

# **R A P O R T   Ș T I I N Ț I F I C   Ș I   T E H N I C**

## **ETAPA II – 2015**

**Realizare variantă preliminară documentație de execuție pentru  
subansamble, ale modelului funcțional  
al sistemului de acționare multimotor**

## 1.Rezumatul etapei

### 1.1. Planul de realizare a etapei a prevăzut următoarele:

*Activitatea II.1* Elaborare variantă preliminară documentație de execuție a circuitului intermediar de curent continuu.

*Activitatea II.2* Elaborare variantă preliminară documentație de execuție bloc module invertoare de ieșire și inverter recuperare.

*Activitatea II.3* Elaborare variantă preliminară documentație de execuție pentru unitatea de comandă și control.

### 1.2. Rezultatele așteptate ale etapei sunt cele prevăzute prin planul de realizare, și anume un un *Proiect variantă preliminară model funcțional pentru subansamble ale sistemului de acționare multimotor cu noua arhitectură de comandă*, proiect realizat prin colaborarea dintre CO – ICMET Craiova și partenerul P1 – SC CESI Automation SRL Craiova.

Rezultatele acestei etape au avut ca punct de plecare concluziile din *Studiu privind tehnicile moderne de comandă și control pentru invertoarele de putere și aplicații la sistemele de acționare multimotor*, studiu realizat de către ICMET Craiova în etapa 1, la care se adaugă și experiența acumulată de membrii echipei proiectului în aplicații cu acționări multimotor, aplicații care au fost descrise sintetic în studiul amintit mai sus.

Intr-o descriere centrată pe problemă, putem spune că s-a sintetizat din contextul tehnologic actual privind acționările electrice multimotor o arhitectură de control multimotor, de la care s-a pornit în realizarea proiectului amintit mai sus. La acestea putem adăuga faptul că soluția adoptată este optimală dar flexibilă cu aplicabilitate clară, identificată împreună cu partenerul industrial la momentul detalierei propunerii de proiect și structurării planului de realizare, și anume aplicații în industria mineritului de suprafață.

Practic CO și P1 au structurat și elaborat proiectul general de acționare multimotor în 3 proiecte conform rezultatelor așteptate prin planul de realizare:

- *Proiect variantă preliminară model funcțional al circuitului intermediar de curent continuu*
- *Proiect variantă preliminară model funcțional pentru bloc module invertoare de ieșire și inverter recuperare*
- *Proiect variantă preliminară model funcțional pentru unitatea de comandă și control*

Această structurare este *naturală* atât din prisma componenței sistemului global de acționare multimotor: blocuri de forță, blocuri de comandă, control și comunicație, dar și d.p.d.v. al soluției globale aleasă (ne referim de exemplu, la faptul că circuitul intermediar de c.c. este comun).

În cadrul fiecărui proiect, din cele trei, s-a pornit de la tema de proiectare globală particularizată în cadrul proiectului, s-au prezentat dimensionarea principalelor componente și funcționalitatea lor, lista de materiale cât și simulări numerice pornind de la modelele matematice implementate în Simulink pentru principalele blocuri funcționale.

Iterații de tipul trial and error sunt necesare pentru a evita greșelile grosiere de proiectare, dar și pentru a surprinde o serie de efecte și fenomene complexe, chiar dacă în mediu simulat, care să convergă către o finalitate pozitivă a întregului proiect.

Simulările au urmat linia de la simplu la complex pentru a pune în evidență atât elemente calitative cât și cantitative cu privire la dimensionarea blocurilor componente, dar și a întregului ansamblu de acționare. Schemele de simulare și rezultatele obținute în MATLAB/Simulink, pentru cele 3 proiecte sunt prezentate în 107 figuri, iar un număr relativ mare de simulări cu valori ale componentelor din listele de materiale stabilite prin proiectare, au condus la ideea că dimensionările elementelor de forță dar și a strategiei de conducere împreună cu bucelele de reglare și estimatoarele care se vor implementa în DSP (urmând aproape aceeași structură ca cele implementate în Simulink) sunt corecte, astfel că în etapa 3 se poate realiza execuția propriu-zisă a sistemului de acționare multimotor propus în tema generală de proiectare.

Schemele, cablajele și simularea blocurilor din unitatea de comandă și control, s-au făcut în mediul de proiectare Altium Designer, iar programarea parțială a DSP-ului Microchip în mediul de dezvoltare MPLAB.

Datorită restructurării în 2015 a planului de realizare, proiectele din această etapă sunt variante preliminare, urmând ca în etapa 3, să realizăm forma definitivă împreună cu achiziția completă de echipamente, realizare model funcțional și testările corespunzătoare.

În etapa 3 principalele elemente care vor fi adăugate pentru definitivarea proiectului de acționare multimotor, se referă la organizarea și implementarea algoritmilor de control în rețea, comunicației aferente, iar d.p.d.v. al simulărilor numerice vor fi studiate modele pentru cuplarea multimotor rigidă sau elastică, deci sisteme care vor trebui să asigure aceeași turație sau același cuplu pentru fiecare motor (conform aplicațiilor identificate cu partenerul industrial P1, aplicații pe care le solicită piața internă, dar chiar și cea externă limitofă).

## 2.Descrierea științifică și tehnică a cercetărilor etapei analizate

### 2.1. Proiect variantă preliminară model funcțional pentru subsansamble ale sistemului de acționare multimotor cu noua arhitectură de comandă

Datele tehnice ale Sistemului de acționare multimotor care conține Convertizoare statice de frecvență proiectate cu caracteristici tehnice superioare ce asigură reglarea turației unor motoare asincrone cu rotorul în scurtcircuit între zero și valoarea nominală utilizând algoritmi de control în rețea sunt: Tensiunea de alimentare: 3 x 400Vac / 50Hz; Puterea nominală: 2 x 55KW; Puterea maximă: 1,5 x PN / 2 minute; Temperatura de funcționare: -25°C – 45°C.

Structura echipamentului de acționare multimotor: Redresor trifazat unic și filtru intermediar – 1 bucată; Convertizoare de frecvență 55KW – 2 bucăți; Invertor de recuperare în rețeaua industrială a energiei de frânare – 1 bucată.

Convertizorul static de frecvență cuprinde următoarele subsansamble pe circuitul de forță: punte redresoare; filtru pentru circuitul intermediar; punte invertoare; transductoare marimi electrice.

Convertizorul static de frecvență este protejat la apariția accidentală a următoarelor situații: scurtcircuit; supratensiune în circuitul intermediar; supratemperatură; blocare motor.

Interfața minimală a convertizorului de frecvență conține:

a) Semnalizări pe unitatea de comandă electronică: START, STOP, INTERBLOCARE, DESATURARE, Uintermediar, AVARIE.

b) Semnalizări pe display-ul cu cristale lichide de pe panoul frontal al convertizorului  
Display-ul poate fi configurat să afișeze: starea convertizorului, frecvența de ieșire/frecvența prescrisă, curentul prin motor, tipul avariei, etc.

c) Semnalizări la distanță: semnalizare funcționare invertor "Start"; semnalizare nefuncționare invertor "Stop"; semnalizare defect invertor "Avarie".

d) Comenzi de la distanță: pornire/oprire invertor; schimbarea sensului de rotație; creșterea/scaderea turației motorului de acționare.

Caracteristicile generale ale unui convertizor de frecvență sunt prezentate în tabelul de mai jos.

<b>Marimi de intrare</b>	
Tensiunea de alimentare	3 x 400 V c.a. (+15%; -20%)
Frecvența tensiunii de alimentare	50 Hz ± 2%
<b>Marimi de ieșire</b>	
Puterea nominală de ieșire	55 KW
Capacitate de suprasarcină	1,5 Pn / 30 sec.
Curentul nominal de ieșire	86 A c.a.
Tensiunea de ieșire	reglabila 3 x (0...400 V c.a)
Domeniul de variație a frecvenței	1,5 Hz... 50 Hz (100 Hz)
Componente electronice de putere	tranzistoare IGBT
Timp de accelerare și decelerare	5...180 sec, ajustabil; rampa de accelerare/frânare=150rpm
<b>Marimi de reacție</b>	0...10 V sau 4... 20 mA
<b>Sistem de racire</b>	ventilație forțată
<b>Condiții de mediu</b>	
Zona climatică	climat normal (N)
Altitudinea maximă	1000 m
Temperatura mediului ambiant	-10°C ± +40°C
Umiditate relativă la 25°C	max.80% fără condensare

Schema generală a sistemului de acționare multimotor cu noua arhitectură de comandă este prezentată în Fig. 1. și 2.

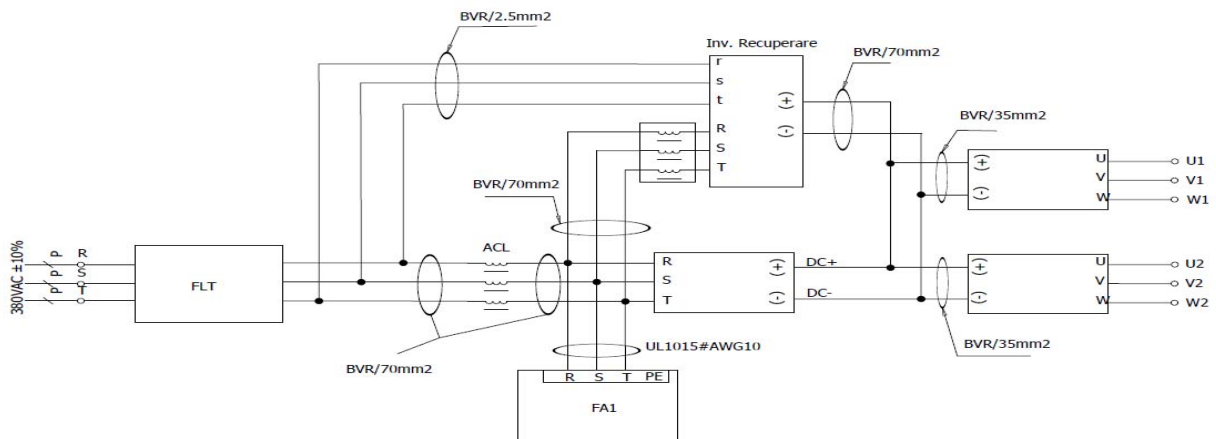


Fig. 1 Schema generală sistem de acționare multimotor: blocuri invertoare, redresor și filtre rețea

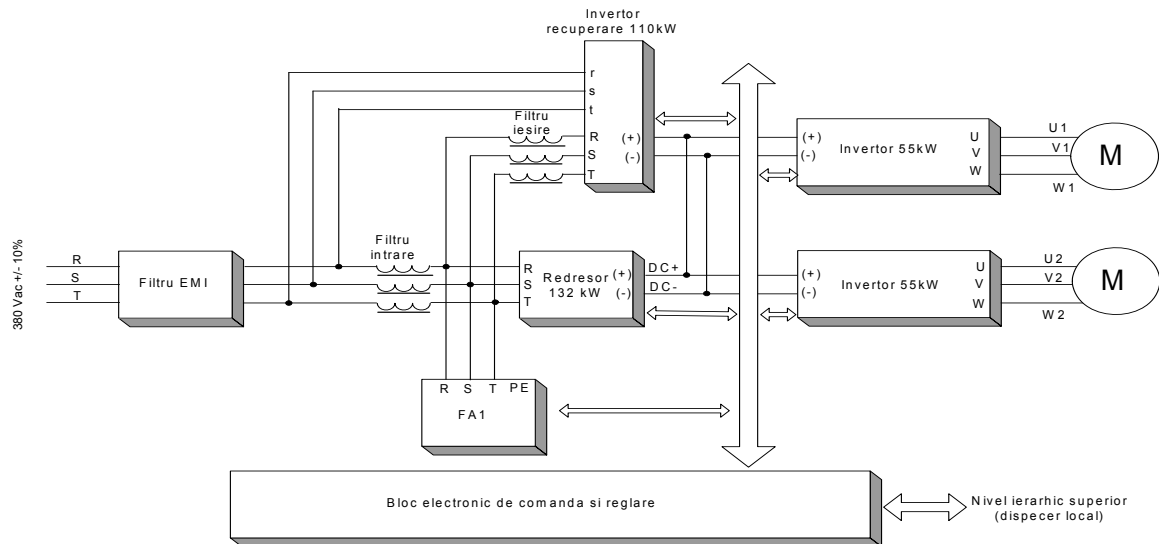


Fig. 2 Schema generală sistem de acționare multimotor: blocuri de forță, de comandă, reglare și comunicație

Sistemul de acționare multimotor va fi utilizat în special în aplicații cu dinamică ridicată și presupune alimentarea individuală a fiecărui motor electric, cu impunerile următoare:

- să utilizeze convertizoare de frecvență identice, de putere corespunzătoare puterii unui singur motor, rezultând de aici posibilitatea interschimbabilității acestora;
- să ecomisească energie electrică prin recuperarea acesteia în rețeaua de alimentare industrială;
- motoarele electrice se încălzesc uniform, indiferent de imperfecțiunile lanțului cinematic;
- instalația să poată funcționa la parametrii corespunzător reduși, în cazul unui defect al unui convertizor de frecvență;
- motoarele electrice să fie protejate de protecțiile propriului convertizor;
- costuri reduse pentru convertizoarele de putere mică sau medie;
- protejarea subansamblurilor lanțului cinematic (reductoare, ambreiaje, etc.).

Echipamentul va fi montat într-un dulap IP 44 care asigură protecția mecano-climatică a componentelor.

Un rol aparte în structura convertizoarelor statice de frecvență îl au filtrele EMC, care au rolul de a realiza compatibilitatea electromagnetică cu rețeaua de alimentare și cu alte echipamente din vecinătate, conform standardelor în vigoare. În acest sens, datorită importanței și multiplelor aplicații posibile ale acționărilor cu turație variabilă IIEE a elaborat standardul IEC 61800 – Acționări electrice de putere cu viteză variabilă, adoptat la nivel european de CENELEC (Comitetul European de Standardizare în Electrotehnică) sub indicativul EN 61800.

În cadrul multiplelor secțiuni ale acestuia se realizează o prezentare completă a cerințelor pe care trebuie să le îndeplinească sistemele de acționare cu motoare electrice alimentate prin convertizoare de frecvență și probelor la care trebuie supuse acestea. Sistemul de acționare multimotor din acest proiect va respecta aceste standarde.

Cele 2 invertoare principale de acționare și inverterul de recuperare energie, vor fi controlate de către un DSP. Fiecare dintre aceste DSP-uri va programat și montat pe câte o placă de comandă.

**Unitatea de comandă și control** a fiecărui inverter trebuie să aibă implementat un algoritm de reglare vectorială, să fie prevăzută cu un microprocesor de semnal cu capacități de memorare și viteză de calcul foarte mari, ceea ce face posibilă rezolvarea, practic în timp real, a modelului matematic al mașinii electrice.

Unitatea de comandă și control permite stabilirea corespondenței dintre parametrii modelului matematic și parametrii modelului real al motoarelor, printr-un program automat de identificare a parametrilor motorului electric a cărui turație trebuie reglată. Programul test al unității de comandă asigură și stabilirea constantelor acționării (constantele reglatoarelor). Parametri motorului electric folosiți în algoritmul de reglare vectorială (rezistența statorică, inductivitatea statorică, inductivitatea mutuală, fluxul de magnetizare) și constantele reglatoarelor sunt vizualizați pe monitorul unui PC sau Laptop, pentru o identificare corectă, cât mai apropiată de valoarea lor din modelul matematic.

La alegerea componentelor necesare pentru implementarea tehnicilor numerice și hibride în conducerea convertizoarelor statice trebuie prevăzute următoarele aspecte:

- puterea de procesare necesară calculului matematic complexe;
- existența unui număr suficient de convertizoare analog-digitale și digital-analogice pentru a putea prelua informațiile de la sistem;
- existența unui număr suficient de mare de ieșiri digitale;
- spațiul de memorie pentru program să poată cuprinde software-ul atât în forma inițială cât și eventualele îmbunătățiri ulterioare;
- memoria RAM să permită folosirea tuturor variabilelor și mărimilor de proces;
- memoria EEPROM să fie suficient de mare pentru a permite salvarea marimilor de control pe perioada când lipsește tensiunea de alimentare;
- mediul de dezvoltare trebuie să fie un limbaj de nivel înalt care să permită dezvoltarea corectă a software-ului, cât și dezvoltarea ulterioară a eventualelor upgrade-uri.

**Electronica de comandă** asigură interfața dintre DSP și echipamentele de forță, și descrie semnalele I/O și de comunicație: Impulsurile PWM; Intrari numerice; Iesiri numerice; Intrari analogice; Comunicația între invertoare pe protocol CANOpen.

#### **Comunicația între invertoare**

În aplicațiile multi-motor este necesară sincronizarea invertoarelor în funcție de tipul sarcinii și a interacțiunii dintre motoare astfel:

- În cazul cuplării rigide a 2 sau mai multe motoare, toate motoarele trebuie să aibă aceeași viteză. În caz contrar vor apărea oscilații ale sistemului datorate faptului că nu toate motoarele dezvoltă cuplu util: unul sau mai multe motoare pot fi antrenate, ceea ce duce la transformarea acestora în generatoare. Acestea nu mai dezvoltă cuplu util ci cuplu rezistiv. Aplicațiile în care se folosește acest tip de sistem sunt: macarale de mare capacitate, lifturi, rotirea suprastructurilor, etc.
- În cazul cuplării elastice a 2 sau mai multe motoare, toate motoarele trebuie să dezvolte același cuplu. Aplicații: benzi transportoare, deplasarea utilajelor cu șenile, etc. Având în vedere că motoarele sunt cuplate cu elemente elastice (benzi de cauciuc, etc.) sau funcționează independent dar acționează asupra aceleiași sarcini, sistemul trebuie să echilibreze cuplul dezvoltat de fiecare motor. Dezechilibrul poate fi generat de următorii factori: uzura neuniformă a elementelor de cuplare, virajul utilajelor care presupune distanțe diferite pentru fiecare șenila, etc. În acest caz viteza motoarelor nu este importantă, ci cuplul dezvoltat de fiecare motor.
- Sisteme complexe, cu minim 3 motoare, 2 fiind cuplate rigid între ele și următoarele cuplate flexibil cu primele. Aceste sisteme impun folosirea ambelor metode de sincronizare: în cuplu și în viteză. Aplicații: benzi transportoare cu stații de acționare distribuite, etc.

Pentru a asigura viteza de comunicație necesară acestor sisteme și siguranța datelor vehiculate, se va implementa protocolul de comunicație CanOpen.

Pentru comunicația cu sistemele de comandă și control (PC, SCADA, etc.) se va implementa protocolul de comunicație Ethernet.

**Procesorul de semnal** pentru controlul in timp real trebuie să asigure: Arhitectură Harvard; Execută 8 operații in fiecare ciclu; Acumulatori pe 40 de biți pentru calcule de mare precizie; Viteza de procesare de până la 70 de MIPS; Modul hardware PWM pentru controlul motoarelor; Convertoare analog – digital cu precizia de 12 biți; 9 numaratoare pe 16 biți; 4 numaratoare pe 32 de biți; Interfață USB; Interfață UART; Interfață SPI; Interfață I<sup>2</sup>C; Interfață ECAN; DMA cu 15 canale.

**Software-ul de comandă și control** pentru sistemul general de acționare multimotor trebuie să fie dezvoltat într-un mediu de dezvoltare integrat (IDE) care să cuprindă o suită de instrumente folosite pentru a dezvolta aplicații, plus debugger încorporat. Acesta trebuie să includă optimizare C / C ++, editor pentru codul sursa, manager de proiecte, debugger, profiler, precum și multe alte caracteristici.

Software-ul dezvoltat pentru aplicația multimotor trebuie să aibă următoarele caracteristici:

- Control vectorial al motoarelor asincrone cu rotorul in scurt-circuit fără senzor de turație (sensorless);
- Identificarea automată a parametrilor electrici ai motorului (Rs, Rr, Ls, Lr, flux, curent de magnetizare) folosind doar parametrii nominali ai motorului (curent nominal, tensiune nominală, turație nominală);
- Stabilitate și răspuns rapid la schimbarea sarcinii motorului;
- Modulație PWM folosind metoda Space Vector pentru limitarea distorsiunilor armonice și folosirea optimă a energiei din circuitul intermediar de curent continuu;
- Implementarea reguletoarelor PI pentru controlul vitezei și a curentului;
- Implementarea unui modul software de comunicație serială pentru comunicarea cu software-ul PC.

Fiecare convertizor de frecvență va alimenta un motor de 45kW, cu caracteristicile: putere activă: 45KW; frecvență: 50Hz; turație nominală: 1470rpm; tensiune: 400V; curent: 84A; factor de putere: 0.88; rezistență stator: 0.041Ω; rezistență rotor: 0.050Ω; inductanță stator/rotor: 0.8 mH; inductanță mutuală: 20.7 mH.

Practic, subansamblele din Fig. 1 și 2 împreună cu cerințele impuse mai sus prin tema generală de proiectare a sistemului de acționare multimotor vor fi abordate în trei proiecte separate descrise mai jos:

## 2.2. Proiect variantă preliminară model funcțional al circuitului intermediar de curent continuu

**Puntea redresoare** transformă tensiunea alternativă trifazată in tensiune continuă pentru circuitul intermediar. Elementele componente alese pentru proiect din gama ofertelor existente pe piață, îndeplinesc următoarele condiții:

- Transfer de căldură prin placa de baza metalică izolată;
- Lipituri sigure pentru o fiabilitate ridicată;
- Conexiuni tip jumătate de punte (half bridge).

### **Filtrul pentru circuitul intermediar**

Este dimensionat sa corespundă frecvenței de comutație din inverter și asigură un factor de pulsație impus al tensiunii și curentului.

In Fig. 3 este prezentată schema electrică a redresorului și a filtrului pentru circuitul intermediar de curent continuu.

Condensatorul de filtrare C7 se incarca prin rezistenta de incarcare R7, iar cand tensiunea masurata de traductorul de tensiune T2 depaseste 80% din valoarea tensiunii nominale de iesire U2, se cupleaza contactorul de scurtcircuitare K. Contactul auxiliar al acestuia, prelucrat in circuitele de comanda, este conditie de validare “ START” pentru convertizoarele de frecventa.

In regimul de franare, energia electrica rezultată, incarca filtrul C7 peste valoarea nominala, iar la depasirea pragului de  $1,2 \cdot U_{2N}$ , porneste automat inverterul de recuperare spre rețeaua industrială.

In oricare din regimurile de lucru, curentul este tinut sub control de unitatea de comanda care primeste informatii de la traductorul de curent T1.

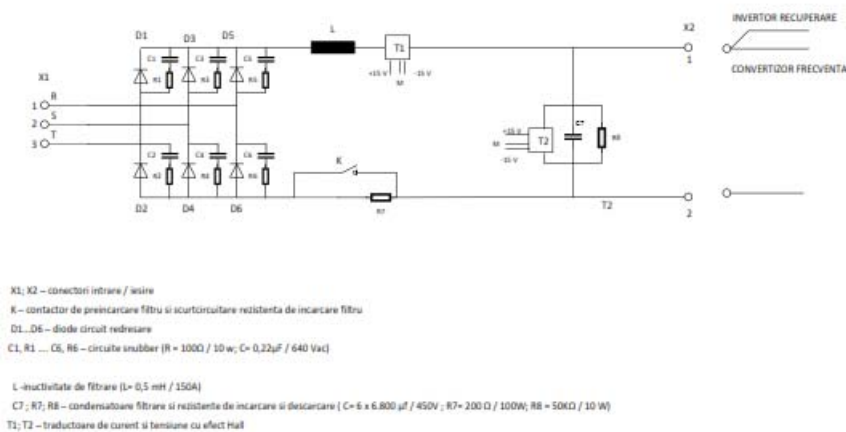


Fig.3 Schema electrică a redresorului și a filtrului pentru circuitul intermediar

**Ventilația:** ventilație forțată cu aer asigurată de 3 ventilatoare de 250m<sup>3</sup>/h. Toate componentele electronice de putere se montează pe radiator de aluminiu și se construiește un canal special de ventilație pentru optimizarea fluxului de aer.

Proiectul conține **Desenul de gabarit** al dulapului în care va fi amplasat redresorul ca parte a convertizorului static de frecvență cu puterea de 55 kW, iar **Lista de materiale** pentru realizarea redresorului și filtrului din circuitul intermediar este prezentată în **Anexa 1**.

Pentru a studia comportamentul unui redresor și al filtrului intermediar înainte de construirea lor propriu-zisă s-au efectuat o serie de **simulări numerice** folosind mediul MATLAB/Simulink.

Construcția unor astfel de echipamente de forță este costisitoare și se impune un studiu în mediu simulat pentru cazul componentelor dimensionate anterior.

Simulările au urmat linia de la simplu la complex pentru a pune în evidență atât elemente calitative cât și cantitative cu privire la dimensionarea redresorului și a filtrului intermediar.

Simulările conțin scheme care pornesc de la faptul că înglobează sau nu condensator de filtrare și se evidențiază undulațiile inacceptabile ale tensiunii redresate în cazul lipsei condensatorului. Sarcinile sunt de diverse tipuri și valori, iar snubberele au valori uzuale pentru gama de puteri studiată în acest proiect. Deoarece redresorul proiectat face parte dintr-un ansamblu mai complex, s-au efectuat și simulări în care au fost înglobate un inverter, un motor de 45kW și unitate de conducere de tip FOC.

Simulările numerice efectuate au pornit de la scheme implementate în Simulink, adaptate obiectivelor acestui proiect, iar parametrizarea elementelor din schemele simulate au ca bază de referință Lista de materiale din Anexa 1.

Un număr relativ mare simulări cu valori în jurul celor din Anexa 1 au condus la ideea că dimensionarea redresorului și a filtrului din circuitul intermediar este corectă, astfel că în etapa 3 se poate realiza execuția propriu-zisă ca subansamblu din sistemul de acționare multimotor propus în tema generală de proiectare.

## 2.3. Proiect variantă preliminară model funcțional pentru bloc module invertoare de ieșire și inverter de recuperare

### Puntea inverter

Transformă tensiunea continuă din circuitul intermediar în tensiune alternativă trifazată de amplitudine și frecvență reglabile. Modulele cu tranzistoare IGBT din componența inverterului sunt comandate de amplificatoare de impuls separate de partea de comandă prin optocuploare. Fiecare amplificator de impuls are sursă proprie de alimentare.

Modulele cu tranzistoare IGBT, alese pentru proiect din gama ofertelor existente pe piață, îndeplinesc următoarele condiții:

- Produse de ultimă generație robuste și sigure în funcționare;
- Placa de baza din cupru izolată utilizând tehnologia DBC (Direct Bonded Copper) ;
- Capacitate crescută de cicluri de putere;
- Cu rezistor de poartă integrat.

**Circuitele driver pentru modulele cu tranzistoare IGBT**, alese pentru proiect din gama ofertelor existente pe piață, îndeplinesc următoarele condiții:

- Pentru module IGBT având tensiunea CE (cu poarta emitor scurtcircuitat) de până la 1200 V;
- Funcționează ca un circuit dublu de drivere pentru IGBT și de asemenea ca două drivere independente;
- Buffere de intrare compatibile CMOS/TTL (HCMOS);
- Protecție la scurtcircuit prin monitorizarea tensiunii CE;
- Oprire ușoară în caz de scurtcircuit;
- Izolare datorată transformatoarelor;
- Monitorizarea subtensiunii de alimentare ( $< 13 \text{ V}$ );
- Semnal de ieșire logic pentru eroare de memorie.

#### **Schema de forță invertoare principale (de acționare motoare)**

Comanda tranzistoarelor de putere din structura invertoarelor (Fig. 4), este realizată cu ajutorul unor module specializate numite drivere. Acestea primesc semnale logice de putere mică de la modulele de comandă cu ieșire PWM, și realizează izolarea galvanică precum și adaptarea în putere a acestor comenzi necesare comutației tranzistoarelor de putere.

Deoarece tranzistoarele IGBT sunt de putere mare, între ieșirea integratului driver-ului și grila MOS a semiconductorului se folosește un etaj de amplificare care poate susține impulsuri de curent importante pentru încărcarea și descărcarea rapidă a capacității grilei. Etajul este realizat cu o pereche de tranzistoare bipolare complementare care pot prelua curenți de colector de până la 15 A. Tranzistorul bipolar se deschide atunci când la ieșirea integratului specializat apare un potențial ridicat. În acest fel va lua naștere un puls de curent a cărui amplitudine este limitată de o rezistență. Sarcinile electrice transportate de acest curent vor încărca rapid capacitatea de grilă a IGBT-ului cu o tensiune pozitivă și îl va deschide. Cu cât amplitudinea pulsului de curent va fi mai mare cu atât timpul de intrare în conducție a IGBT-ului va fi mai scurt. Blocarea IGBT-ului este inițiată atunci când semnalul de ieșire coboară spre valori negative. Astfel, este adus în conducție tranzistorul bipolar complementar care va descărca rapid sarcinile acumulate în capacitatea de grilă, blocând IGBT-ul.

Pentru siguranța funcționării invertoarelor se folosește un bloc specializat de protecție și de tratare a defectului. Acest bloc are rolul de a monitoriza curentul din circuitul intermediar de c.c., de a activa pe cale optică protecția dacă valoarea curentului depășește un anumit prag (protecția la supracurent), de a prelua și memora situațiile de defect, precum și de a bloca semnalele de comandă a IGBT-urilor atât timp cât circuitul de memorare reține defectul.

Când este detectat un supracurent prin IGBT se declanșează o secvență de avarie prin care tranzistorul de putere este blocat mai lent pentru a se evita supratensiuni mari de comutație. Simultan va fi transmis un semnal de defect către un integrat specializat și în același timp va fi alertată structura ierarhic superioară de existența unui defect printr-un semnal logic FAULT. De asemenea există un circuit de supraveghere watch dog privind scăderea tensiunii de alimentare.

Pe durata blocării voite a IGBT-ului, circuitul de detecție al defectului este dezactivat pentru a preveni detecția unor false situații de avarie.

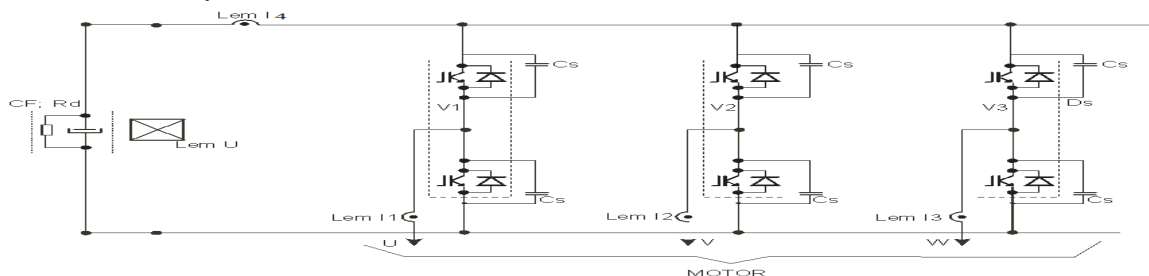


Fig.4 Schemă de forță invertoare principală

#### **Schema de forță invertoare de recuperare**

Invertoare de frânare regenerativă (Fig. 5) asigură preluarea surplusului de energie din circuitul intermediar al convertizoarelor, pe perioada în care motoarele sunt frânate, și injectarea acesteia în rețeaua de alimentare de joasă tensiune în fază cu aceasta.

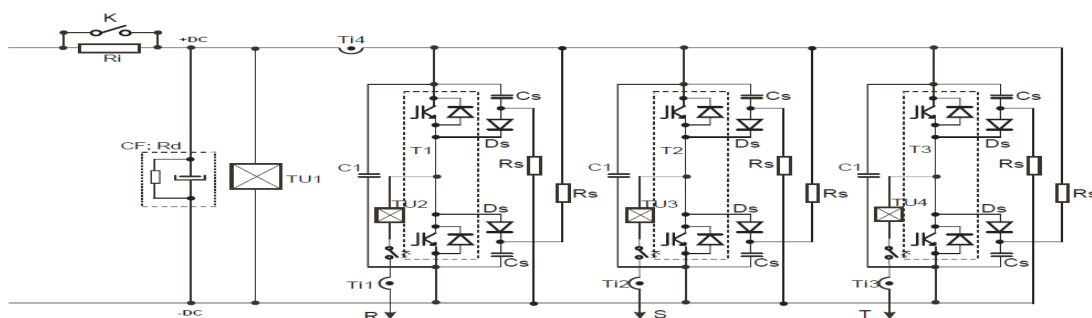


Fig. 5 Schemă de forță inverter de recuperare

Energia injectată este disponibilă pentru alimentarea altor consumatori cuplați la aceeași rețea. Prin utilizarea acestei metode se elimină chopperle de frânare și rezistențele adiacente utilizate în acționările clasice cu convertizor de frecvență. Se elimină astfel un element care produce pierderi de energie prin disiparea acestora pe rezistențele de frânare și inconvenientele legate de aceasta (încălziri excesive ale rezistențelor, posibilitatea distrugerii chopperului de frânare în cazul întreruperii unei rezistențe sau a cablului de legătură, etc.).

**Ventilația:** ventilație forțată cu aer asigurată de 2 ventilatoare de 250m<sup>3</sup>/h pentru fiecare din invertoarele principale și de 3 ventilatoare de 250m<sup>3</sup>/h pentru inverterul de recuperare.

Toate componentele electronice de putere se montează pe radiator de aluminiu și se construiește un canal special de ventilație pentru optimizarea fluxului de aer.

Proiectul conține **Desenul de gabarit** al dulapurilor în care vor fi amplasate invertoarele principale și de recuperare iar **Lista de materiale** pentru realizarea invertoarelor principale și de recuperare este prezentată în **Anexa 2**.

**Simulările numerice** efectuate au pornit de la scheme implementate în Simulink, adaptate obiectivelor acestui proiect, iar parametrizarea elementelor din schemele simulate au ca bază de referință Lista de materiale din Anexa 2.

Este prezentată o schemă de bază implementată în Simulink pentru studiul IGBT-urilor, precum și parametrizarea caracteristicilor de funcționare pentru un IGBT folosind mediul MATLAB. Caracteristicile de funcționare la 25°C și 125°C pentru diverse valori ale tensiunii de grilă-emitor pentru IGBT-urile din invertoarele de acționare sunt prezentate, folosind Simulink-ul, împreună cu rezultatele simulării pentru IGBT-urile din inverterul de recuperare.

Se poate constata o bună concordanță între caracteristicile obținute prin simulare și cele date în catalogul firmei producătoare Infineon, fapt ce validează într-o primă aproximație simulările ulterioare care se bazează pe modelul IGBT din Simulink.

Se prezintă un model Simulink care urmărește evoluția pe 200ms a tensiunii redresate, a tensiunii între fazele inverterului și a tensiunii filtrate (Fig. 6) dar și a curenților prin diode (Fig. 8), în cazul în care în schemă este prezent redresor și un inverter care alimentează o sarcină de 45kW. În fig. 7 este prezentată o analiză FFT a tensiunii pe sarcină, din care se remarcă o filtrare bună, în care THD = 2,29%.

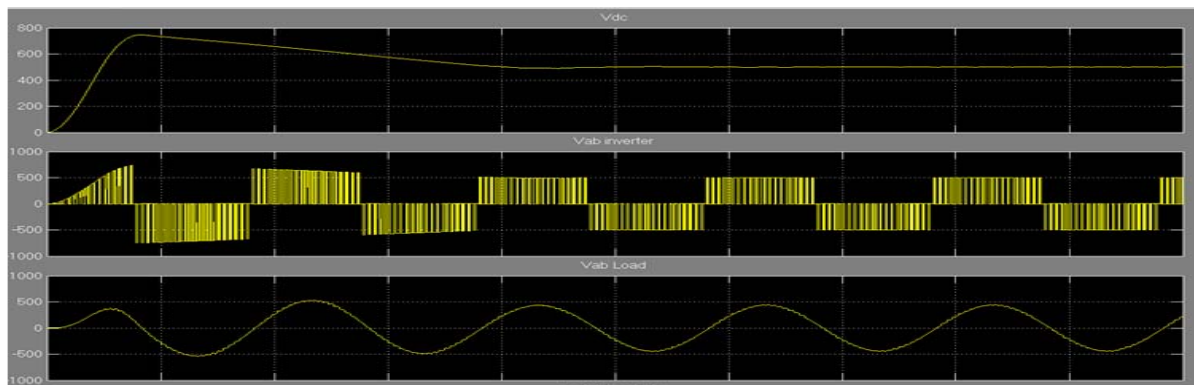


Fig. 6 Tensiunea din circuitul intermediar de cc, tensiunea între 2 faze ale inverterului și tensiunea pe sarcină - pentru C=8400 uF

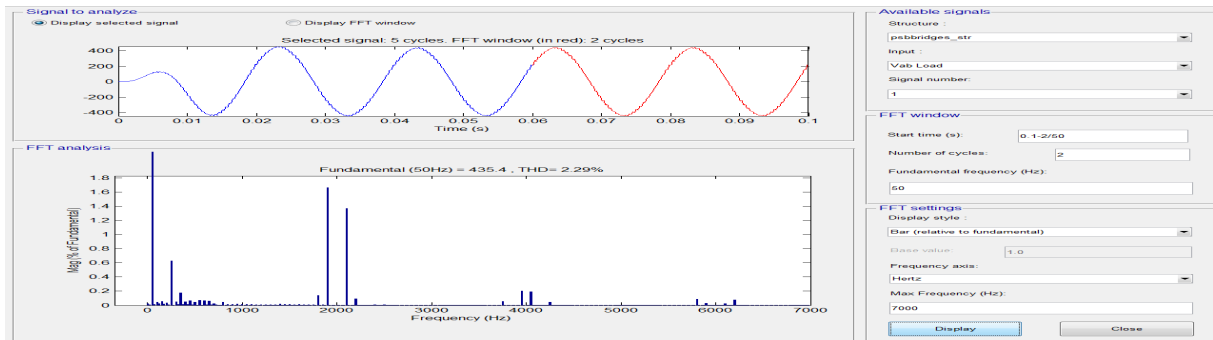


Fig. 7 Tensiunea pe sarcină și analiza FFT

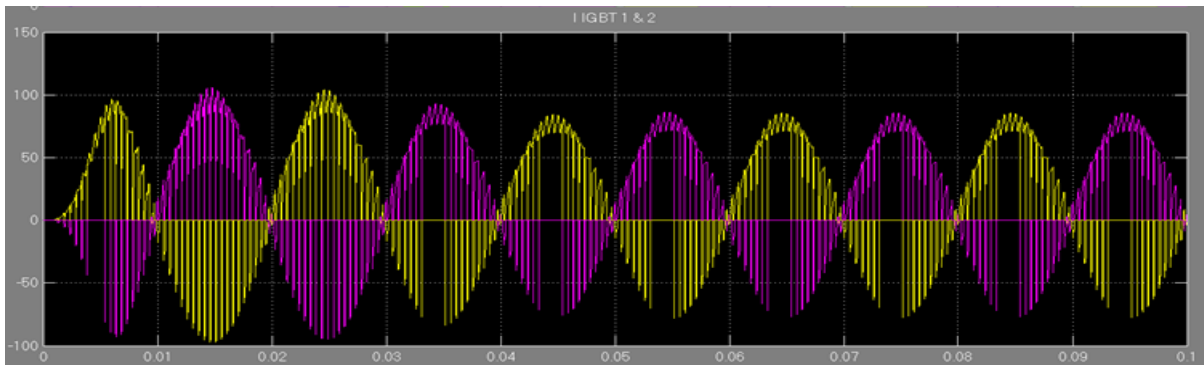


Fig. 8 Curenții prin IGBT-uri

Un număr relativ mare simulări cu valori în jurul celor din Anexa 2 au condus la ideea că dimensionarea inverterului este corectă, astfel că în etapa 3 se poate realiza execuția propriu-zisă ca subansamblu din sistemul de acționare multimotor propus în tema generală de proiectare.

### 2.3. Proiect variantă preliminară model funcțional pentru unitatea de comandă și control

#### Proiectare hardware

În proiect sunt descrise interfețele de semnale I/O și de comunicație: Impulsurile PWM; Intrari numerice; Iesiri numerice; Intrari analogice; Comunicatia între invertoare pe protocol CANOpen.

De exemplu pentru Impulsurile PWM, pentru a obtine o modulație optima, SpaceVector, comanda tranzistoarelor IGBT se face în pereche. Impulsurile PWM se aliniază la centru. Frecvența de comutație este 4kHz, iar indicele de modulație  $m=0,9$ .

Pentru a adapta semnalul PWM de la DSP către driverele IGBT-urilor, se va folosi o schemă similară cu cea din Fig. 9.

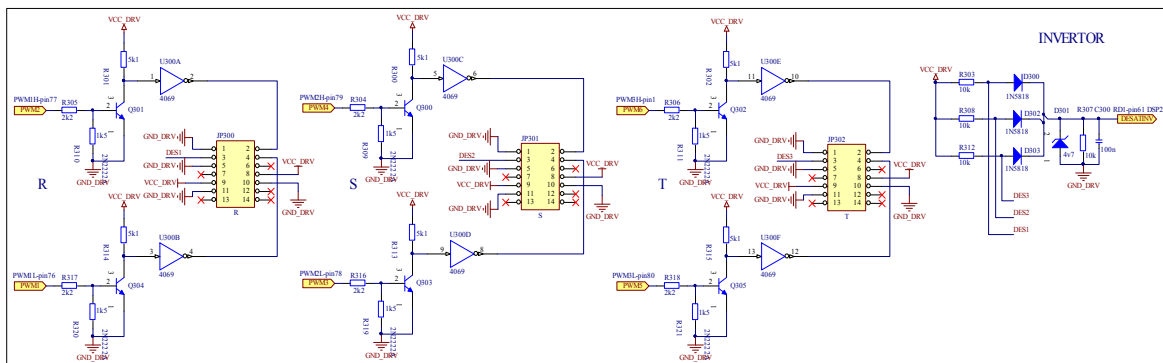


Fig.9 Adaptare semnale PWM generate de DSP

**A fost ales Procesorul de semnal (DSP) dsPIC33EP810MU810, produs de firma Microchip pentru a echipa UCC a fiecărui inverter din sistemul de acționare multimotor SAMREC.**

Acest DSP îndeplinește toate specificațiile impuse în tema de proiectare privind arhitectura, capacitățile de calcul paralel, interfațările cu alte periferice, inclusiv comunicația în rețea.

Modelul 3D al plăcii electronice de comandă a fost realizat folosind mediul de proiectare electronică Altium Designer. Analizarea modelului de mai sus a permis verificări funcționale și de proiectare fără a fi necesară lansarea în producție a PCB-ului în această etapă.

*Cablajul imprimat* : s-a realizat conform standardelor internaționale :

- SR CEI 60050(541):1995 Vocabular electrotehnic internațional. Capitolul 541: Circuite imprimate

- SR EN 60097:1996 Sisteme grilă pentru circuite imprimate

- SR EN 60194:2007 ver.eng. Proiectarea, fabricarea și asamblarea plăcilor imprimate.

Termeni și definiții:

- SR EN 61182-2-2:2013 ver.eng. Produse pentru plăci imprimate echipate.

Date descriptive de fabricație și metodologia de transfer. Partea 2-2: Cerințe intermediare pentru implementarea fabricației plăcilor imprimate

- SR EN 61188-1-1:2003. Plăci imprimate și plăci imprimate echipate. Proiectare și utilizare. Partea 1-1: Cerințe generale. Considerații privind planeitatea ansamblelor electronice

- SR EN 61188-5-8:2008 ver.eng. Plăci imprimate și plăci imprimate echipate. Proiectare și utilizare. Partea 5-8: Considerații privind fixarea (pastilă/îmbinare). Componente matriceale (BGA, FBGA, CGA, LGA)-utilizare. Partea 1-2: Cerințe generale. Impedanță controlată.

- SR EN 61188-5-5:2008 ver.eng. Plăci imprimate și plăci imprimate echipate. Proiectare și utilizare. Partea 5-5: Considerații privind fixarea (pastilă/îmbinare).

**Schema electronică de comandă (preliminară) este prezentată în Anexa 3.**

Este prezentat în proiect **Cablajul imprimat (preliminar)** pentru placa de comandă care conține DSP-ul, iar **Lista de materiale** pentru realizarea unei plăci de comandă a invertoarelor principale este prezentată în **Anexa 4.**

### Proiectare software

Software-ul de comandă și control pentru sistemul general de acționare multimotor este dezvoltat în MPLAB, și îndeplinește toate specificațiile impuse în tema de proiectare privind organizarea și funcționalitatea modulelor software care asigură controlul vectorial FOC sensorless și algoritmi de conducere în rețea pentru sincronizări în frecvență și cuplu (în funcție de specificul aplicației globale de acționare multimotor).

Pentru ușurarea dezvoltării și a depanării/modificării ulterioare, software-ul de comandă și control a fost împărțit în următoarele module/funcții:

- **init**: configurează regiștrii și limitele pentru convertoarele analog-numerice;
- **Clarke**: calculează transformata Clarke;
- **Control**: configurează microprocesorul;
- **eCAN**: configurează și activează comunicația cu DSP-urile altor invertoare;
- **Ether**: configurează comunicația Ethernet;
- **iPark**: calculează transformata Park inversa;
- **Measure**: efectuează operațiile de citire a porturilor (analog sau digital) și de conversie a mărimilor;
- **Park**: calculează transformata Park;
- **PI**: definește, configurează și lansează regulatoarele PI;
- **Estim**: acest modul estimează viteza motorului și calculează frecvența și unghiul curentului de magnetizare ;
- **Open**: modul folosit pentru calcule împreună cu modulul Estim;
- **SVgen**: generează impulsurile PWM conform metodei SVPWM;
- **Timer**: configurează regiștrii interni și pornește numărătoarele;
- **MAIN**: bucla principală de program.

Pentru fiecare dintre aceste module sunt prezentate în proiect caracteristici funcționale și sunt prezentate implementări parțiale din codul sursă.

Sunt prezentate în proiect și vizualizări pe osciloscop a impulsurilor PWM generate de DSP, cât și implementarea unui dead-time de 2μs pentru evitarea intrării simultane în conducție a tranzistoarelor de pe aceeași fază.

În anexele proiectului sunt prezentate elemente de implementare a controlului sensorless, estimatoarele de flux și viteză conform documentației DSP-ului firmei Microchip, elemente care au fost respectate în implementarea modulelor soft în cadrul proiectului de acționare multimotor SAMREC.

Pentru a studia comportamentul sistemului convertizor de frecvență plus motor înainte de construirea propriu-zisă a convertizorului s-au efectuat o serie de **simulări numerice** folosind mediul MATLAB/Simulink.

S-au efectuat simulări în care au fost înglobate un convertizor cu strategia de conducere de tip FOC și un motor de 45kW.

Simulările au urmat linia de la simplu la complex pentru a pune în evidență atât elemente calitative cât și cantitative cu privire la comportarea dinamică globală.

S-au efectuat atât simulări pentru cazul în care structura globală conține un encoder pentru informația de viteză, cât și pentru cazul în care abordarea este sensorless iar implementarea unor estimatoare de stare este strict necesară.

Practic s-au evidențiat două direcții de cercetare privind estimatoarele: prima este direcția dată de estimatoarele indicate de firma producătoare a DSP-ului Microchip (o implementare parțială de cod pentru un astfel de estimator de viteză, este prezentată în Anexa 5), iar cea de-a doua direcție este dată de estimatoarele implementate în Simulink, și prezentate pe larg în [8], cartea lui Bose B. K.: *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA, 2002.

Parametrizările din simulările prezentate în proiect folosesc valorile stabilite în proiectele anterioare pentru redresor, filtru intermediar și inverter. Obiectul condus este un motor de 45kW din gama aplicațiilor uzuale asupra cărora se concentrază acest proiect pe ansamblu. Simulările numerice efectuate au pornit de la scheme implementate în Simulink, adaptate obiectivelor acestui proiect. Un număr relativ mare de simulări cu valori ale componentelor din listele de materiale stabilite în cele 3 proiecte, au condus la ideea că dimensionările elementelor de forță dar și a strategiei de conducere împreună cu buclele de reglare și estimatoare implementate în DSP sunt corecte, astfel că în etapa 3 se poate realiza execuția propriu-zisă a sistemului de acționare multimotor propus în tema generală de proiectare.

Modul de comandă vectorială ales este de tip FOC (vezi Fig. 10) și sunt prezentate parametrizarea reguletoarelor de viteză, de flux, de curent, rampa de accelerare/frânare, filtre și limitări, cât și parametrizarea motorului, redresorului, inverterului, filtrului intermediar și a chopperului de frânare. În aplicația multimotor propusă în tema generală de proiectare în locul chopperului de frânare folosit în simulări va fi folosit un inverter de recuperare a energiei.

Deasemenea sunt prezentate schemele generale de control, ale controlerelor de viteză și FOC implementate în Simulink, ale controlerelor de flux și curent, transformările de coordonate și de calcul ale poziției rotorului, modelele discrete electric și mecanic pentru un motor electric, modelul discret pentru un chopper și f.d.t. ale blocurilor din Simulink cu parametrii concreți ai motorului din aplicația prezentată.

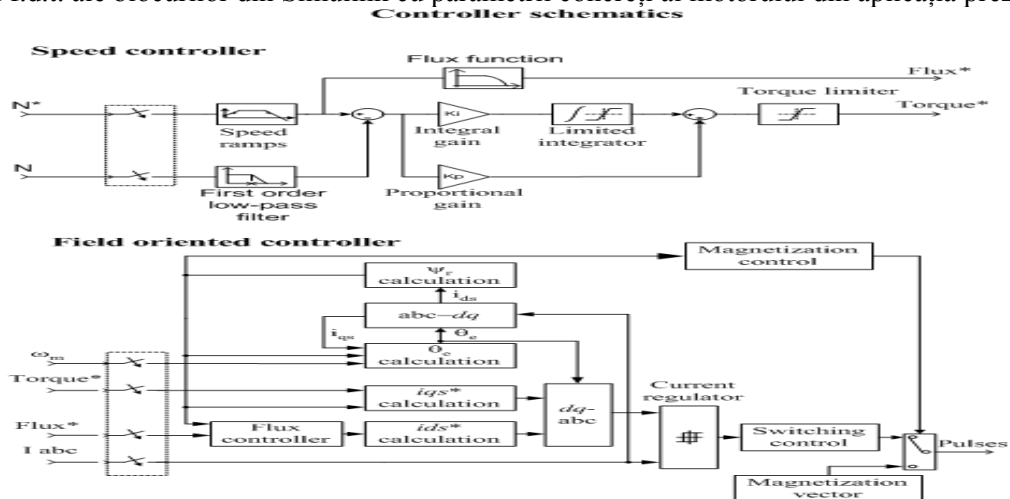


Fig. 10 Schema generală de control implementată în Simulink

În simulările prezentate, în varianta cu encoder, se va urmări comportamentul ansamblului convertizor plus motor prin mărimile: curent stator, viteza rotorului, cuplu și tensiunea din circuitul intermediar.

Parametrii care au fost variați au fost: pentru regulatorul de viteză  $K_p$  și  $K_i$ , pentru regulatorul de flux  $K_p$  și  $K_i$ , rampa de accelerare/frânare și banda de hysterezis pentru regulatorul de curent.

Acordările reguletoarelor de tip PI s-au făcut pornind de la parametrii și modelele discrete prezentate mai sus. Este evident că acordarea reguletoarelor din DSP va fi puțin diferită de cea obținută prin simulare, datorită faptului că simulările nu pot surprinde absolut toate modurile și dinamicile din realitate, dar tabloul calitativ se păstrează cu siguranță, iar rezultatele bune obținute în simulări și implementarea unor algoritmi în DSP care urmează linia celor din Simulink constituie garanția că și modelul real care se va construi în etapa 3 va funcționa cu rezultate bune.

Parametrii reali ai motorului pot varia în timp față de cei nominali (în special datorită temperaturii), astfel că prin simulare, se constată că reguletoarele au o acordare bună chiar pentru o variație substanțială a acestora în jurul valorilor nominale.

Se obține acordarea optimă a reguletoarelor și se prezintă simulările pentru referințe variabile de cuplu și viteză (vezi Fig. 11-12).

În Fig. 11 referința variabilă de viteză este dată de secvența:

$[0 \ 0.5 \ 2 \ 4 \ 7 \ 8 \ 9]s \rightarrow [0 \ 150 \ 300 \ 500 \ 350 \ 450 \ 700]rpm$ .

Pe lângă performanțele dinamice bune obținute datorită acordării corecte a reguletoarelor (eroare staționară, timp de răspuns, timp de creștere, suprareglaj și indice de oscilație), se constată că la secunda 7 când referința de viteză scade de la 500rpm la 350rpm, apare fenomenul de frânare recuperativă și tensiunea în circuitul intermediar crește. În Simulink pentru a surprinde acest fenomen am setat chopperul de frânare între limitele 750V (Activation Voltage) și 650V (Shutdown Voltage). În implementarea reală în locul chopperului de frânare se va utiliza un invertor de recuperare a energiei.

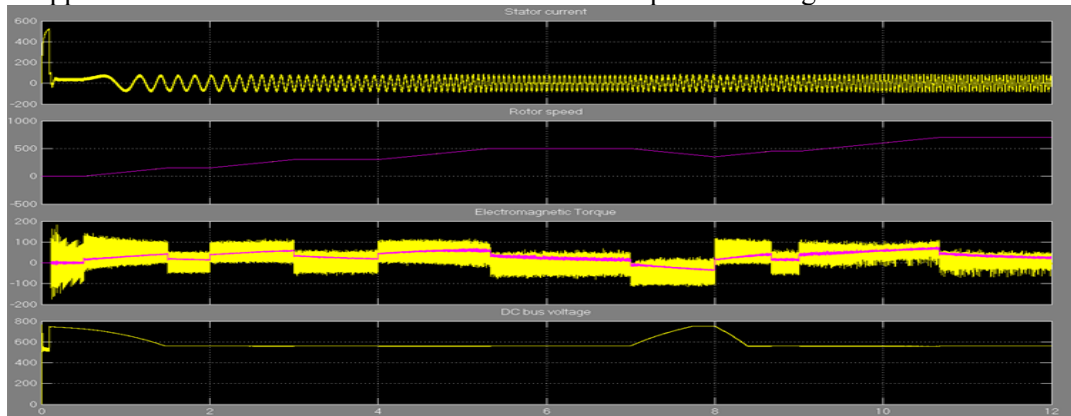


Fig. 11 Rezultate simulare model în care pentru regulatorul de viteză  $K_p=300$ ,  $K_i=2000$ , pentru regulatorul de flux  $K_p=100$ ,  $K_i=30$ , Banda hysterezis reglator curent= 10A, acc=150rpm și cu impunerea referinței de viteză  $[0 \ 0.5 \ 2 \ 4 \ 7 \ 8 \ 9]s \rightarrow [0 \ 150 \ 300 \ 500 \ 350 \ 450 \ 700]rpm$

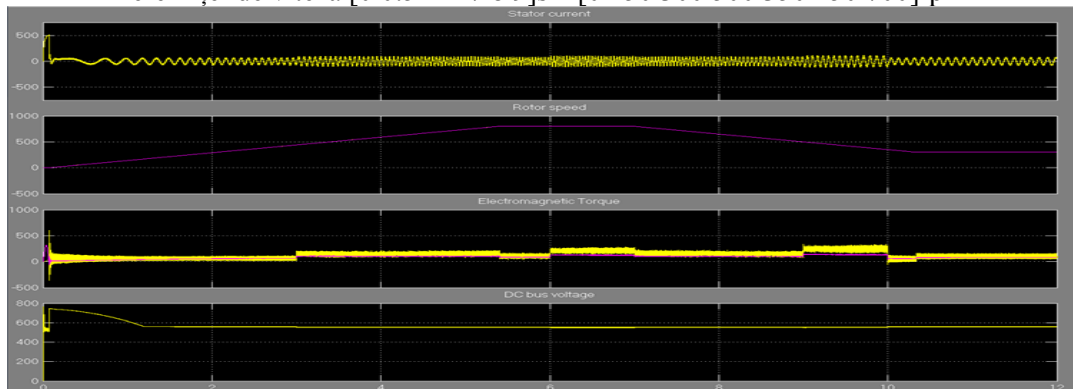


Fig. 12 Rezultate simulare model în care pentru regulatorul de viteză  $K_p=300$ ,  $K_i=2000$ , pentru regulatorul de flux  $K_p=100$ ,  $K_i=30$ , Banda hysterezis reglator curent= 10A, acc=150rpm și cu impunerea referinței de viteză  $[0 \ 7]s \rightarrow [800 \ 300]rpm$  și cuplu  $[0 \ 3 \ 6 \ 9 \ 10]s \rightarrow [10 \ 100 \ 200 \ 300 \ 100]Nm$

În varianta **sensorless** a modelului convertizor plus motor se constată prezența suplimentară, față de modelul anterior, a unui bloc estimator. Tipul de estimator al vitezei unghiulare este MRAS – Model

Referencing Adaptive System. Se renunță astfel la encoder, iar viteza unghiulară este estimată din măsurile de curenți și tensiuni. Se prezintă Estimatorul de viteză MRAS implementat in Simulink și descris pe larg in [8].

Folosind criteriul de hiperstabilitate Popov, pentru a se obține stabilitatea asimptotică globală se obține un estimator de forma[8]:

$$\hat{\omega}_r = \xi \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right), \text{ unde } \xi = \hat{\Psi}_{dr}^s \Psi_{qr}^s - \Psi_{dr}^s \hat{\Psi}_{qr}^s.$$

Schema bloc a estimatorului MRAS – Model Referencing Adaptive System este prezentată in figura 13.

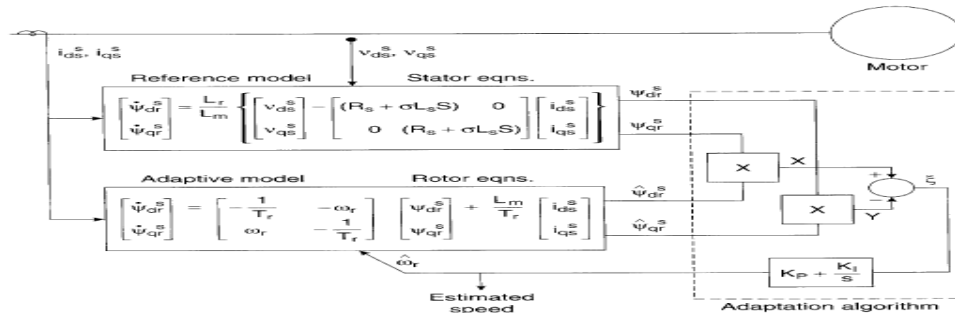


Fig. 13 Schema bloc a estimatorului MRAS

In simulările prezentate în varianta sensorless, se va urmări comportamentul ansamblului convertizor plus motor prin mărimile: curent stator, viteza rotorului, cuplu și tensiunea din circuitul intermediar.

Parametrii care au fost variați au fost: pentru regulatorul de viteză  $K_p$  și  $K_i$ , pentru regulatorul de flux  $K_p$  și  $K_i$ , rampa de accelerare/frânare și banda de histerzis pentru regulatorul de curent. In plus față de cazul cu encoder, pentru estimatorul care este implementat în jurul unui regulator PI, apar parametrii de acordare  $K_p$  și  $K_i$  ai regulatorului din MRAS.

Acordările reguletoarelor de tip PI s-au făcut pornind de la parametrii și modelele discrete prezentate mai sus. Datorită faptului că estimatorul trebuie să lucreze mai rapid decât bucele exterioare de reglare (de viteză și flux), dacă se pastrează parametrii de acordare pentru regulatorul de viteză ca în cazul cu encoder se obține un răspuns nesatisfăcător. Astfel micșorând substanțial valorile de acordare pentru regulatorul de viteză (să fie mult mai mici decât cele ale regulatorului din estimator), este obținută acordarea optimă. In Fig. 14 și 15 se prezintă simulările pentru referințe variabile de cuplu și viteză. Datorită acordării corecte a reguletoarelor se obțin performanțe dinamice bune (eroare staționară, timp de răspuns, timp de creștere, suprareglaj și indice de oscilație).

Atât în simulări cât și în implementarea reală din DSP-uri, o atenție specială se acordă fenomenului de saturație al blocurilor componente. Pentru bucele de reglare se implemtează componente de limitare și anti wind-up în reguletoarele PI.

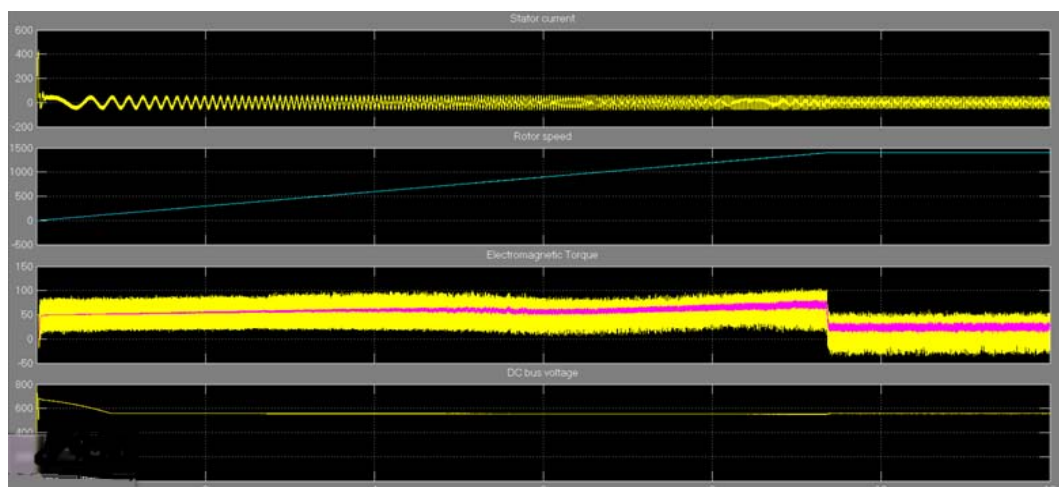


Fig. 14 Rezultate simulare model sensorless cu parametrizarea in care pentru regulatorul de viteză  $K_p=30$ ,  $K_i=20$ , pentru regulatorul de flux  $K_p=100$ ,  $K_i=3$ , Banda hysterezis reglator curent= 10A, acc=150rpm, reglator estimator de viteză cu  $K_p=5000$  și  $K_i=50$  și impunerea referinței de viteză  $[0 \ 12]s \rightarrow [1400 \ 1400]rpm$

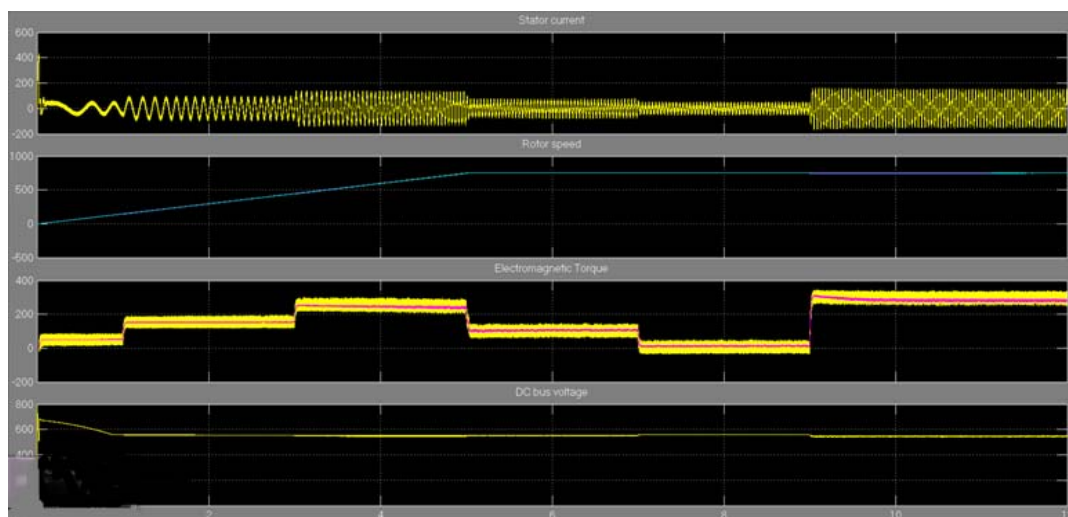


Fig. 15 Rezultate simulare model sensorless cu parametrizarea in care pentru regulatorul de viteză  $K_p=30$ ,  $K_i=20$ , pentru regulatorul de flux  $K_p=100$ ,  $K_i=3$ , Banda hysterezis regulator curent= 10A, acc=150rpm, regulator estimator de viteză cu  $K_p=5000$  și  $K_i=50$  și impunerea referinței de viteză  $[0 \ 12]s \rightarrow [750 \ 750]rpm$  și cuplu  $[0 \ 1 \ 3 \ 5 \ 7 \ 9 \ 12]s \rightarrow [0 \ 100 \ 200 \ 100 \ 0 \ 300 \ 300]Nm$

## Concluzii

Rezultatele așteptate ale etapei sunt cele prevăzute prin planul de realizare, și anume un *Proiect variantă preliminară model funcțional pentru subansamble ale sistemului de acționare multimotor cu noua arhitectură de comandă*. Considerăm ca gradul de realizare al obiectivelor acestei etape este de 100%. Astfel prin stabilirea unei *arhitecturi noi de sistem de acționare multimotor cu turație variabilă și cu recuperarea în rețea a energiei de frânare individuale*, în etapa I, și prin realizarea proiectării în etapa a II-a, se poate spune ca sunt îndeplinite toate elementele necesare continuării proiectului cu etapa a-III-a care prevede: *Definitivare documentație de execuție, realizare și testare modelul funcțional al sistemului de acționare multimotor*. Pentru diseminarea rezultatelor obținute, s-a realizat un site al proiectului, care este actualizat cu rezultatele obținute în fiecare etapă, iar acesta este disponibil la adresa: <http://www.icmet.ro/SAMREC/index.html>, la care se adaugă permanenta preocupare atât a coordonatorului ICMET Craiova cât și a partenerului industrial CESI Automation Craiova, de a populariza rezultatele proiectului în rândul potențialilor beneficiari. În etapa următoare sunt prevăzute publicarea de articole și depunerea unei cereri de brevet de invenție în legătură cu rezultatele proiectului.

### Anexa 1 Lista materiale redresor și circuit intermediar

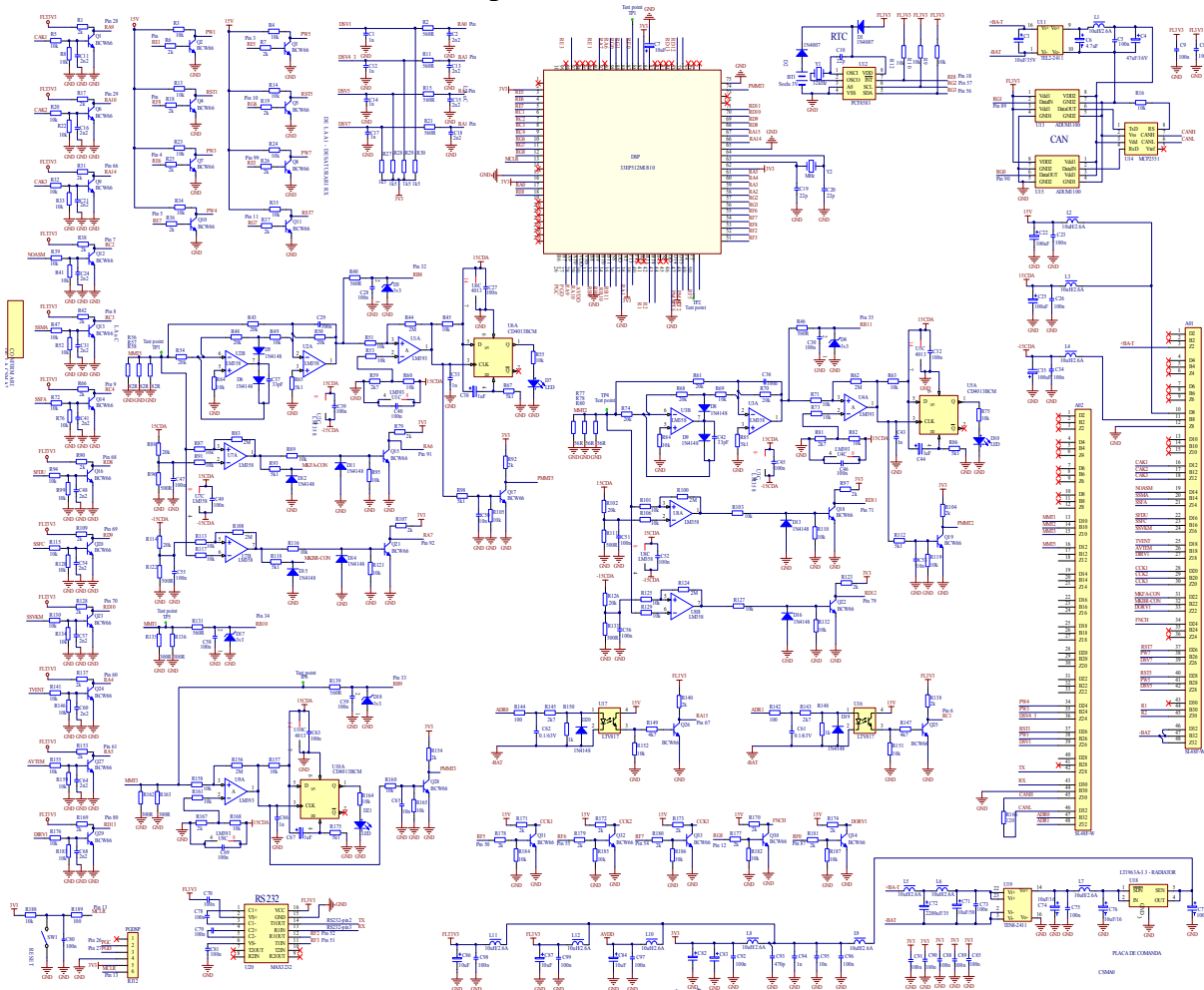
Nr. crt.	Simbol	Denumire	Caracteristici tehnice	Cod	Buc.	Producator
1	D1 .. D6	Modul dioda redresoare	160A / 2200V	DD160N	6	Infineon
2	C2	Condensator electrolitic in carcasa de aluminiu	5600 $\mu F$ / 450 V	LCN2W562M	2	NICHICON
3	T1	Traductor de curent Hall	$I_{PN} = 500 \text{ A}$ $I_{PM} = \pm 1500 \text{ A}$ $U_a = \pm 15 \text{ V}$	HAT 500-S	1	LEM
4	T2	Traductor de tensiune	$U_{PN} = 10 \dots 500 \text{ V}$ $I_{PN} = 10 \text{ mA}$	LV 25-P-1000	1	LEM
5	K	Contactor preincarcare circuit intermediar	600 A / 400 V	NDC1	1	NADER
6	C1 .. C6	Condensator snubber	0.22 $\mu F$ / 640 Vac	B32656S	6	TDK
7	R8	Rezistenta filtru intermediar	50 k $\Omega$ / 10 W		1	TE CONNECTIVITY
8	R7	Rezistenta pre-incarcare	200 $\Omega$ / 100 W		1	TE CONNECTIVITY
9		Sursa in comutatie 3.3Vdc	3.3V / 2A		1	Traco
10		Sursa in comutatie	24V / 2A		1	Traco

		24Vdc				
11		Ventilator	250m <sup>3</sup> /h		3	
12		Placa de comanda	uC PCB		1	Cesi
13		Bare de cupru	Pentru conexiunile de forta interne		1 SET	
14		Izolator tip Nomex	Pentru executia panourilor multistrat		3ml	
15		Placa borne de forta	Pentru conexiunile de forta externe		1 set	
16		Cleme comanda	Pentru conexiunile externe		25	
17		Cutie metalica vopsita in camp electrostatic			1	
18		Radiator de aluminiu			1	

### Anexa 2 Lista materiale inverter

Nr. crt.	Simbol	Denumire	Caracteristici tehnice	Cod	Buc.	Producator
1	V1...V3	Modul tranzistor IGBT	450 A / 1200 V	FF450R12KT4	3	INFINEON
2		Driver modul tranzistor IGBT	2 canale	2ED300C	3	INFINEON
3						
4	CF	Condensator electrolitic in carcasa de aluminiu	5600 $\mu$ F / 450 V	LNC2W562M	6	NICHICON
5	II...I4	Traductor de curent Hall	$I_{PN} = 500$ A $I_{PM} = \pm 1500$ A $U_a = \pm 15$ V	HAT 500-S	4	LEM
6	U	Traductor de tensiune	$U_{PN} = 10 \dots 500$ V $I_{PN} = 10$ mA	LV 25-P-1000	1	LEM
7	K	Contacteur preincarcare circuit intermediar	400 A / 400 V	NDC1	1	NADER
8	CS	Condensator snubber	1 $\mu$ F / 1200 V	B32656S	6	TDK
9	Rd	Rezistenta filtru intermediar	51 k $\Omega$ / 10 W		3	TE CONNECTIVITY
10	Ri	Rezistenta pre-incarcare	20 $\Omega$ / 80 W		1	TE CONNECTIVITY
11		Interfata HMI (display si tastatura)	LED		1	Romdata AQ
12		Sursa in comutatie 3.3Vdc	3.3V / 2A		1	Traco
13		Sursa in comutatie $\pm 15$ Vdc	$\pm 15$ V / 3A		1	Traco
14		Sursa in comutatie 24Vdc	24V / 2A		1	Traco
15		Ventilator	250m <sup>3</sup> /h		2	
16		Placa de comanda	uC PCB		1	Cesi
17		Bare de cupru	Pentru conexiunile de forta interne		1 SET	
18		Izolator tip Nomex	Pentru executia panourilor multistrat		3ml	
19		Placa borne de forta	Pentru conexiunile de forta externe		1 set	
20		Cleme comanda	Pentru conexiunile externe		25	
21		Cutie metalica vopsita in camp electrostatic			1	
22		Radiator de aluminiu			1	

### Anexa 3 Schema plăcii electronice de comandă cu DSP



### Anexa 4 Lista materiale placă electronică de comandă cu DSP

SL48F-W	Conector 01	A01, A02	SL48F	2
Soclu 3V	Battery Vertical Socket	BT1	BATVERHLD2	1
1n	Capacitor	C1, C12, C14, C17, C33, C43, C66, C94	1206c	8
2n2	Capacitor	C2, C11, C13, C15, C16, C18, C21, C24, C31, C41, C48, C54, C57, C60, C64, C68	1206c	16
10uF/35V	Bi-Polar Capacitor	C3	RB.1/2	1
47uF/16V	Bi-Polar Capacitor	C4	RB.1/2	1
100n	Capacitor	C5	RAD0.2	1
4.7u tantal	Bi-Polar Capacitor	C6	RB.1/2	1
10uF	Bi-Polar Capacitor	C7	C SMD A	1
100n	Capacitor	C8, C9, C23, C26, C27, C28, C29, C30, C32, C34, C36, C39, C40, C45, C46, C47, C49, C51, C52, C55, C56, C58, C59, C63, C69, C70, C73, C75, C78, C79, C81, C85, C88, C89, C90, C91, C92, C96, C97, C98, C99	1206C	41
22p	Capacitor	C10, C19, C20	1206C	3
100uF	Bi-Polar Capacitor	C22, C25, C35, C77	RB.1/2	4
33pF	Capacitor	C37, C42	1206c	2
1uF	Bi-Polar Capacitor	C38, C44, C67	RB.1/2	3
10n	Capacitor	C50, C53, C65, C95	1206c	4
0.1/63V	Capacitor	C61, C62	RAD0.2	2
10uF/50	Bi-Polar	C71	RB.1/2	1

	Capacitor			
2200uF/35	Bi-Polar Capacitor	C72	RB.3/6	1
10uF/16	Bi-Polar Capacitor	C74, C76	RB.1/2	2
100n	Capacitor	C80	1206	1
4700uF/6.3	Bi-Polar Capacitor	C82, C83	RB.2/4	2
10uF	Bi-Polar Capacitor	C84, C86, C87	RB.1/2	3
470p	Capacitor	C93	1206C	1
1N4007	High Conductance Fast Diode	D1, D2	DO-41	2
3v3	Zener Diode	D3, D4, D17, D18	SOD-323	4
1N4148	High Conductance Fast Diode	D5, D6, D8, D9, D11, D12, D13, D14, D15, D16, D19, D20	SOD-80C	12
LED	Typical LED Red	D7, D10, D21	1206LED2	3
dsPIC33EP512MU810	DSP Microchip	DSP	TQFP14X14-100N	1
10uH/2.6A	Inductor	L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11, L12	PWRIND1	12
RJ12	Connector	PGDSP	BU_TEL6V	1
BCW66	NPN Bipolar Transistor	Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6, Q7, Q8, Q9, Q10, Q11, Q12, Q13, Q14, Q15, Q16, Q17, Q18, Q19, Q20, Q21, Q22, Q23, Q24, Q25, Q26, Q27, Q28, Q29, Q30, Q31, Q32, Q33, Q34	SOT-23	34
2k	Resistor	R1, R6, R7, R17, R18, R19, R25, R26, R31, R36, R37, R38, R42, R66, R79, R90, R92, R97, R104, R107, R109, R123, R128, R137, R138, R140, R153, R154, R169, R170, R171, R172, R173, R174, R177, R178, R179, R180, R181	1206	39
560R	Resistor	R2, R11, R15, R21, R40, R46, R131, R139	1206	8
10k	Resistor	R3, R4, R5, R8, R9, R10, R12, R13, R14, R16, R20, R22, R23, R24, R32, R33, R34, R35, R39, R41, R45, R47, R49, R51, R52, R53, R55, R63, R64, R69, R71, R72, R73, R75, R76, R84, R87, R89, R91, R94, R95, R99, R101, R103, R105, R106, R110, R113, R115, R116, R117, R119, R120, R121, R125, R127, R129, R130, R132, R134, R141, R146, R151, R152, R155, R157, R158, R159, R160, R161, R164, R165, R176, R182, R183, R184, R185, R186, R187, R188	1206	80
1k5	Resistor	R27, R28, R29, R30	AXIAL0.3	4
20k	Resistor	R43, R48, R50, R54, R61, R68, R70, R74	1206	8
2M	Resistor	R44, R62, R83, R100, R108, R124, R156	1206	7
82R	Resistor	R56, R57, R58	AXIAL0.3	3
2k7	Resistor	R59, R81	AXIAL0.3	2
10k	Resistor	R60, R82, R168	AXIAL0.3	3
5k1	Resistor	R65, R67, R85, R86, R93, R98, R112, R118, R175	1206	9
56R	Resistor	R77, R78, R80	AXIAL0.3	3
20k	Resistor	R88, R102, R114, R126	AXIAL0.3	4
500R	Resistor	R96, R111, R122, R133	AXIAL0.3	4
300R	Resistor	R135, R136, R162, R163	AXIAL0.3	4
100	Resistor	R142, R144, R189	1206	3
2k7	Resistor	R143, R145	1206	2
4k7	Resistor	R147, R149	1206	2
1k	Resistor	R148, R150	1206	2
120	Resistor	R166	AXIAL0.3	1
2k	Resistor	R167	AXIAL0.3	1
RESET	dip switch	SW1	SW00	1
Test point	Test point	TP1, TP2, TP3, TP4, TP5, TP6	TERMINAL_B	6
LM393	Low-Power Dual Voltage Comparator	U1, U4, U9	DIP-8	3
LM358	Low-Power Dual Voltage	U2, U3, U7, U8	DIP-8	4

	Comparator			
CD4013BCM	IC	U5, U6, U10	SO14	3
TEL2-2411	Power supply	U11	TEL2	1
PCF8583	RTC	U12	DIP-8	1
ADUM1100	Isolation CAN	U13, U15	SO8	2
MCP2551	CAN Controller	U14	SO8	1
LTV817	Opto smd	U16, U17	LTV817C	2
LT1963A-3.3 - RADIATOR	LDO 3.3volt	U18	DPACK-5	1
TEN8-2411	Power supply	U19	TEN8	1
MAX3232	RS232	U20	SO-16	1
32kHz	Crystal	Y1	RAD0.1	1
MHz	Crystal	Y2	RAD0.2	1

### Anexa 5 Cod sursă parțial, implementare estimator de viteză

```

//***** ==> Ecuatia 1
// Stator voltage eqations
// Ualpha = Rs * Ialpha + Ls dIalpha/dt + BEMF
// BEMF = Ualpha - Rs Ialpha - Ls dIalpha/dt
EstimParm.qEsa = EstimParm.qLastValpha - (int)(__builtin_mulss( MotorEstimParm.qRs, ParkParm.qIalpha) >>11) -
EstimParm.qVIndalpha;
// Ubeta = Rs * Ibeta + Ls dIbeta/dt + BEMF
// BEMF = Ubeta - Rs Ibeta - Ls dIbeta/dt
EstimParm.qEsb = EstimParm.qLastVbeta - (int)(__builtin_mulss( MotorEstimParm.qRs, ParkParm.qIbeta) >>11) -
EstimParm.qVIndbeta;
//***** ==> Ecuatia 2
SincosParm.qAngle = EstimParm.qRho;
SinCos();
//*****
// Esd = Esa*cos(Angle) + Esb*sin(Rho)
EstimParm.qEsd = (int)((__builtin_mulss(EstimParm.qEsa, SincosParm.qCos)>>15) + (__builtin_mulss(EstimParm.qEsb,
SincosParm.qSin)>>15));
//*****
// Esq = -Esa*sin(Angle) + Esb*cos(Rho)
EstimParm.qEsq = (int)((__builtin_mulss(EstimParm.qEsb, SincosParm.qCos)>>15) - (__builtin_mulss(EstimParm.qEsa,
SincosParm.qSin)>>15));
//***** ==> Ecuatia 6 ==> unde InvPsi este fluxul
// OmegaMr= (1+SigmaR)/PsiMr * Esq -sgn(Uhqf) * Uhdf
if (_Q15abs(EstimParm.qVelEstim)>(NOMINAL_SPEED_RPM*NOPOLEPAIRS/10))
{
if(EstimParm.qEsqf>0)
{
temp_int = (int)(EstimParm.qEsqf - EstimParm.qEsdf);
EstimParm.qOmegaMr = (int)(__builtin_mulss(MotorEstimParm.qInvPsi, temp_int)>>15);
} else
{
temp_int = (int)(EstimParm.qEsqf + EstimParm.qEsdf);
EstimParm.qOmegaMr = (int)(__builtin_mulss(MotorEstimParm.qInvPsi, temp_int)>>15);
}
} else
{
if(EstimParm.qVelEstim>0)
{
temp_int = (int)(EstimParm.qEsqf - EstimParm.qEsdf);
EstimParm.qOmegaMr = (int)(__builtin_mulss(MotorEstimParm.qInvPsi,temp_int)>>15);
} else
{
temp_int = (int)(EstimParm.qEsqf + EstimParm.qEsdf);
EstimParm.qOmegaMr = (int)(__builtin_mulss(MotorEstimParm.qInvPsi,temp_int)>>15);
}
}
}

```

### Bibliografie

1. Câmpeanu A., *Introducere în dinamica mașinilor electrice de curent alternativ*, Editura Academiei Române, 1998
2. Simion, *Mașini electrice. Mașina sincronă*, Editura "Gh. Asachi", Iași, 2003
3. SAAL, C., SZABO, W. *Sisteme de acționare electrică. Determinarea parametrilor de funcționare*, București, Editura Tehnică 1981.
4. Fransua, Alexandru; Măgureanu, Răzvan: *Electrical Machines and Drive Systems*. Editura Tehnică, București in collaboration with Technical Press, Oxford, 1984.

5. Austin Hughes Senior Fellow: : *Electric Motors and Drives Fundamentals*, Types and Applications, Third edition , School of Electronic and Electrical Engineering, University of Leeds
6. Mușuroi Sorin, *Controlul acționărilor electrice*, documentație disponibilă pe internet
7. Akagi H: *New trends in active filters for power conditioning*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 6, Nov/Dec 1996, pp. 1312-1322.
8. Bose B. K.: *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA, 2002.
9. Ionescu, F., Six, J. P., Floricău D., Delarue Ph., Nițu Smaranda, Boguș C.: *Electronică de putere – convertoare statice*, Editura tehnică, București, 1998, ISBN 973-31-1262-3.
10. Kelemen, Árpád, Imecs, Maria: *Electronică de putere*, Editura didactică și pedagogică, București, 1983.
11. Chiver Olivian, *Tructoare*, documentație disponibilă pe internet
12. Albu Mihai, *Invertorul PWM trifazat de tensiune*, documentație disponibilă pe internet
13. LEM, documentație de firmă
14. Richard Okrasa, *Adjustable Speed Drive*, Ontario Hydro
15. Texas Instruments, documentație de firmă
16. Microchip, documentație de firmă
17. Convertoare cc-ca. Invertoare – curs disponibil pe internet
18. Kelemen Árpád, Imecs Maria: *Sisteme de reglare cu orientare după câmp ale mașinilor de curent alternativ*. Editura Academiei Române, București, 1989
19. Kelemen Árpád, Imecs Maria: *Vector Control of AC Drives. Volume 1: Vector Control of Induction Machine Drives*. OMIKK Publisher, Budapest, 1991, ISBN 9635931409
20. Kelemen Árpád, Imecs Maria: *Vector Control of AC Drives. Volume 2: Vector Control of Synchronous Machine Drives*. Ecsite-Publisher, Budapest, Hungary, 1993, ISBN 9635931409
21. Archana S. Nanoty, and A. R. Chudasama : *Vector Control of Multimotor Drive*; World Academy of Science, Engineering and Technology , International Journal of Electrical, Robotics, Electronics and Communications Engineering Vol:2 No:9, 2008
22. D.O. Kisch, *Reglarea vectorială a mașinilor de curent alternativ*, Editura ICPE, 1997
23. BHAKTI M JOSHI and MUKUL C CHANDORKAR: *Two-motor single-inverter field-oriented induction machine drive dynamic performance*, Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, International Journal of Electronics Communications and Electrical Engineering ISSN : 2277-7040 Volume 3 Issue 7 (July 2013)
24. Amit Biswal, Sai Ram Reddy Bhavanam, Dr. Umashankar S1, *Analysis of Common DC Link in VSI fed Multi-motor Drives*, School of Electrical Engineering, VIT University, Vellore-632014, Tamil Nadu, India
25. WHITAKER, JERRY C, *The Electronics Handbook*, IEEE Press, 1996.
26. *Controlul vectorial al acționărilor electrice*, curs, documentație disponibilă pe Internet
27. IVANOV S., GRENIER D., LABRIQUE F., RESENDE M., ROBYNS B. , Online Interactive Lessons on the Principle of the Direct Torque Control of the Induction Machine, WSEAS TRANSACTIONS on ADVANCES in ENGINEERING EDUCATION Issue 5, Volume 5, May 2008.
28. Estimarea parametrilor mașinii asincrone folosind filtrul Kalman extins, documentație disponibilă pe Internet
29. Compatibilitate electromagnetice (CEM). Partea 3: Limite. Secțiunea 2: Limite pentru emisiile de curent armonic (curent absorbit de aparat 16A pe fază). SR EN 61000-3-2+A12.
30. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 2: Environment. Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. IEC 61000-2-2.
31. General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto. IEC 1000-4-7.
32. BABU C., „Control of Voltage Source Inverters using PWM/SVPWM for Adjustable Speed Drive Applications”; [http://thesis.nitrkl.ac.in/1133/1/Control\\_of\\_Voltage\\_Source\\_Inverters\\_using\\_PWM.pdf](http://thesis.nitrkl.ac.in/1133/1/Control_of_Voltage_Source_Inverters_using_PWM.pdf)
33. Chiasson, J., Tolbert, L. M., McKenzie, K. and Du, Z., “Control of a multilevel converter using resultant theory,” in IEEE Transactions on Control System Technology, vol. 11, pp. 345–354, May 2003.
34. Malinowski, M. And Kazmierkowski, M. P., “Simple Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier Using Space Vector Modulation – A Comparative Study”, in EPE Journal, Vol. 35. No. 2 pp. 28-34, 2003.
35. GYUGYI L., „Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensator”;
36. Geyer, T., Becutti, A., et. al. “Model Predictive Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motors”, in ECCE Conference, 2010
37. FRONTIERS OF MODEL PREDICTIVE CONTROL, Edited by Tao Zheng, 2012, Interenet
38. Predictive Control of Inverter Supplied Electrical Drives, Ralph Kennel, Arne Linder
39. S. Seo et al, Hybrid Control System for Managing Voltage and Reactive Power in the JEJU Power System, Journal of Electrical Eng. and Technol. Vol. 4, no.4 pp. 429-437, 2009.
40. T. Geyer, G. Papafotiou, M. Morari, Model Predictive Direct Torque Control-Part I: Concept, Algorithm, and Analysis, IEEE Transactions on Industrial Electronics vol. 56, no.6, pp. 1894-1905, 2009.
41. Jose Rodriguez and Patricio Cortes, *PREDICTIVE CONTROL OF POWER CONVERTERS AND ELECTRICAL DRIVES*, John Wiley & Sons, Ltd., Publication, 2012
42. Jun Ren, Chun-Wen Li, De-Zong Zhao, *CAN-based Synchronized Motion Control for Induction Motors*, International Journal of Automation and Computing 06(1), February 2009
43. Vismay Chauhan, Prof. V.P. Patel, *Multi-motor Synchronization Techniques*, International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), Volume 3, Issue 2, February 2014
44. Nicola M., et al., SISTEM INTEGRAT DE AUTOMATIZARE A INSTALAȚIILOR DE ACȚIONARE ELECTRICĂ, HIDRAULICĂ ȘI DE ÎNCĂLZIRE A STAVILELOR CU CLAPETĂ DE PE BARAJELE DIN HIDROCENTRALE, Buletinul Tehnico-Științific al ICEMENERG, Editura ICEMENERG București, pp. 52-59, ISSN 1584-0484, 2007
45. Nicola M., Velea F., AUTOMATIC CONTROL OF A HIDROPOWER DAM SPILLWAY, International Conference on Applied and Theoretical Electricity ICATE 2010 Craiova, 8-9 October, Annals of the University of Craiova no.34, pp. 279-282, ISSN : 1842-4805, 2010.