comandă realizate (embedded systems) cu microcontrolere, pe baza unor parametri stabiliți prin intercomunicație serială RS485, permițând acționarea sincronă a acestora.

Cea de a doua aplicație a fost testată cu ajutorul unui transportor cu 2 roți aflat în faza finală de asamblare. La acest transportor au fost atașate mai întâi modulele de comandă *mCOMP*, iar după finalizarea testelor în această configurație a fost testată și implementarea pe un sistem PLC. Testarea a constat în parcurgerea autoghidată, la o viteză stabilită prin acționare manuală, a unui traseu de 20 m, constând în deplasare rectilinie, oprire la detecția unui cod și trecerea automată în deplasare *laterală*. În cazul ambelor implementări, testele au pus în evidență o reducere semnificativă a abaterilor de la traiectorie și a oscilațiilor în deplasare prin alegerea unor valori potrivite pentru unghiurile de corecție, față de metodele de comandă neadaptive sau cu valoare unică a unghiului de corecție.

6. SISTEM DE DEZVOLTARE PENTRU RECONFIGURAREA APLICAȚIILOR

6.1. Problema reprojectării

Sistemele embedded cu microcontroler au o mare răspândire în cadrul aplicațiilor industriale. Unele dintre ele, cum este tehnologia transportului pe pernă de aer, nu sunt produse de serie, având nevoie de o multitudine de versiuni și configurări, implicând dezvoltarea unei familii de aplicații. Trebuie astfel creat un nou software pentru fiecare aplicație în parte, adică pentru un număr oarecare de semnale de intrare – ieșire, diverse funcții condiționale etc. Acest procedeu are însă limitări datorate timpului aferent reprojectării și costurilor suplimentare.

Metoda propusă definește două segmente de software:

- software-ul nucleu, care cuprinde toate funcțiile necesare familiei de aplicații, proiectată o singură dată de specialiști în software,
- software-ul suplimentar, specific unei anumite aplicații a familiei, care poate fi dezvoltat conform unei anumite configurații.

Avantajul principal al acestei metode constă în faptul că utilizatorul (proiectantul reconfigurării), cunoscând software-ul nucleu doar la nivel de utilizator și nu de proiectant, poate reprojecta în mod grafic o aplicație, fără să folosească sau să cunoască limbajul de asamblare. Devine astfel posibilă o reconfigurare, în mediul industrial (în loc de laborator de proiectare) din partea fiecărui utilizator, acesta fiind orientat mai mult pe aplicație decât pe dezvoltarea de software.

În cazul grantului, metoda a fost dezvoltată pentru un sistem particular, reprezentat de blocul complex de comandă, *mCOMP*, realizat cu microcontrolerul PIC 16F87x, în configurația:

- 32 de intrări numerice de 24 V,
- 24 de intrări numerice de 5 V,
- 16 ieșiri numerice de putere de 24 V,
- 10 intrări analogice cu diferite niveluri de tensiune sau curent, setate prin intermediul *jumper*-ilor,
- 6 ieșiri de putere PWM de 24 V,
- interfață serială pentru încărcarea programului de la PC.

6.2. Interfața grafică

Pentru editare, asamblare și simulare, aferente microcontrolerului PIC, se utilizează programul MPLAB. Metoda și sistemul de dezvoltare propus sunt mai puternice și mai convenabile deoarece integrează într-o singură aplicație două componente de software (nucleu și suplimentar), funcțiile MPLAB, precum și încărcarea fișierului *.hex* în memoria sistemului *mCOMP*, printr-o interfață de comunicare serială.

Interfața grafică a fost proiectată pentru a ajuta utilizatorul să modifice software-ul de aplicație existent, în vederea configurării unei noi aplicații, prin adăugarea de semnale sau funcții. Există o serie de programe care permit proiectarea de interfețe grafice, programul ales fiind C++ Builder, datorită funcției RAD (*Rapid Application Development*), care este foarte eficientă pentru programator, generând în mod automat secvențe de cod.

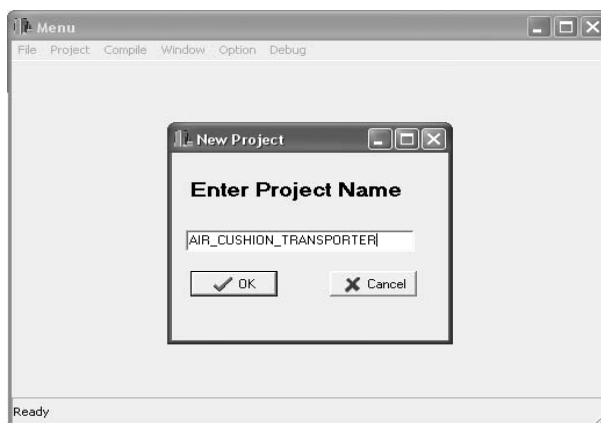


Fig. 33. Fereastra Menu cu opțiunea New Project

Utilizatorul vede doar interfața grafică, în timp ce în fundal este generat codul pentru microcontroler. Software-ul nucleu, proiectat pentru o familie de aplicații, este completat cu segmente software care sunt generate pentru o anumită aplicație.

În momentul pornirii aplicației, fereastra *Menu*, prezentată în fig. 33, oferă o serie de funcții. Opțiunea *Project* permite deschiderea unor proiecte anterior concepute, fie direct din meniu, fie prin intermediul unei ferestre de dialog. Când se alege opțiunea *New Project* se introduce un nume în fereastra de dialog aferentă. Meniul *File* asigură gestionarea fișierelor, cum ar fi deschiderea, salvarea etc., în timp ce meniul *Compile* oferă funcțiile MPLAB și aplicația de încărcare în memorie.

Atât pentru proiectele noi, cât și pentru cele deja existente, opțiunea *Window* (fig. 34) permite deschiderea simultană a mai multor ferestre pentru definirea tuturor tipurilor de semnale. În fiecare pas al proiectării este folosită o fereastră în vederea asocierii unei etichete, recunoscută de software-ul nucleu, fiecărui semnal aferent unui anumit pin.

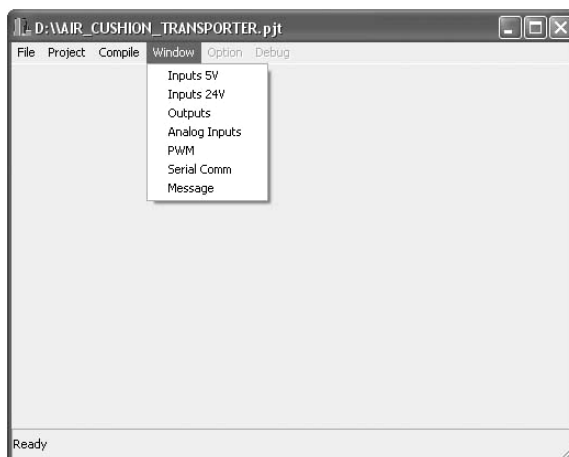


Fig. 34. Ferestrele de proiectare aferente tuturor tipurilor de semnale

6.3. Pașii de proiectare

Pentru exemplificarea metodei grafice de proiectare sunt urmați pașii necesari reconfigurării unei aplicații de transportor pe perne de aer, cu propulsie și direcție comandate de modulul complex *mCOMP*.

6.3.1. Definirea intrărilor digitale

În fig. 35 este prezentată fereastra *Inputs 24V*, în care pot fi definite cele 32 de intrări numerice de 24 V. La începutul unui nou proiect, trebuie introdusă, în câmpul corespunzător, denumirea fiecărui semnal aferent pinilor. Pinii cărora nu le sunt atașate semnale sunt presupuși a fi neconectați.

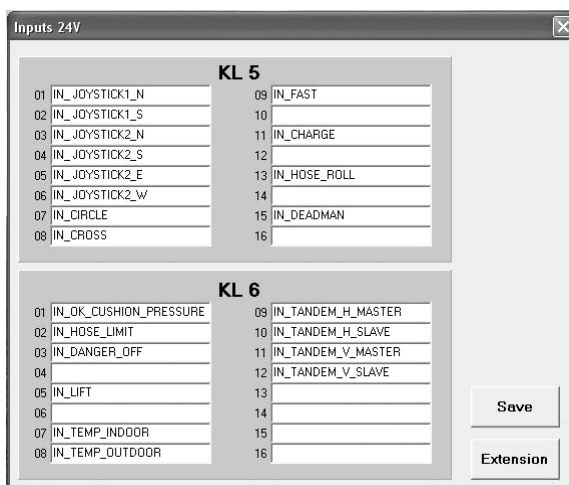


Fig. 35. Definirea intrărilor digitale

În cazul modificării unui proiect existent, fereastra afișează toate numele atribuite semnalelor în câmpurile corespunzătoare, astfel că utilizatorul are doar de adăugat, de șters sau de mutat etichetele, în concordanță cu noua versiune a aplicației. Etichetele desemnează semnalele de control și de supraveghere aferente transportorului pe pernă de aer. În mod similar, în cea de-a doua fereastră sunt definite cele 24 de intrări digitale de 5 V.

6.3.2. Definirea ieșirilor digitale

Procedura de definire a celor 16 ieșiri numerice de putere cuprinde doi pași:

- definirea numelui aferent fiecărei ieșiri și corespondența acestuia cu un anume pin,
- definirea ieșirii numerice drept o funcție ce are ca argument semnalele numerice de intrare.

Primul pas este realizat prin tastarea etichetelor corespunzătoare în fereastra *Outputs*, prezentată în fig. 36, în mod similar definirii intrărilor numerice.

The screenshot shows a window titled 'Outputs' with three sections for different KL units. Each section contains a list of output names and their corresponding input signals.

KL Unit	Output Name	Input Signal
KL 2	03 OUT_FORWARD1	IN_JOYSTICK1_N AND1 IN_OK_CUSHION_PRESSURE
	04 OUT_BACKWARD1	
	05 OUT_FORWARD2	
	06 OUT_BACKWARD2	
	07	
	08 OUT_FAST	
KL 3	01 OUT_HORN	
	02 OUT_DEADMAN	IN_DEADMAN OR1 IN_DANGER_OFF
KL 4	01 OUT_STAMP	
	02	
	03 OUT_CHARGE	
	04 OUT_HOSE_ROLL	
	05	
	06 OUT_WHEEL1_LIFT	
	07 OUT_WHEEL2_LIFT	
	08 OUT_WHEEL3_LIFT	

Fig. 36. Definirea ieșirilor digitale

Cel de-al doilea pas cuprinde două etape, după cum se poate observa în fig. 37: alegerea funcției și, apoi, alegerea operanzilor. Prin selectarea butonului corespunzător unei ieșiri (*OUT_FORWARD2* în acest exemplu), se deschide fereastra *Gate*, oferind o varietate de funcții booleene. Prin selectarea AND2, în fereastra *Output Expression* este prezentat simbolul porții, permițând utilizatorului să selecteze drept operand orice semnal numeric de intrare, definit anterior.

În momentul validării atât a porții cât și a operanzilor (prin intermediul butoanelor *OK*), fereastra *Outputs* afișează automat expresia logică a semnalului de ieșire (fig. 38).

În cazul transportorului pe pernă de aer, intrarea *IN_JOYSTICK1_N* reprezintă comanda propulsiei: *înainte*. Prin intermediul unui algoritm software, rezultatul este ieșirea numerică de putere *OUT_FORWARD1*, care dirijează roata frontală. În exemplul dat și roata din spate este dirijată: *OUT_FORWARD2*, acest lucru fiind posibil pentru mersul *înainte*, *înapoi* sau în *cerc*. În cazul în care se alege funcția *lateral*, cele două roți trebuie controlate individual, astfel că s-a utilizat condiția *NOT IN_CROSS*.

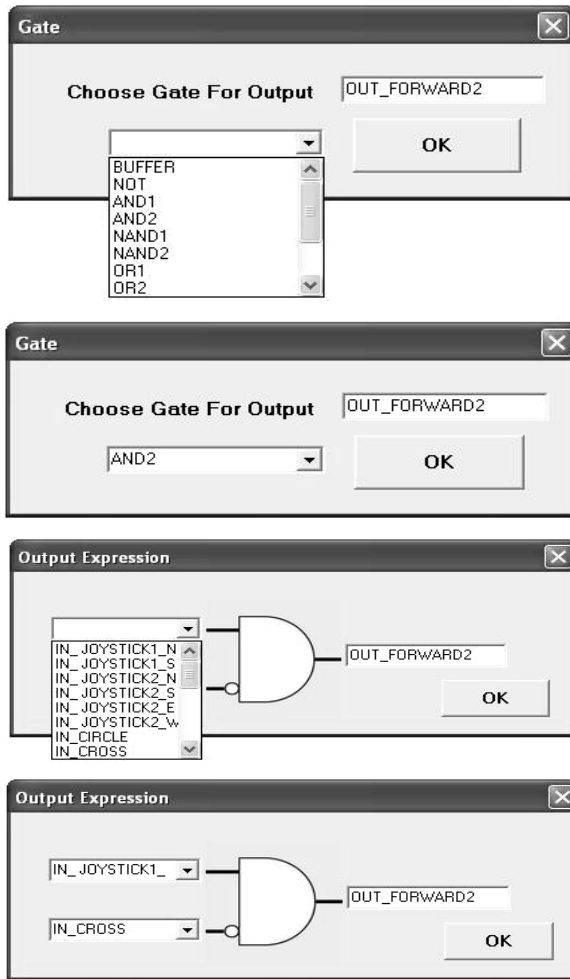


Fig. 37. Definirea funcțiilor ieșirilor digitale

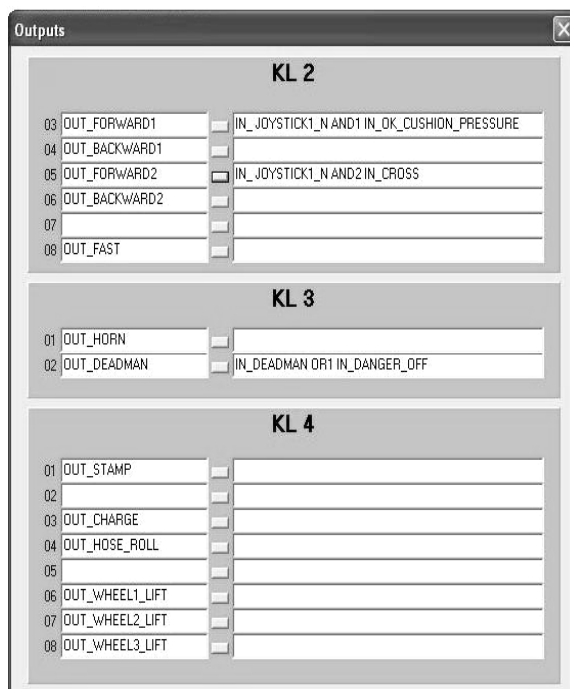


Fig. 38. Afișarea automată a expresiei funcției de ieșire

6.3.3. Definirea intrărilor analogice

Sistemul *mCOMP* are 10 intrări analogice, definite în fereastra *Analog Inputs*, reprezentată în fig. 39:

- 4 intrări dedicate, folosite de software-ul nucleu pentru comanda direcției celor două roți, selectate doar printr-un meniu (intrările 13 ÷ 16);
- 2 intrări cu caracter general, de 0 ÷ 5 V, care pot fi setate fără restricții, inclusiv pentru comanda unei a treia roți;
- 4 intrări speciale, care pot fi alocate unor semnale de intrare, curent sau tensiune, cu diferite domenii.

Pentru a selecta una din cele 3 valori posibile corespunzătoare celor 4 intrări speciale, utilizatorul are de fixat 2 *jumperi* pentru fiecare intrare în parte. La selectarea domeniului, prin intermediul butoanelor din dreapta, configurația *jumperi*-lor este afișată automat, ajutând utilizatorul să seteze cei 8 *jumperi* corespunzători.

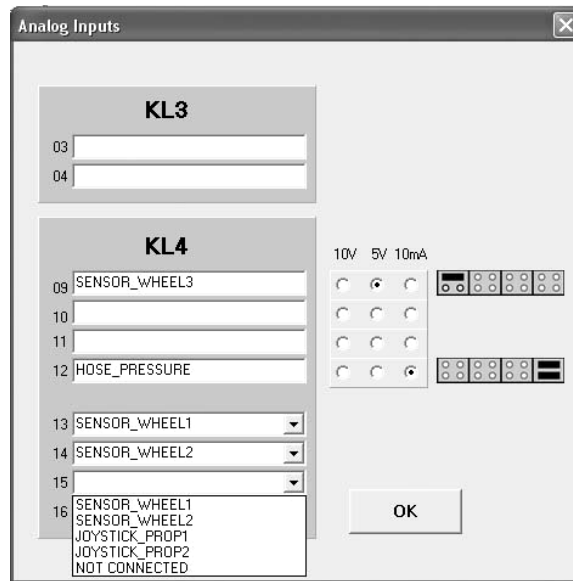


Fig. 39. Definirea intrărilor analogice

6.3.4. Definirea ieșirilor PWM

În cadrul transportorului pe pernă de aer, ieșirile PWM sunt utilizate pentru comanda motoarelor de direcție corespunzătoare roților: la *dreapta* (*RIGHT*) sau la *stânga* (*LEFT*). Astfel, primele două perechi de semnale PWM, din fereastra *PWM Outputs*, prezentată în fig. 40, sunt dedicate. Cea de-a treia pereche de semnale poate fi folosită fie pentru o a treia roată (dacă aceasta este definită), fie pentru propulsie *înainte* (*FORWARD*) sau *înapoi* (*BACKWARD*), conform meniului.



Fig. 40. Definirea ieșirilor PWM

6.4. Proiectul de reconfigurare

Toate semnalele au fost configurate în ferestrele corespunzătoare. Prin apăsarea butonului *SAVE* și închiderea ferestrelor, toate semnalele definite devin valabile și se creează fișierul corespunzător. Ultimii pași sunt reprezentați de opțiunea *Assembly* (asamblare) din meniul *Compile*, apoi de opțiunea *Boot-load* (încărcarea fișierului *.hex*).

În mod uzual, reproiectarea unei configurații corespunzătoare unei anumite aplicații industriale, nu presupune schimbarea funcțiilor, algoritmilor sau a subrutinelor principale, ci doar o verificare a noilor semnale de la intrare la ieșire și o evitare a acțiunilor până când unele condiții devin valide. În toate aceste cazuri sunt implicate doar funcții booleane, precum și anumite semnale de intrare și de ieșire.

Metoda prezentată ajută dezvoltarea software-ului suplimentar fără necesitatea reproiectării întregului software, astfel încât utilizatorul nu trebuie să fie proiectantul inițial al sistemului, rezultând o proiectare mai ieftină, mai rapidă și mult mai flexibilă, independentă de proiectantul software-ului nucleu.

7. SISTEM EMBEDDED MODULAR CU MAGISTRALĂ DE EXTENSIE

7.1. Problema sistemelor embedded

În aplicațiile industriale se utilizează adesea sisteme embedded dedicate. În funcție de natura aplicației și de funcțiile necesare, arhitectura unui astfel de sistem poate varia foarte mult. Pentru un grup de aplicații trebuie dezvoltat un grup de sisteme embedded, cu diverși parametri, cum ar fi numărul și nivelul canalelor digitale de intrare, numărul și curentul de ieșire al canalelor digitale de ieșire, numărul și domeniul canalelor analogice etc.

Proiectarea de noi arhitecturi hardware și funcții software pentru fiecare nouă versiune sau tip de aplicații este ineficientă din punct de vedere al costurilor și timpului consumat. Aceste dezavantaje pot fi însă eliminate folosind un concept de proiectare diferit, bazat pe o structură modulară, deschisă și autoadaptivă.

7.2. Soluția modulară cu magistrală de extensie

Soluția propusă are la bază abordarea flexibilă a acestor aplicații:

- proiectarea sistemelor embedded sub formă modulară, cu un modul de bază și mai multe tipuri de module, fizic independente, pentru achiziție numerică, generare de semnale digitale, interfață analogică etc.;
- definirea arhitecturii particulare, pentru fiecare nouă aplicație, doar prin selectarea și folosirea modulelor potrivite;
- interconectarea modulelor necesare într-un sistem embedded particular, controlat cu ajutorul unui software adaptiv ce rulează pe unitatea de bază.

Interconectarea diferitelor module implică în general utilizarea unui număr mare de fire și conectori, număr ce crește pe măsură ce crește numărul modulelor folosite. Pentru a eficientiza implementarea metodei modulare, interconectarea modulelor trebuie realizată cu ajutorul unei magistrale, minimizându-se astfel numărul de fire și conexiuni.

Magistrala de extensie propusă, reprezentată în fig. 41, trebuie să aibă următoarele caracteristici:

- o structură deschisă care să permită conectarea oricărui număr și tip de module de extensie,
- un număr minim de linii de semnal care să permită implementarea tuturor funcțiilor de interfațare, cum ar fi achiziția numerică, generarea de semnale numerice, interfațarea analogică etc.

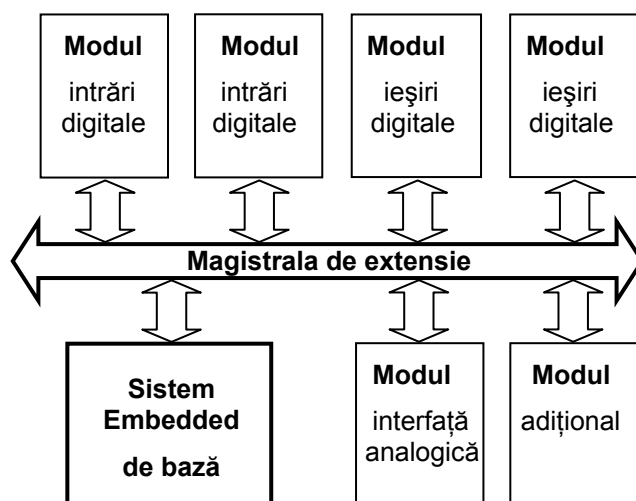


Fig. 41. Sistem embedded modular

7.3. Implementarea achiziției numerice

Pentru a dezvolta o magistrală extinsă eficientă, metoda de achiziție trebuie să implice un număr minim de semnale, chiar și atunci când numărul semnalelor de intrare ce trebuie prelucrate este de ordinul zecilor. Conform metodei folosite la realizarea modului *mCOMP*, utilizând registre de deplasare pe 8 biți, ce pot fi conectate în cascadă, cu încărcare paralel, se poate realiza achiziția unui număr nelimitat de semnale de intrare, conform fig. 42.

Unele registre pot fi conținute chiar de sistemul de bază (ACHIZ-1 și ACHIZ-2 pentru 16 semnale digitale $IN\ 1 \div IN\ 16$), iar altele pot fi adăugate sub forma unor module de extensie (ACHIZ3, pentru 8 semnale: $IN\ 17 \div IN\ 24$). Interfața dintre unitatea de bază și modulele de achiziție digitală utilizează doar 3 semnale: două semnale de control și unul de achiziție serială.

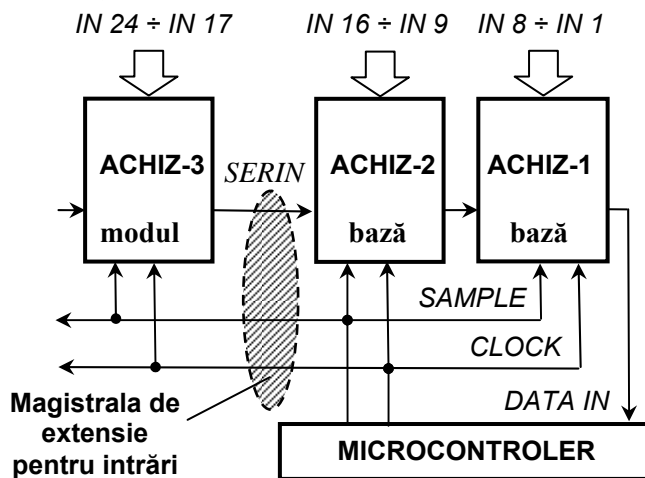


Fig. 42. Magistrala de extensie pentru intrări

7.4. Implementarea generării semnalelor digitale

Aceași condiție de utilizare a unui număr minim de semnale de control, pentru generarea a zeci de semnale numerice, impune utilizarea unei metode particulare asemănătoare celei de pe partea de achiziție. Similar metodei folosite pentru realizarea modului *mCOMP*, utilizând drivere pe 8 biți, cu intrare serială, conectate în cascadă, se poate genera un număr nelimitat de semnale, conform fig. 43.

Registrele GEN-1 și GEN-2 pot fi conținute chiar de sistemul de bază, în timp ce alte registre, precum GEN-3, pot fi cascadate sub forma unor module de extensie. Interfața ce reprezintă magistrala de extensie pentru ieșiri numerice este limitată la două semnale de control (*STROBE* și *CLOCK*) și la un semnal serial de transfer.

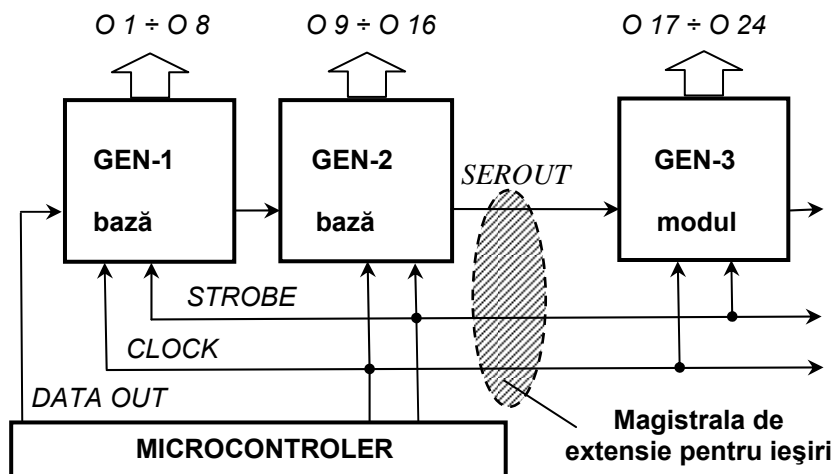


Fig. 43. Magistrala de extensie pentru ieșiri

7.5. Metoda de identificare a modulelor

Prin utilizarea metodelor propuse pentru achiziția și generarea semnalelor numerice, implementarea structurii modulare a sistemelor devine posibilă:

- pentru aplicații mici, proiectantul poate utiliza doar modulul de bază, cu microcontrolerul și software-ul dedicat;
- pentru aplicații mai complexe, proiectantul poate adăuga un număr de m module cu intrări numerice și n module cu ieșiri numerice, ca periferice suplimentare; software-ul corespunzător, dependent de valorile m și n , rulează pe microcontrolerul modulului de bază.

Astfel, pentru orice modificare (cum ar fi adăugarea a 16 canale de intrare sau renunțarea la un modul de ieșire) vor trebui folosite versiuni diferite de software. O astfel de soluție ar păstra dezavantajele, nefiind eficientă din punct de vedere al costurilor și al timpului de implementare.

Soluția propusă evită intervenția proiectantului, prin utilizarea unui software adaptiv, pentru orice valori m și n . Utilizatorul poate decide la fața locului ce număr de canale să utilizeze. Într-un astfel de caz, sistemul trebuie să poată detecta singur numărul și tipul modulelor de extensie conectate la magistrală. Din acest motiv, trebuie adăugat pe magistrala de extensie un sistem de comunicare între modulul inteligent de bază și modulele de extensie. Pentru a păstra un număr redus de semnale, această comunicație trebuie implementată sub formă serială.

Magistrala I²C a fost aleasă datorită capacității sale de a interconecta module printr-o magistrală bidirecțională de 2 fire: o linie de date seriale (SDA) și o linie de tact serial (SCL). Fig. 44 prezintă o comunicație *master – slave* între modulul de bază (implementat cu microcontroler) și un modul de extensie ce conține o memorie serială EEPROM.

Tactul (SCL) este generat de către MSSP-ul (*Master Synchronous Serial Port*) *master*-ului, în timp ce transferul bidirecțional sincron de date se face pe linia de date (SDA). Fiecare modul are o adresă particulară, setată prin conectarea celor 3 biți la "1" sau "0". După o secvență de adresare a tuturor celor 8 module posibile, software-ul ce rulează pe *master* va identifica exact structura hardware: numărul și tipul modulelor de extensie.

Arhitectura generală ce rezultă astfel, cu până la 8 module adiționale, ce pot să difere ca tip și mărime, oferă flexibilitate pentru orice aplicație cu sisteme embedded.

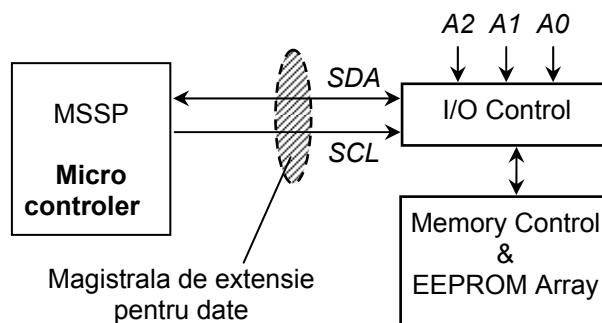


Fig. 44. Magistrala de extensie I²C.

7.6. Modulele de uz general și analogice

Un sistem embedded extins poate avea nevoie, pe lângă modulele cu intrări și cu ieșiri digitale, și de module de extensie analogice și de uz general cum ar fi:

- conversie numeric - analogică cu ieșire analogică pe modulul de extensie,
- conversie analog - numerică (canale suplimentare față de intrările analogice ale microcontrolerului de pe modulul de bază), cu intrare analogică pe modulul de extensie,
- multiplexare sau demultiplexare analogică, controlată numeric de către microcontroler, având pe modulul de extensie atât intrări cât și ieșiri,
- module de uz general, controlate numeric de către modulul de bază etc.

Utilizarea unor astfel de module extinde facilitățile oferite de magistrala de extensie, fără a necesita semnale suplimentare. Magistrala deja existentă oferă 2 soluții pentru astfel de module:

- transferul serial al datelor de la un modul *slave* la *master*, înseriind modulul *slave* împreună cu celelalte module de intrare prin semnalul *SERIN*, și de la *master* spre un modul *slave* înseriat cu celelalte module de ieșire prin semnalul *SEROUT*;
- transferul datelor, independent de celelalte module, utilizând linia de date serială SDA a magistralei I²C.

Pentru implementarea primei soluții este suficientă conectarea la magistrală a unui registru serie-paralel. Cea de a doua soluție necesită o interfață de tip I²C pentru transfer datelor, ce poate fi implementată cu un circuit specializat, compatibil cu magistrala I²C, conform prezentării din paragraful 5.1.2. Circuitul are o adresă proprie, setată prin cei 3 biți A0, A1 și A2, care poate fi aceeași cu adresa modulului, deoarece cele două circuite integrate au biți de adresă proprii diferiți: A3 ÷ A6.

Această a doua soluție, independentă de alte module de extensie, (de intrare sau de ieșire), poate fi implementată pe orice modul de uz general, fără a necesita semnale suplimentare.

7.7. Magistrala de extensie generală

Interconectarea modulelor suplimentare cu sistemul de bază, se poate realiza prin combinarea celor trei magistrale definite:

- magistrala de extensie pentru intrări numerice, cu 3 semnale: *CLOCK*, *SAMPLE* și *SERIN*;
- magistrala de extensie pentru ieșiri numerice, cu 3 semnale: *CLOCK*, *STROBE* și *SEROUT*;
- magistrala de extensie pentru comunicație serială I²C, cu 2 semnale: *SCL* și *SDA*.

Se poate observa că fiecare tip de modul utilizează un semnal de tact, deci este suficientă o singură linie de tact pentru semnalele *CLOCK* și *SCL*. Astfel magistrala de extensie utilizată are doar 6 semnale. Semnalele active pentru fiecare tip de modul sunt marcate în tabelul 2.

Semnalul magistralei	Tipul modului suplimentar		
	Intrare	Ieșire	Analogic
<i>CLOCK</i>	✓	✓	✓
<i>SDA</i>			✓
<i>SAMPLE</i>	✓		
<i>STROBE</i>		✓	
<i>SERIN</i>	✓		
<i>SEROUT</i>		✓	

Tabelul 2. Semnalele magistralei de extensie

Procedura de identificare a modulelor este comună tuturor tipurilor de module și, pe durata acestei proceduri, semnalele *CLOCK* și *SDA* sunt active. Magistrala poate include, de asemenea, și 2 linii de alimentare pentru modulele cu consum mic de putere. Pentru modulele cu un consum de putere mai mare este necesară proiectarea de surse de alimentare individuale, deoarece puterea pe care poate să o furnizeze modulul de bază este limitată.

Sistemul a fost conceput pentru a funcționa în regim *master – slave*, dar permite și configurații *multi-master*, cu o arhitectură multiprocesor ce utilizează mai multe module inteligente.

7.8. Implementarea software

Software-ul rulează pe microcontrolerul modului de bază și conține toate subrutinele necesare activității modulelor suplimentare. Sunt active, însă, doar subrutinele aferente modulelor conectate la sistem. Pentru fiecare tip de module, parametrii subrutinelor depind de numărul de module conectate.

Programul parcurge următorii pași:

- realizează sondarea celor 8 adrese, în scopul identificării modulelor conectate: tipul și numărul pentru fiecare tip;
- activează subrutinele corespunzătoare fiecărui tip de modul: intrare, ieșire, conversie numeric-analogică, multiplexare analogică etc.;
- setează parametrii corespunzători pentru tipurile de module conectate în cascadă: numărul canalelor de intrare sau a celor de ieșire.

Astfel software-ul general, proiectat pentru toate funcțiile posibile, se auto-adaptează la arhitectura particulară definită de cele maxim 8 module adiționale conectate la un moment dat la magistrala de extensie. Astfel software-ul propriu-zis se modifică singur la fiecare nouă conectare sau îndepărtare a unui modul de extensie.

7.9. Implementarea magistralei de extensie

Sistemul modular folosește cele 6 linii ale magistralei de extensie și, opțional, liniile de alimentare sau alte linii de comunicație.

Fiecare modul suplimentar trebuie să se poată conecta la magistrala de extensie și să permită conectarea în continuare a altor module. Astfel fiecare modul va avea doi conectori pentru:

- a permite utilizarea semnalelor necesare de către circuitul în cauză și
- a transfera toate semnalele către modulul următor.

După cum se arată în fig. 45, fiecare modul este conectat printr-o panglică la următorul modul. Semnalele magistralei:

- *CLOCK*, *SDA*, *SAMPLE* și *STROBE* sunt transferate direct, fără a fi întrerupte, și utilizate de modul dacă este cazul, iar
- *SERIN* și *SEROUT* sunt transferate după ce sunt întrerupte pentru operațiile în cascadă.

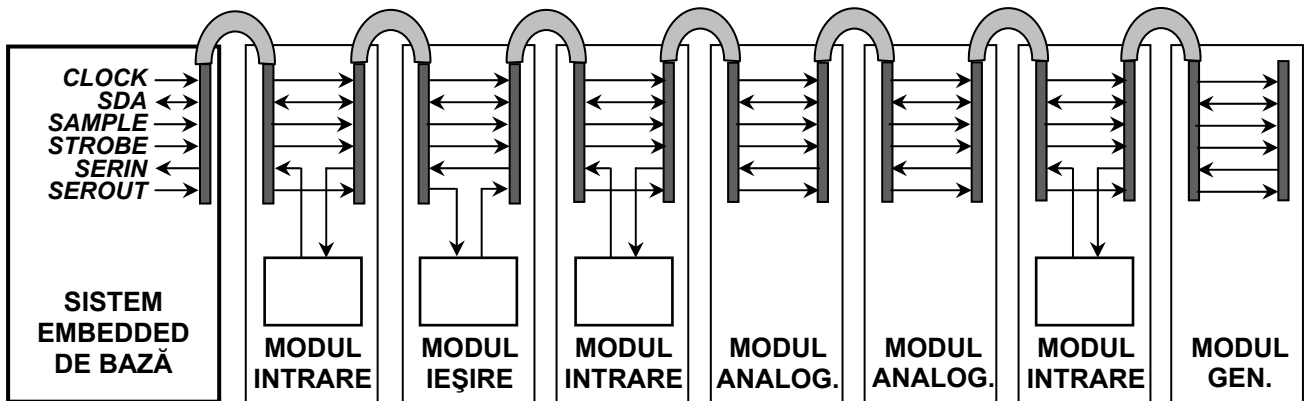


Fig. 45. Implementarea fizică a sistemului embedded modular cu magistrală de extensie

Implementarea minimizează numărul de conexiuni, este independentă de numărul de module și asigură o proiectare PCB eficientă. Aceasta permite conectarea a până la 8 module de extensie, de orice tip și în orice ordine, fără necesitatea modificării software și fără intervenția operatorului pentru reconfigurare.

8. CONCLUZII

Grantul a abordat o temă interdisciplinară, care a stimulat abordarea profesională a cercetării, implicând cunoștințe de electronică, programare, pneumatică și tehnologie industrială. Toate obiectivele asumate prin contractul finanțat de CNCIS au fost atinse în trei faze anuale.

Valoarea tehnică a rezultatelor obținute (precizie, flexibilitate, adaptabilitate) a fost validată de testele efectuate în Germania, pe sisteme reale, la sediul firmei *Delu*, producător de sisteme de transport pe pernă de aer și cofinanțator al cercetării.

Valoarea științifică a rezultatelor a fost validată prin acceptarea spre publicare a mai multor lucrări ce reflectă preocupările și contribuțiile echipei de cercetare.

- Marius Oteșteanu, Florin Alexa: *Proiectarea aplicațiilor în timp real cu procesorul de semnal TMS320C3x*, Editura *Orizonturi Universitare*, Timișoara, 2004
- Marius Oteșteanu: *Embedded system for air-cushion transporter control*, IFAK workshop on Programmable Devices and System, Krakow, Poland, 2004
- Marius Oteșteanu, Aurel Gontean: *Microcontroller applications reconfiguration method and development system*, IFAK workshop on Programmable Devices and System, Krakow, Poland, 2004
- Gheorghe Daniel Popa, Marius Oteșteanu: *Portable PCM Analyzer*, Scientific Bulletin of the *Politehnica University of Timișoara, Transactions on Electronics and Communications*, Tom 49(63), Fasc. 1, 2004
- Marius Oteșteanu, Daniel Criste: *Precision Electronic Driver for Pneumatic Engines*, Scientific Bulletin of the *Politehnica University of Timișoara, Transactions on Electronics and Communications*, Tom 49(63), Fasc. 2, 2004
- Marius Oteșteanu: *Digital input / output extension solution for embedded systems*, microCAD 2005 International Scientific Conference, Miskolc, Hungary, 2005
- Marius Oteșteanu, *Expansion Bus for Modular Embedded Systems*, Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modeling and Simulation (ACMOS '05), Prague, Czech Republic, 2005

Activitatea de dezvoltare a fost concretizată în omologarea unor blocuri electronice de comandă a unui transportor pe pernă de aer, inclusiv a sistemelor integrate hardware – software (*embedded systems*) dedicate:

- modulul de bază *mLENK*, pentru comanda direcției (fig. 46),
- modulul complex *mCOMP*, pentru controlul tuturor funcțiilor unui transportor (fig. 47).

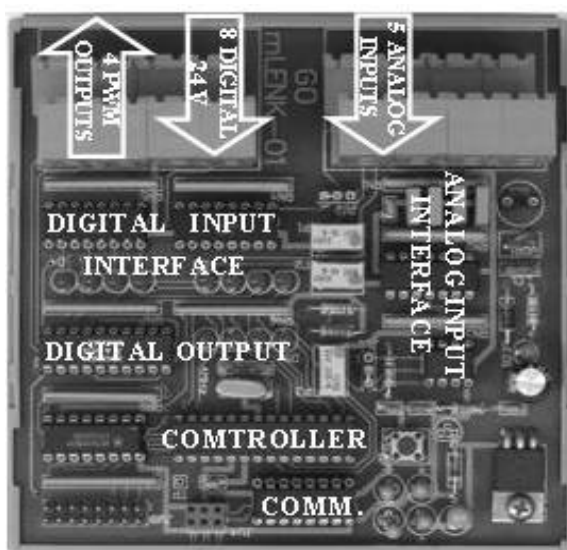


Fig. 46. Modulul *mLENK*

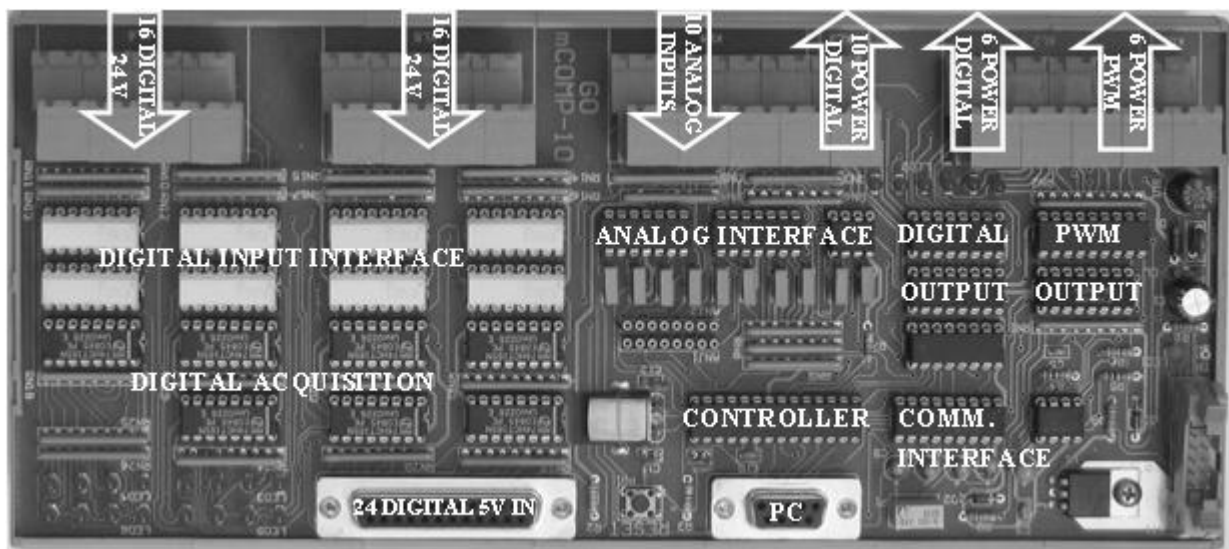


Fig. 47. Modulul *mCOMP*

Prezentul raport de bazază și pe informații conținute în următoarele publicații:

- Calvert, C., J. Phillips and C. Carvert: *Charlie Calvert's C++ Builder 3 Unleashed*, Macmillan Computer Pub., 1998
- Michels, H., H. Handelman: Luftgleitkissen unterstützen die flexible Montage. *Fordern und Heben* 47, Nr. 6, 1997
- Microchip Technology Inc.: *PIC 16F87X Data Sheet, 28/40-pin 8-bit CMOS FLASH Microcontrollers*, 2001
- Microchip Technology Inc.: *Application Development with MPLAB® IDE*, 2003
- Microchip Technology Inc.: *24C01C 1K, 5.0 V, I²C™ Serial EEPROM, DS21201C*, 1999
- Philips Semiconductors: *The I²C-bus Specification, Version 2.1*, 2000
- Philips Semiconductors: *PCF8574 Remote 8-bit I/O expander for I²C-bus*, 2002
- Siemens AG: *SIMATIC S7-200 Programmable Controller, System Manual*, 2004