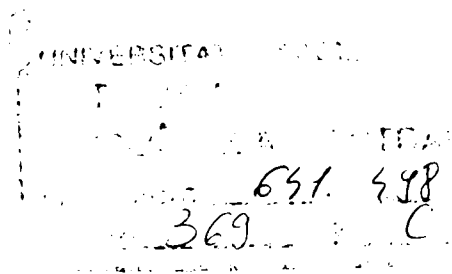


**CONSIDERAȚII CONSTRUCTIVE  
ȘI DE CONDUCERE A UNUI  
ECHIPAMENT DEDICAT  
REALIZĂRII DE IMPLANTE  
CHIRURGICALE FACIALE**

TEZĂ DE DOCTORAT



Autor: *ing. Antonius STANCIU*

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

Conducător științific: *prof.univ.dr.ing. Doina DRĂGULESCU*

— octombrie 2003 —

*Dascăilor mei,*

# CUPRINS

CUPRINS .....	7
MOTIVAȚIE .....	11
INTRODUCERE .....	15
1. PREZENTAREA GENERALĂ A ECHIPAMENTULUI <i>COMP-U-CRAFT</i> .....	21
1.1 Metode de studiu în cinematica punctului material .....	22
1.1.1 Studiul mișcării în coordonate carteziene .....	22
1.1.2 Studiul mișcării în coordonate intrinseci .....	24
1.1.3 Studiul mișcării în coordonate polare plane .....	28
1.1.4 Studiul mișcării în coordonate cilindrice .....	30
1.1.5 Determinarea razei de curbură a traiectoriei .....	33
1.1.6 Mișcări curbilinii uzuale .....	38
1.2 Mișcarea compusă a rigidului .....	48
1.2.1 Preliminarii .....	48
1.2.2 Determinarea vitezelor .....	51
1.2.3 Studiul accelerațiilor .....	54

1.2.4 Distribuția de viteze în cazul mișcării relative particulare a rigidului. Compuneri de mișcări instantanee. Compuneri de translații .....	56
1.3 Proiectarea echipamentului <i>Comp-U-Craft</i> .....	57
1.3.1 Principii conceptuale de bază .....	57
1.3.2 Domeniu de utilizare .....	62
1.3.3 Descrierea echipamentului și modul de rezolvare a problemelor constructive .....	63
1.3.4 Acționarea echipamentului <i>Comp-U-Craft</i> .....	74
1.3.5 Verificarea experimentală a soluțiilor adoptate cu ajutorul studiului metalografic .....	84
2. CONSIDERAȚII ASUPRA PĂRȚII DE HARDWARE .....	95
2.1 Specificații inițiale .....	95
2.2 Comunicația dintre sistemul de calcul și echipamentul <i>Comp-U-Craft</i> .....	99
2.2.1 Soluția hardware .....	101
2.2.2 Soluția software .....	115
2.3 Interfațarea dintre dispozitivul digital și motoarele pas cu pas ..	119
2.3.1 Moduri de comandă .....	120
2.3.2 Moduri de excitare .....	123
2.3.3 Unipolar vs. bipolar .....	127
2.3.4 Comanda în curent constant .....	129
2.3.5 Posibile îmbunătățiri ale circuitelor unipolare .....	131

2.3.6 Avantaje și dezavantaje ale comenzii în jumătate de pas .....	133
2.3.7 Semnale de comandă generate electronic .....	136
2.3.8 Curentul de fază necesar pentru condițiile de operare ..	146
2.3.9 Comanda unui motor pas cu pas folosind circuitele L297 și L298N .....	147
<b>3. PACHETUL SOFTWARE .....</b>	<b>151</b>
3.1 Introducere .....	151
3.2 Partea de CAM .....	160
3.2.1 <i>CD Nelson Commander</i> .....	160
3.3 Partea de CAD .....	170
3.3.1 <i>CD Nelson Assembler</i> .....	170
3.3.2 <i>CD Nelson Draw</i> .....	171
3.3.3 <i>CD Nelson Phototrace</i> .....	176
3.3.4 <i>CD Nelson 3D Creator</i> .....	180
3.3.5 <i>CD Nelson 3D Shaper</i> .....	181
<b>4. FIXAREA FRACTURILOR CRANIO-MAXILO-FACIALE CU IMPLANTE METALICE .....</b>	<b>187</b>
4.1 Materiale folosite în implantologie .....	188
4.2 Elemente de fixare .....	190

4.3 Studiu de caz .....	198
4.4 Analiza numerică a stării de tensiune și de deformare la plăcuțe de fixare LN 331 S .....	205
5. CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE .....	225
BIBLIOGRAFIE .....	245
ANEXA 1 .....	257
ANEXA 2 .....	277
ANEXA 3 .....	283
ANEXA 4 .....	297
ANEXA 5 .....	317

# MOTIVAȚIE

Cercetările desfășurate pentru realizarea tezei de doctorat se referă, în principal, la o mașină cu comandă numerică pe trei axe, extensibilă la cinci axe, destinată scanării și execuției obiectelor tridimensionale. Ea sintetizează, de asemenea, un compendiu teoretic necesar concepției, proiectării și realizării mașinii, precum și a pachetului de programe necesar guverării sale. Autorul s-a concentrat asupra unei categorii de aplicații, din multitudinea celor posibile, anume asupra implantelor maxilo-faciale chirurgicale.

Mașina se numește *Comp-U-Craft* și se află în fabricație de serie la *CD Nelson Manufacturing & Supply Co.* din Chicago, Statele Unite ale Americii. Prin amabilitatea președintelui acestei companii, domnul Clinton-David NELSON, doctorandului i-au fost puse la dispoziție atât fondurile necesare cercetării și dezvoltării, cât și ajutorul specializat pentru domenii specifice, cum ar fi partea mecanică și partea de software. De aceea, drepturile globale de autor sunt rezervate și aparțin acestei companii, prin bunăvoința căreia doctorandul a primit permisiunea de a-și prezenta contribuțiile în cadrul acestei teze. Tot din același motiv, anumite detalii tehnice, uzuale în astfel de lucrări, au fost omise pentru că, prin trecerea lor în domeniul public, prin intermediul acestei teze, interesele legitime ale *CD Nelson Manufacturing & Supply Co.* ar putea fi lezate.

Deși ideea realizării mașinii provine dintr-un studiu de piață al *CD Nelson Manufacturing & Supply Co.* vizând modelarea și industria bijuteriilor, s-au extins foarte mult premisele inițiale și s-a căutat realizarea unui agregat cât mai versatil, specific domeniului roboticii, care, înzestrat cu software-ul necesar, să deservească un număr mare de ramuri industriale, în condițiile unui preț scăzut și neprohibitiv pentru utilizatori individuali sau mici întreprinzători. Având în vedere că în acest moment *CD Nelson Manufacturing & Supply Co.* distribuie această mașină atât unor clienți individuali, cât și firmelor de pe cinci continente, consider că obiectivul a fost atins.

Când s-a început conceperea acestui utilaj, doctorandul și-a pus problema că pretențiile mereu crescânde ale pieței într-un domeniu care îi este familiar, al

electronicii și tehnicii de calcul, puteau fi satisfăcute doar printr-o calitate ridicată, posibil de asigurat doar la nivelul marilor corporații (care au și reușit în ultima decadă să își adjudece cvasitotalitatea producției de bunuri de larg consum), din cauza costurilor uriașe ale echipamentelor de producție și de testare cu ajutorul cărora se poate asigura o repetabilitate constantă a calității în condițiile unei rate minime a căderilor. Micii întreprinzători cu posibilități modeste, adesea frizând artizanatul, au fost eliminați complet din competiție. Dorința de a revitaliza acest domeniu l-a motivat pe doctorand în a încerca realizarea unui utilaj versatil, având ușurința de utilizare al unor periferice comune, cum ar fi scannerul și imprimanta, la un preț situat sub pragul de 10 000 USD, cu ajutorul căruia să poată fi asigurate atât calitatea, cât și repetabilitatea acesteia, la nivel industrial, pentru produse specializate sau adaptate nevoilor unor categorii restrânse de utilizatori, produse care nu intră în sfera de interes a marilor producători. Fiind vorba de mici întreprinzători, era necesară elaborarea unei soluții complete, care să acopere întreg lanțul CAD/CAE/CAM. Din acest motiv, doctorandul a început activitatea la această teză sub conducerea domnului prof.univ.dr.ing. Mircea VLĂDUȚIU, specialist de renume în domeniul fiabilității și testării, reușind utilizarea mașinii la proiectarea, realizarea și testarea plăcilor de cablaj imprimat plantate cu circuite integrate LSI și VLSI.

Din păcate, reușita a venit prea târziu, într-un moment în care numărul micilor întreprinzători rămași în branșă era departe de a putea susține reușita comercială a acestui demers, studiile de piață ale *CD Nelson Manufacturing & Supply Co.* demonstrând clar acest lucru. Versatilitatea extraordinară a mașinii în conjuncție cu domeniul tehnic extins necesar realizării ei i-au permis doctorandului o reorientare rapidă către alte domenii în care se puteau aduce un plus de calitate și de funcționalitate, pe lângă posibilitatea operării și de către personal cu specializare mai redusă.

Domeniul ales a fost cel al protezării, moment în care m-am adresat doamnei prof.univ.dr.ing. Doina DRĂGULESCU, expertă în probleme de robotică și inginerie medicală. Domnia sa a avut amabilitatea de a accepta preluarea conducerii acestei teze de doctorat și de a o orienta într-un domeniu care, deși mă atrăgea de o bună perioadă de timp, era destul de obscur pentru mine. Cu competența sa



caracteristică, dumneaei m-a orientat spre o cunoaștere minimă necesară a domeniului implantologiei, îndrumându-mă să aprofundez protezarea maxilo-facială, domeniu în care mașina propusă putea da rezultate rapide și pentru care piața existentă este departe de saturație.

Echipamentul prezentat, în totalitatea sa (partea mecanică, partea de hardware și partea de software), și-a demonstrat superioritatea în fața competitorilor, cu ocazia expozițiilor internaționale la care a participat prin grija *CD NELSON Manufacturing & Supply Co.*, ridicând mereu ștacheta calității. O asemenea performanță nu putea fi realizată numai prin aport exclusiv individual, așa că mă simt dator și mă onorează să îi menționez și să le mulțumesc celor care m-au ajutat să duc la bun sfârșit, sub îndrumarea competentă a profesorilor universitari Doina DRĂGULESCU și Mircea VLĂDUȚIU, această lucrare care materializează o sumă de cunoștințe teoretice dobândite pe parcursul formării mele universitare și doctorale în acest bastion tehnico-științific de excepție, care este Universitatea „Politehnica” din Timișoara.

Îmi este imposibil să ierarhizez altfel decât alfabetic și pe domenii de activitate ajutorul neprețuit primit. Încep, deci, prin a-i aminti pe domnii ingineri Cristian BURSAȘIU și Adrian ION, programatori de talie internațională, cu ajutorul cărora am definitivat partea de analiză a pachetului software și care au asigurat implementarea acestui pachet, astfel încât să rezulte un produs competitiv pe orice piață din lume. Domnul inginer Tudor FADER, inginer proiectant principal, cu o carieră de o viață în domeniul cercetării și proiectării mecanice, m-a ajutat să optimizez construcția echipamentului și să aduc desenele de execuție în conformitate cu standardele în vigoare. Domnișoara inginer Loredana UNGUREANU m-a ajutat cu o dăruire imposibil de exprimat în cuvinte, atât la identificarea și obținerea bibliografiei, cât și pe parcursul redactării finale a tezei. Nu în ultimul rând, trebuie să le mulțumesc studenților semigrupului 3.2 a anului al treilea (în anul universitar 2000-2001), împreună cu care am rezolvat problema comunicării USB, ca proiect la Ingineria Calculatoarelor.

Datorez grațitudine echipei de chirurși, specializarea oro-maxilo-facială, conduse de prof.univ.dr.med. Emil URTILĂ, care a acceptat să colaboreze cu autorul și cu conducătoarea tezei pentru stabilirea formei optime a implantului chirurgical realizat și pentru studiile clinice de implantare.

Un loc aparte în lungul șir al celor cărora le datorez adâncă recunoștință este ocupat de profesorii universitari Vladimir CREȚU, directorul Departamentului de Calculatoare al Universității „Politehnica“ Timișoara, și Jean-Alexandre UEBERSFELD, profesor emerit la Universitatea Paris 6 „Pierre et Marie CURIE“. Domniile lor au colaborat mereu pe parcursul acestor ani de pregătire doctorală, ajutându-mă, sfătuindu-mă, încurajându-mă în momentele cele mai dificile, pentru a mă orienta și a mă menține pe calea care trebuia urmată.

Închei, mulțumindu-i din suflet domnului Clinton-David NELSON, președintele *CD NELSON Manufacturing & Supply Co.*, și soției sale, Agnes NELSON, care au investit în mine timp, bani, răbdare și prietenie, de-a lungul unor ani buni și fără a avea certitudinea reușitei, până când au apărut primele rezultate notabile.

Toți acești oameni minunați, fie că sunt nominalizați sau nu aici, rămân întipăriți în mintea și în inima mea ca modele de urmat și le mulțumesc cu adâncă recunoștință.

# INTRODUCERE

Cercetările desfășurate pe parcursul elaborării tezei de doctorat au avut ca obiectiv inițial, pe de o parte, realizarea practică a echipamentului *Comp-U-Craft*, iar pe de altă parte fundamentarea unui concept care să permită micilor întreprinzători (categorie aflată în regres numeric), îndeobște orientați pe producție de unicate sau de serie mică, să obțină produse de nivel calitativ comparabil cu cele ale marii industrii. Concretizarea acestor cercetări în elaborarea implantelor metalice chirurgicale cranio-maxilo-faciale vine să confirme justetea alegerilor făcute pe parcursul elaborării tezei.

Tendința de polarizare a mediului industrial în mari producători și în consumatori (legați prin diverse canale de distribuție) rezidă tocmai în capacitatea economică a celor dintâi de a asigura o calitate ridicată, prin metode automatizate de execuție și prin proceduri de testare deosebit de elaborate. Din păcate, costul acestora este semnificativ și se justifică doar în cazul producțiilor de masă. Micii producători, aflați în imposibilitatea de a oferi calitate echivalentă, sunt împinși inevitabil spre dispariție, deși marea industrie nu va oferi curând produse de serie mică sau aplicații dedicate. În acest context, elaborarea unui echipament versatil, ieftin, însoțit de un software intuitiv și de o bibliotecă de reglaje pentru diverse prelucrări, pare a fi exact soluția de care micii întreprinzători au nevoie pentru a supraviețui.

Deși acest concept părea a fi destinat economiilor în dezvoltare, cum ar fi cazul României, a fost plăcut de observat că ideea are un mare caracter de generalitate, lucru dovedit de impunerea echipamentului *Comp-U-Craft* pe piețele unor economii puternice, ca cele ale Statelor Unite al Americii, Germaniei, Elveției, Italiei, Japoniei sau Australiei, pe lângă cele ale unor economii mai puțin dezvoltate, cum ar fi cazul Indiei, Croației, Ungariei, Braziliei sau a îndepărtatei Maurițius.

Teza de doctorat a fost structurată pe cinci capitole, dintre care ultimul de concluzii, capitole precedate de o motivație și de o introducere. Teza mai conține cinci anexe și o bibliografie de 121 de titluri, majoritatea de dată recentă, toate fiind citate în lucrare, la care se adaugă alte 17 titluri, reprezentând standardele

care au stat la baza proiectării și execuției elementelor componente ale echipamentului *Comp-U-Craft*.

Capitolul 1, intitulat „Prezentarea generală a echipamentului *Comp-U-Craft*“, se referă la aspecte ale construcției mecanice, atât sub aspect teoretic, cât și practic, ceea ce reprezintă fundamentele funcționale ale utilajului descris. Cu alte cuvinte, având în vedere că este vorba de un instrument de execuție, aflat la capătul posterior al unui lanț CAD/CAE/CAM, capacitățile sale vor determina designul întregului lanț. Acest capitol se concretizează, astfel, într-un studiu teoretic și într-o aplicație practică, necesare proiectării echipamentului *Comp-U-Craft*. Studiul teoretic a fost necesar, pe de o parte, fundamentării mișcării sculei de execuție într-un spațiu triortogonal și a reprezentat punctul de plecare în analiza aplicației software de comandă a mașinii.

Paragraful 1.1, intitulat „Metode de studiu în cinematica punctului material“, selecționează, din bibliografia studiată, câteva metode care au stat la baza unor inovații conținute în *Comp-U-Craft*, menite a extinde capacitățile de prelucrare către piese care nu ar fi putut fi prelucrate pe mașinile clasice cu comandă numerică pe numai trei axe. Deoarece creșterea numărului de axe conduce la creșterea exponențială a complexității calculelor necesare și implicit a costurilor, acest paragraf s-a dovedit benefic în extinderea capacităților mașinii fără o influență defavorabilă asupra programelor de comandă sau a costurilor.

În paragraful 1.2, intitulat „Mișcarea compusă a rigidului“, sunt sintetizate cunoștințele de bază expuse în paragraful anterior, modelarea matematică acoperind studiul mișcării unor corpuri compuse. Mai precis, sunt studiate mecanismele simple care stau la baza construcției sistemelor inteligente de corpuri, de tipul roboților. Exemplele alese din bibliografie permit înțelegerea funcționării ansamblurilor cinematice formate din motor, cuplaj, șurub conducător și o masă în translație, suportată de glisieră, adică exact modelul adoptat la proiectarea mașinii.

Paragraful 1.3, intitulat „Proiectarea echipamentului *Comp-U-Craft*“, conține sinteza cunoștințelor teoretice prezentate la proiectarea concretă a mașinii *Comp-U-Craft*. Mai mult, paragraful se încheie cu un studiu metalografic macroscopic și microstructural, efectuat asupra a cinci probe de implant chirurgical, cu

scopul de a valida practic, așa cum se impune oricărui demers ingineresc, deciziile teoretice sau rezultate în urma simulărilor. Deși în text se fac referiri la repere prezentate în desenul de ansamblu și în numeroase desene de detaliu, *CD Nelson Manufacturing & Supply Co.* nu este de acord cu trecerea acestora în domeniul public. Cu toate acestea, ele vor fi puse, spre consultare, la dispoziția comisiei cu ocazia prezentării acestei teze.

Capitolul 2, intitulat „Considerații asupra părții de hardware“, se referă la partea electronică și de hardware a mașinii. El identifică problemele de proiectare care se cer a fi rezolvate cu ajutorul electronicii digitale și a celei analogice. Capitolul are trei paragrafe importante. Paragraful 2.1, intitulat „Specificații inițiale“, face o introducere în problemele care se cer rezolvate la acest nivel, clasificându-le în două părți, discutate detaliat în celelalte două paragrafe ale capitolului. Tot aici se face o justificare a soluțiilor adoptate.

Paragraful 2.2, intitulat „Comunicația dintre sistemul de calcul și echipamentul *Comp-U-Craft*“, se referă la comanda logică a motoarelor pas cu pas, adică așa cum este ea „văzută“ dinspre calculator. Astfel, pornindu-se de la necesitățile de comandă a motoarelor pas cu pas alese din anumite considerente, pentru cinematica mașinii a fost elaborat setul de comenzi de bază pe care calculatorul de comandă le va transmite mașinii. O dată identificat acest set, a fost aleasă o metodă de comunicație, avându-se în vedere aceleași criterii de performanță, preț și fiabilitate, obținute cu costuri cât mai mici.

Paragraful 2.3, intitulat „Interfațarea dintre dispozitivul digital și motoarele pas cu pas“, analizează comanda acționărilor din punctul de vedere al tensiunilor, curenților și puterilor, adică așa cum este ea „văzută“ dinspre motoare. Aici se face o prezentare detaliată a modurilor de comandă în tensiune și curent, a motoarelor pas cu pas, prezentare care face ca soluția tehnică propusă să fie pe deplin justificată în condițiile scopului propus al echipamentului.

Capitolul 3, intitulat „Pachetul software“, acoperă partea de software, care îi conferă echipamentului o nouă dimensiune funcțională, precum și capacitatea de a fi folosit de către nespecialiști în domeniu, o categorie vizată concret fiind cea

a cadrelor medicale cu studii medii. El se ocupă de prezentarea facilităților oferite de pachetul de programe destinat guvernării echipamentului. În acest sens, capitolul debutează cu paragraful 3.1, intitulat „Introducere“, în care se regăsește o prezentare generală a componentelor pachetului de programe, precum și a domeniului pe care acestea îl acoperă în lanțul, dorit cât mai complet, parcurs de la idee până la materializarea ei.

Paragraful 3.2, intitulat „Partea de CAM“, descrie modul în care funcțiile de bază, implementate și descrise în capitolul 2, sunt apelate la nivel superior de *CD Nelson Commander*, care acoperă componentele CAM și CAE a mașinii *Comp-U-Craft*. Conform unui principiu încetățenit în software, de stratificare a funcțiilor pe niveluri clar demarcate, *CD Nelson Commander* avansează în ierarhia acestora cu încă trei module și anume: modulul de comandă, modulul intermediar de comandă, precum și interfața cu utilizatorul și cu alte aplicații.

Paragraful 3.3, intitulat „Partea de CAD“, este dedicat componentei CAD, încă în dezvoltare, care oferă deja utilizatorului un număr satisfăcător de facilități de import și de export pentru obiectele create cu programe consacrate în domeniu, precum și o implementare proprie a celor mai importante funcții de proiectare, menite, pe de o parte, să îmbunătățească capacitățile programelor sus menționate, iar, pe de altă parte, să asigure o compatibilitate optimă între acestea și posibilitățile de execuție ale mașinii. Prin această orientare se asigură exploatarea optimă a mașinii, atât de către utilizatori familiarizați deja și eficienți în lucrul cu programe existente, precum și de către cei care stăpânesc bine domeniul modelării și al prelucrărilor prin așchiere, fără a se fi folosit până acum de ajutorul calculatorului. Mai mult, având în vedere că în suita propusă de programe de CAD, pe lângă versiunile care satisfac pretențiile profesioniștilor, având un mare număr de elemente de control puse la dispoziția utilizatorului, există și versiuni în care aceste elemente sunt în majoritate predefinite, lăsând la dispoziția utilizatorului foarte puține elemente de control manual. Prin acest concept sunt ajutați să obțină rezultate profesionale în activitatea lor chiar și utilizatorii începători, fără cunoștințe temeinice în domeniul prelucrării sau al calculatoarelor, categoria vizată, în principal, prin studiul de piață, fiind cea a tinerilor fără resurse materiale, care doresc să înceapă rapid o activitate pe cont propriu.

Capitolul 4, intitulat „Fixarea fracturilor cranio-maxilo-faciale cu implante metalice“, se concentrează asupra unuia dintre domeniile în care echipamentul *Comp-U-Craft* își dovedește utilitatea, adică asupra implantologiei maxilo-faciale, fiind prezentată, sub forma unui studiu de caz, realizarea unui implant chirurgical de uz maxilo-facial, de la proiectare și până la realizare. În introducerea acestui capitol, se arată că fixarea fracturilor cranio-maxilo-faciale cu ajutorul protezelor metalice permite recuperarea funcțională și estetică (implicit și cea socio-profesională) în urma unor accidente din ce în ce mai grave și mai numeroase. Deoarece acest domeniu implică o colaborare strânsă între medici și ingineri, trebuie definită o interfață care să faciliteze această colaborare. Mai precis, structura anatomică a craniului trebuie analizată inginereste, sub aspectul caracteristicilor de material, precum și a solicitărilor statice și dinamice, atât normale, cât și accidentale.

În acest sens, paragraful 4.1, intitulat „Materiale folosite în implantologie“, prezintă materialele care și-au dovedit utilitatea în acest domeniu, fiind prezentate atât din punct de vedere al caracteristicilor fizice și a comportamentului la prelucrări mecanice, cât și din punct de vedere al interacțiunii cu țesuturile vii și, implicit, al biocompatibilității. După clasificarea biomaterialelor în patru clase importante și analizarea lor succintă, de unde decurge și utilizarea cea mai potrivită pentru fiecare în parte, este analizat detaliat oțelul inoxidabil biocompatibil, acesta fiind materialul ales pentru execuția implantelor metalice chirurgicale cranio-maxilo-faciale, cu ajutorul mașinii *Comp-U-Craft*.

Paragraful 4.2, intitulat „Elemente de fixare“, prezintă exhaustiv implantele utilizate în chirurgia cranio-maxilo-facială, precum și modul lor de aplicare pentru obținerea reducerii fracturilor la forma inițială a osului. Metodele de imobilizare și de compresie cu ajutorul implantelor și a accesoriilor sunt prezentate clasificate, din punct de vedere medical și ingineresc, în funcție de tipul afecțiunii și de recuperarea obținută. Paragraful este bogat ilustrat, nu doar cu șuruburile și plăcile cranio-faciale, mandibulare și de reconstrucție folosite în implantologia maxilo-facială, ci și cu desene privind modul lor de aplicare și de reducere al fracturilor.

Paragraful 4.3, intitulat „Studiu de caz”, prezintă proiectarea și realizarea, cu ajutorul mașinii *Comp-U-Craft* și a suitei însoțitoare de programe, a unei proteze maxilo-faciale asemănătoare modelului LN 311 S din catalogul „Aesculap”, cu respectarea tuturor prevederilor standardelor în vigoare, validându-se astfel utilitatea echipamentului prezentat în acest domeniu medical.

Capitolul se încheie cu paragraful 4.4, intitulat „Analiza numerică a stării de tensiune și de deformare la plăcuțe de fixare LN 331 S”. Utilizându-se aplicația profesională *Ansys*, a fost analizat, prin metoda elementelor finite, comportamentul implantelor din studiul de caz în două scenarii: aplicare pe calotă craniană și aplicare pe os lung. În ambele scenarii implantul este deformat, pentru a se mula pe forma osului. Un al treilea scenariu studiază implantul nedeformat, plan, așa cum se întâmplă în cazul folosirii sale la fracturi mandibulare.

Capitolul 5, intitulat „Concluzii”, analizează, pe scurt, capitolele de consistență, reliefând contribuțiile originale ale autorului. De asemenea, cu ajutorul rezultatelor obținute, se justifică încă o dată tema acestei teze. Pentru a puncta mai bine locul acesteia într-un efort de cercetare, capitolul de concluzii conturează direcțiile de dezvoltare pentru viitorul apropiat, cristalizate în urma confruntărilor dintre viziunea proprie a autorului și reacțiile pieței.

Anexa 1 prezintă sursa programului care rulează pe microcontrolerul AN2131Q, folosit pentru realizarea comunicării dintre echipament și un calculator de comandă, prin intermediul portului USB. Anexa 2 conține detalii despre circuitul integrat L297 folosit la comanda motoarelor pas cu pas care intră în componența echipamentului. Anexa 3 descrie *in extenso* algoritmul Bresenham și aplicațiile acestuia în comanda motoarelor pas cu pas. Anexa 4 se concentrează asupra standardelor internaționale care reglementează proiectarea și producerea de implante medicale, în speță ale celor maxilo-faciale, cunoscut fiind faptul că domeniul medical este supus celor mai stricte constrângeri în ceea ce privește calitatea (ca nivel și repetabilitate) și fiabilitatea, constituind astfel o provocare importantă pentru orice fabricant. Anexa 5 prezintă detalii de funcționare a motoarelor pas cu pas și terminologia specifică acestora, precum și câteva standarde de conectare a conductorilor electrici.



# 1. PREZENTAREA GENERALĂ A ECHIPAMENTULUI *COMP-U-CRAFT*

Echipamentul *Comp-U-Craft*, conceput și realizat, se bazează pe compunerea mișcării spațiale din proiecțiile acesteia pe axele unui sistem de referință triortogonal. Această mișcare este transmisă fie unui palpator (pentru scanarea tridimensională a unor corpuri), fie unei scule de execuție (pentru așchiere, gravare sau debitare). În toate aceste cazuri, mișcarea poate fi redusă la cea a unui punct și anume la cea a punctului de interacțiune dintre sculă și material.

Mișcarea sculei se subordonează unor constrângeri grupate în două categorii:

- necesitatea considerării tuturor forțelor și momentelor rezistente;
- considerarea constrângerilor impuse de material (profundimea și viteza așchierii, calitatea suprafeței prelucrate etc.).

De aici decurg restricțiile privitoare la caracteristicile cinematice și dinamice ale sculei în timpul procesului. Astfel, a rezultat clar că (paragraful 1.1), deși mișcarea în coordonate carteziene pare suficientă pentru a descrie cinematic echipamentul conceput, unele variante de echipare sau prelucrarea unor anumite tipuri de piese au impus și alte studii. Mai precis, deși proiectarea echipamentului *Comp-U-Craft* a avut în vedere posibilitatea de a se utiliza un număr maxim de cinci axe, în exploatarea curentă se preferă limitarea acestora la trei (în funcție de natura piesei sau a prelucrării impuse), pentru că fiecare axă suplimentară crește exponențial complexitatea calculelor necesare pentru comanda utilajului. Studiul mișcării în coordonate polare și cilindrice modelează foarte bine această soluție tehnică. Un exemplu se referă la una dintre aplicațiile cele mai importante ale echipamentului — execuția reperelor pentru implantare osoasă. În acest caz sunt necesare șuruburi speciale, adaptate fiecărei piese. Pentru execuția acestora, studiul mișcării de rototranslație se dovedește benefic (paragraful 1.2).

Paragraful 1.3 sintetizează noțiunile teoretice prezentate, dezvoltând modelarea mișcării unor sisteme de corpuri simple, care se regăsesc în structura oricărui tip de mașină-unealtă complexă. Exemplele prezentate intenționează explicarea

funcționării ansamblurilor cinematice (formate din motor, cuplaje, șurub conducător și masa în translație) ale echipamentului *Comp-U-Craft*, ceea ce încheie prezentarea teoretică a mecanicii mașinii. Toate aceste aspecte conduc la prezentarea proiectării ansamblurilor cinematice a variantei echipamentului folosit și în realizarea aplicațiilor prezentate în capitolul 4 al tezei.

## 1.1 Metode de studiu în cinematica punctului material

### 1.1.1 Studiul mișcării în coordonate carteziene

Punctul  $M$  de coordonate  $x, y, z$  se deplasează pe traiectoria  $C$ , după legea  $\vec{r} = \vec{r}(t)$  (figura 1.1) [12], [20].

Într-un sistem de referință cartezian, legea de mișcare a punctului material se exprimă sub forma [12], [21], [40]:

$$\vec{r}(t) = x \cdot \vec{i}(t) + y \cdot \vec{j}(t) + z \cdot \vec{k}(t) \quad (1.1)$$

Cunoașterea mișcării presupune exprimarea coordonatelor sale curente ca funcții de timp:

$$x = x(t), \quad y = y(t), \quad z = z(t) \quad (1.2)$$

Prin eliminarea parametrului timp din ecuațiile (1.2) se obțin ecuațiile implicite ale traiectoriei [22], [24]:

$$\begin{cases} f_1(x, y, z) = 0 \\ f_2(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

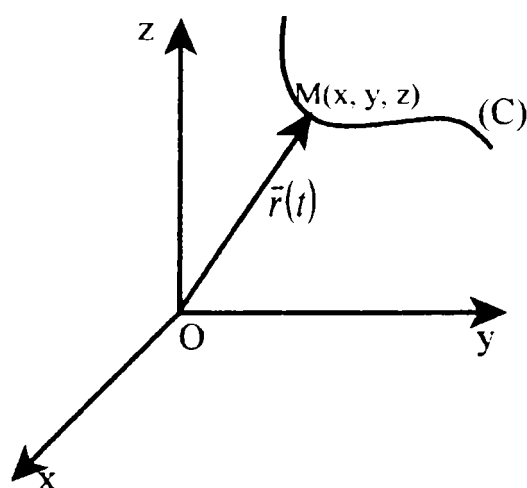


Fig. 1.1 Mișcarea punctului material în coordonate carteziene

Viteza punctului se obține prin derivarea vectorului de poziție în raport cu timpul [20], [21]:

$$\vec{v} = \dot{\vec{r}} = \dot{x} \cdot \vec{i} + \dot{y} \cdot \vec{j} + \dot{z} \cdot \vec{k} \quad (1.4)$$

Din relația (1.4) rezultă proiecțiile vitezei pe axele sistemului de referință:

$$v_x = \dot{x}(t), \quad v_y = \dot{y}(t), \quad v_z = \dot{z}(t) \quad (1.5)$$

În aceste condiții, modulul vitezei este [54]:

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} \quad (1.6)$$

Unghiurile suportului vectorului viteză cu axele de coordonate sunt [12]:

$$\cos(\vec{v}, \vec{i}) = \frac{\dot{x}}{v}, \quad \cos(\vec{v}, \vec{j}) = \frac{\dot{y}}{v}, \quad \cos(\vec{v}, \vec{k}) = \frac{\dot{z}}{v} \quad (1.7)$$

Accelerația se determină derivând în raport cu timpul expresia (1.4) [3], [24]:

$$\vec{a} = \dot{\vec{v}} = \ddot{\vec{r}} = \ddot{x} \cdot \vec{i} + \ddot{y} \cdot \vec{j} + \ddot{z} \cdot \vec{k} \quad (1.8)$$

cu proiecțiile:

$$a_x = \ddot{x}, \quad a_y = \ddot{y}, \quad a_z = \ddot{z} \quad (1.9)$$

și modulul:

$$a = \sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 + \ddot{z}^2} \quad (1.10)$$

Unghiurile suportului accelerației cu axele de coordonate sunt [3]:

$$\cos(\vec{a}, \vec{i}) = \frac{\ddot{x}}{a}, \quad \cos(\vec{a}, \vec{j}) = \frac{\ddot{y}}{a}, \quad \cos(\vec{a}, \vec{k}) = \frac{\ddot{z}}{a} \quad (1.11)$$

Prin însăși natura construcției echipamentului *Comp-U-Craft*, cu acționare de-a lungul unui sistem de axe perpendiculare între ele, studiul mișcării în coordonate carteziene se regăsește în majoritatea reprezentărilor din partea de CAD, precum și în majoritatea comenzilor de execuție din partea de CAM (fiind folosită exclusiv la trasarea segmentelor de dreaptă și a unor curbe neregulate, compuse din segmente concatenate). Aceste calcule sunt necesare pentru a se verifica dacă valorile rezultate pentru accelerații și viteze nu depășesc valorile limită ale mașinii cumulate cu cele ale proiectului, conform ierarhizării descrise amply în debutul paragrafului 1.3.

### 1.1.2 Studiul mișcării în coordonate intrinseci

Pentru a studia mișcarea punctului în coordonate intrinseci trebuie cunoscute traiectoria punctului și legea de mișcare  $s = s(t)$  (ecuația orară a mișcării [24]). Se folosește triedrul lui Frenet [7], [15] pentru determinarea vectorilor viteză și accelerație. Axele triedrului sunt tangenta la curbă, normala principală și binormala, ale căror versori sunt  $\vec{t}$ ,  $\vec{n}$  și  $\vec{b}$  (figura 1.2) [6], [7], [54].

Între cei trei versori există relația  $\vec{b} = \vec{t} \times \vec{n}$  [15].

Viteza se determină cu ajutorul relației [5], [13], [39]:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} \quad (1.12)$$

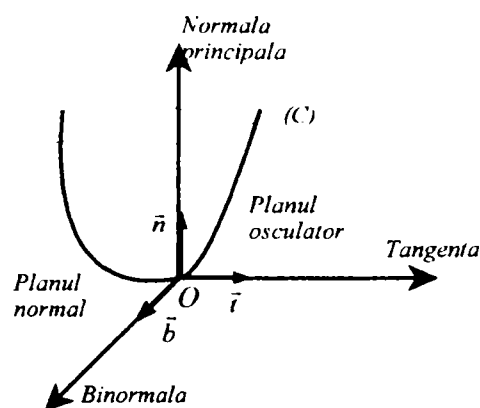


Fig. 1.2 Studiul mișcării în coordonate intrinseci

Deoarece  $\frac{ds}{dt} = \dot{s}$  rezultă proiecțiile vitezei pe axele triedrului lui Frenet [13], [17], [18]:

$$v_n = 0, \quad v_b = 0, \quad v_t = \dot{s} \quad (1.13)$$

și:

$$\vec{v} = \vec{t} \cdot \dot{s} \quad (1.14)$$

Vectorul viteză este dirijat după tangentă și are scalarul egal cu  $\dot{s}$ .

Accelerația se obține derivând în raport cu timpul relația (1.14) [5], [10], [24]:

$$\vec{a} = \dot{\vec{v}} = \ddot{s} \cdot \vec{t} + \dot{s} \cdot \dot{\vec{t}} \quad (1.15)$$

unde:

$$\dot{\vec{t}} = \frac{d\vec{t}}{dt} = \frac{d\vec{t}}{ds} \cdot \frac{ds}{dt} = \dot{s} \cdot \frac{\vec{n}}{\rho} \quad (1.16)$$

În consecință [13], [17]:

$$\vec{a} = \vec{t} \cdot \dot{v} + \vec{n} \cdot \frac{v^2}{\rho} \quad (1.17)$$

sau

$$\vec{a} = \vec{t} \cdot \dot{s} + \vec{n} \cdot \frac{\dot{s}^2}{\rho} = \vec{t} \cdot a_t + \vec{n} \cdot a_n \quad (1.18)$$

Din relația (1.18) rezultă proiecțiile accelerației pe axele sistemului Frenet [5], [10], [39]:

$$a_t = \dot{v}, \quad a_n = \frac{v^2}{\rho}, \quad a_b = 0 \quad (1.19)$$

și modulul

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2} = \sqrt{\dot{v}^2 + \frac{v^4}{\rho^2}} \quad (1.20)$$

Vectorul accelerație se găsește în planul osculator, deoarece  $a_b = 0$ . În relația (1.20), componenta  $a_t$  poartă denumirea de *accelerație tangențială* și caracterizează variația modulului vitezei, componenta  $a_n$  reprezintă *accelerația normală* și caracterizează variația direcției vitezei. Această componentă este continuu diri-

jată spre interiorul curbei. Formula accelerației poate fi folosită pentru determinarea razei de curbură.

Accelerația este nulă atunci când componentele  $a_t$  și  $a_n$  sunt nule, ceea ce înseamnă [10], [17], [24]:

$$\ddot{s} = \dot{v}_t = 0, \text{ adică } \dot{s} = v = ct.;$$

$$\frac{1}{\rho} = 0, \text{ pentru că } \dot{s} = ct.$$

Este evident că singura mișcare care se poate produce fără accelerație este mișcarea rectilinie și uniformă.

Studiul mișcării în coordonate intrinseci este necesar pentru urmărirea deplasării vârfului sculei pe traiectoria dorită, deoarece, în funcție de material și de tipul prelucrării, viteza de avans ar putea fi limitată sau chiar menținută constantă. După cum se va arăta detaliat la sfârșitul acestui capitol, cele mai bune rezultate, din punct de vedere metalografic, au fost obținute folosind o viteză constantă de avans de 30 mm/min, conjugată cu o viteză de așchiere de 120 m/min, materialul fiind tabla de oțel inoxidabil cu grosimea de 0,4 mm. Datorită faptului că viteza periferică se compune din vitezele imprimare de motoarele de acționare aferente celor trei axe perpendiculare între ele, supravegherea componentelor triortogonale nu este suficientă fără cunoașterea relației dintre acestea și rezultanta lor. Acest lucru este valabil mai ales în cazul evoluției pe curbe strâmbe, fiindcă vitezele componente variază continuu.

Studiul mișcării în coordonate intrinseci este folositor tocmai în acest din urmă caz, deoarece stabilește relații analitice clare între raza de curbură și vitezele, respectiv accelerațiile, implicate. Pentru o înțelegere mai clară a acestor relații, la sfârșitul subparagrafului 1.1.5 este dat un exemplu numeric inspirat din execuția arcelor de cerc folosite la racordarea segmentelor care alcătuiesc conturul implantelor metalice chirurgicale tip LN 331 S din catalogul „Aesculap“.

### 1.1.3 Studiul mișcării în coordonate polare plane

Se pornește de la ipoteza că punctul  $M$  se deplasează pe traiectoria  $C$ , traiectorie situată în planul  $xOy$  (figura 1.3) [54]. Poziția punctului cartezian  $M$  este determinată cu ajutorul coordonatelor  $(x, y)$  sau cu ajutorul coordonatelor polare  $(r, \theta)$ , unde  $r$  este raza polară, iar  $\theta$  este unghiul polar [16], [46], [59].

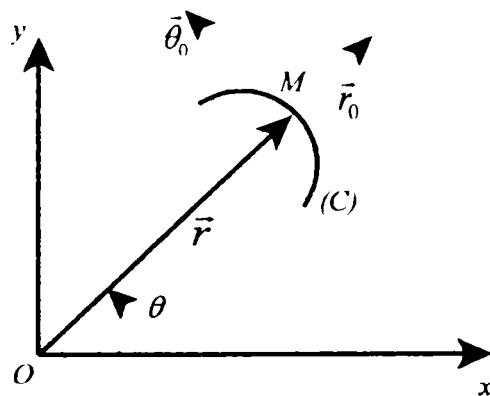


Fig. 1.3 Studiul mișcării în coordonate polare

Ecuțiile parametrice ale mișcării în coordonate polare plane sunt [16], [18]:

$$r = r(t), \quad \theta = \theta(t) \quad (1.21)$$

Între aceste coordonate și cele carteziene există relațiile [18], [37], [46]:

$$x = r \cdot \cos \theta, \quad y = r \cdot \sin \theta \quad (1.22)$$

$$r^2 = x^2 + y^2, \quad \tan \theta = \frac{y}{x}, \quad \theta = \arctan \frac{y}{x} \quad (1.23)$$

Pentru determinarea vitezei se alege un sistem de axe, astfel încât una dintre axe să fie dirijată după raza vectorială al cărei versor este  $\vec{r}_0$ , iar cealaltă să fie perpendi



culară pe raza vectoare  $\vec{r}$  de versor  $\vec{\theta}_0$ . În aceste condiții, vectorul de poziție al punctului  $A$  se poate scrie [4], [46], [47]:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 \cdot r \quad (1.24)$$

Viteza lui va fi [49]:

$$\vec{v} = \dot{\vec{r}} = \dot{\vec{r}}_0 \cdot \dot{r} + \vec{r}_0 \cdot \dot{r} \quad (1.25)$$

Deoarece  $\vec{r}_0$  este un versor de direcție variabilă, rezultă că  $\dot{\vec{r}}_0 = \vec{\theta}_0 \cdot \dot{\theta}$ , deci [37], [68]:

$$\vec{v} = \vec{r}_0 \cdot \dot{r} + \vec{\theta}_0 \cdot r \cdot \dot{\theta} \quad (1.26)$$

Dacă vectorul viteză se notează [3], [59], [68]:

$$\vec{v} = \vec{r}_0 \cdot v_r + \vec{\theta}_0 \cdot v_\theta \quad (1.27)$$

se obțin cele două proiecții ale vitezei în coordonate polare:

$$v_r = \dot{r}, \quad v_\theta = r \cdot \dot{\theta} \quad (1.28)$$

și modulul vitezei:

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_\theta^2} = \sqrt{\dot{r}^2 + (r \cdot \dot{\theta})^2} \quad (1.29)$$

Accelerația se obține prin derivarea expresiei vitezei (relația (1.26)) [49]:

$$\begin{aligned} \vec{a} = \dot{\vec{v}} &= \dot{\vec{r}}_0 \cdot \dot{r} + \dot{\vec{r}}_0 \cdot \dot{r} + \dot{\vec{\theta}}_0 \cdot r \cdot \dot{\theta} + \vec{\theta}_0 \cdot \dot{r} \cdot \dot{\theta} + \vec{\theta}_0 \cdot r \cdot \ddot{\theta} \\ &= \dot{\vec{r}}_0 \cdot (\dot{r} - r \cdot \dot{\theta}^2) + \vec{\theta}_0 \cdot (2 \dot{r} \cdot \dot{\theta} + r \cdot \ddot{\theta}) \end{aligned} \quad (1.30)$$

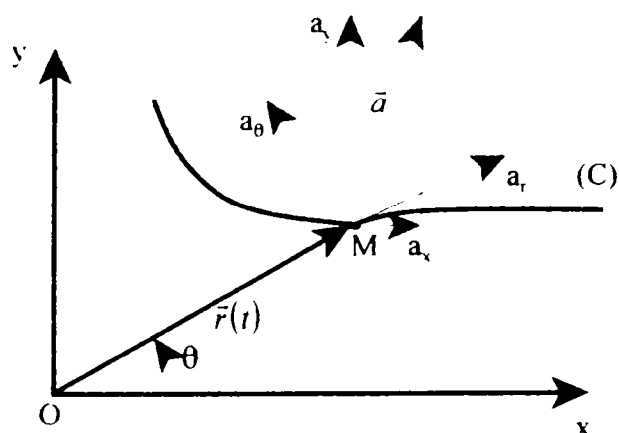


Fig. 1.4 Reprezentarea accelerației în coordonate polare

Dacă față de acest sistem vectorul accelerație se notează (figura 1.4) [54]:

$$\vec{a} = \vec{r}_0 \cdot a_r + \vec{\theta}_0 \cdot a_\theta \quad (1.31)$$

atunci cele două proiecții ale accelerației sunt [5], [16], [37]:

$$a_r = \ddot{r} - r \cdot \dot{\theta}^2, \quad a_\theta = 2 \dot{r} \cdot \dot{\theta} + r \cdot \ddot{\theta} \quad (1.32)$$

$$a = \sqrt{a_r^2 + a_\theta^2} = \sqrt{(\ddot{r} - r \cdot \dot{\theta}^2)^2 + (2 \dot{r} \cdot \dot{\theta} + r \cdot \ddot{\theta})^2} \quad (1.33)$$

Reprezentarea în coordonate plane se folosește cu precădere în cazul execuțiilor găurilor circulare, datorită simplității reprezentării și calculelor, precum și a ușurinței de conversie în și din coordonate carteziene (relațiile (1.22) și (1.23)).

#### 1.1.4 Studiul mișcării în coordonate cilindrice

Într-un sistem de coordonate cilindrice poziția punctului  $A$  este definită de unghiul polar  $\theta$ , raza polară  $r$  și cota  $z$  (figura 1.5) [20], [49], [54].

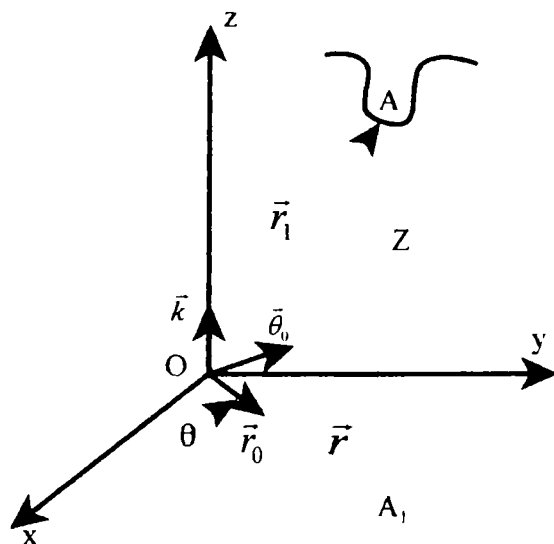


Fig. 1.5 Studiul mișcării în coordonate cilindrice

Pentru a cunoaște mișcarea este necesară cunoașterea a trei funcții, care reprezintă ecuațiile mișcării în coordonate cilindrice [16], [40], [68]:

$$r = r(t)$$

$$\theta = \theta(t) \tag{1.34}$$

$$z = z(t)$$

Se alege un sistem de referință cu una dintre axe dirijată după raza polară  $OA_1$ , de versor  $\vec{r}_0$ , cu o alta dirijată după axa  $Oz$ , de versor  $\vec{k}$ , iar cea de-a treia perpendiculară pe  $OA_1$ , conținută în planul  $xOy$  și având versorul  $\vec{\theta}_0$ . În aceste condiții, vectorul de poziție al punctului  $A$  se exprimă astfel [59]:

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_0 \cdot r + \vec{k} \cdot z \tag{1.35}$$

Viteza punctului  $A$  se obține prin derivarea în raport cu timpul a relației (1.35):

$$\vec{v} = \dot{\vec{r}}_1 = \vec{r}_0 \cdot \dot{r} + \dot{\vec{r}}_0 \cdot r + \vec{k} \cdot \dot{z} = \vec{r}_0 \cdot \dot{r} + \vec{\theta}_0 \cdot r \cdot \dot{\theta} + \vec{k} \cdot \dot{z} \quad (1.36)$$

de unde proiecțiile vitezei:

$$\begin{aligned} v_r &= \dot{r} \\ v_\theta &= r \cdot \dot{\theta} \\ v_z &= \dot{z} \end{aligned} \quad (1.37)$$

și modulul:

$$v = \sqrt{\dot{r}^2 + (r \cdot \dot{\theta})^2 + \dot{z}^2} \quad (1.38)$$

Accelerația rezultă din derivarea relației (1.36) în raport cu timpul [37], [58]:

$$\vec{a} = \vec{r}_0 \cdot (\ddot{r} - r \dot{\theta}^2) + \dot{\vec{\theta}}_0 \cdot (2 \dot{r} \cdot \dot{\theta} + r \cdot \ddot{\theta}) + \vec{k} \cdot \ddot{z} \quad (1.39)$$

proiecțiile accelerației:

$$\begin{aligned} a_r &= \ddot{r} - r \dot{\theta}^2 \\ a_\theta &= 2 \dot{r} \cdot \dot{\theta} + r \cdot \ddot{\theta} \\ a_z &= \ddot{z} \end{aligned} \quad (1.40)$$

modulul accelerației:

$$a = \sqrt{(\ddot{r} - r \dot{\theta}^2)^2 + (2 \dot{r} \cdot \dot{\theta} + r \cdot \ddot{\theta})^2 + (\ddot{z})^2} \quad (1.41)$$

Pe mașina *Comp-U-Craft* echipată cu freză și cu acționare pe numai trei axe, filetarea nu este posibilă. Este posibilă, însă, frezarea filetelor de formă specială,

cu ajutorul unui mic dispozitiv atașabil opțional, aflat încă în dezvoltare. În acest caz, reprezentarea în coordonate cilindrice simplifică sensibil volumul calculelor necesare în acest scop.

### 1.1.5 Determinarea razei de curbură a traiectoriei

Dacă mișcarea se face după legea  $\vec{r} = \vec{r}(t)$ , atunci accelerația poate fi determinată sub formă carteziană [59]:

$$\vec{a} = \ddot{\vec{r}} = \ddot{x} \cdot \vec{i} + \ddot{y} \cdot \vec{j} + \ddot{z} \cdot \vec{k}$$

Din relațiile în coordonate intrinseci pentru viteză și accelerație (relațiile (1.14) și (1.18)) rezultă [13], [17]:

$$\vec{v} \times \vec{a} = v \cdot a_t \cdot (\vec{t} \times \vec{t}) + v \cdot a_n \cdot (\vec{t} \times \vec{n}) = \frac{v^3}{\rho} \cdot \vec{b} \quad (1.42)$$

$$|\vec{v} \times \vec{a}| = \frac{v^3}{\rho} \quad (1.43)$$

De unde:

$$\rho = \frac{v^3}{|\vec{v} \times \vec{a}|} \quad (1.44)$$

sau:

$$\rho = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2)^{3/2}}{\left[ (\dot{y} \cdot \ddot{z} - \dot{y} \cdot \ddot{z})^2 + (\dot{z} \cdot \ddot{x} - \dot{z} \cdot \ddot{x})^2 + (\dot{x} \cdot \ddot{y} - \dot{x} \cdot \ddot{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (1.45)$$

Relația (1.45) reprezintă expresia razei de curbură obținută numai cu ajutorul elementelor cinematice: viteza și accelerația [54].

În contextul obiectivului acestei teze, realizarea implantelor chirurgicale metalice, se observă (figura 4.2) că majoritatea formelor de executat sunt compuse din segmente, cercuri și arce de cerc. Studiul de caz (figura 4.11) este concludent în acest sens. Dacă trasarea segmentelor nu pune mari probleme, ea fiind descrisă amănunțit în capitolul al treilea, descrierea cercurilor și a arcelor de cerc trebuie tratată cu precauție din cauza constrângerilor impuse de regimul de așchiere al diferitelor metale. Astfel, în cazul frezării trebuie controlați doi parametri importanți: viteza de așchiere și viteza de avans în material. Primul poate fi controlat cu ușurință prin alegerea corespunzătoare a diametrului frezei în conjuncție cu turația motorului acesteia. Al doilea este mai dificil de controlat, deoarece, după cum rezultă din relația (1.45), pentru a obține o viteză tangențială constantă a vârfului sculei pe traiectoria circulară de executat, vitezele componente (imprimare de motoarele de acționare de-a lungul axelor paralele cu cele ale reperului ortonormal) variază continuu. Aceasta este o primă constrângere, deoarece echipamentul *Comp-U-Craft*, prin însăși alegerea acționării cu motoare pas cu pas, lucrează într-un spațiu discret. Efectul negativ al acestei constrângeri a fost atenuat semnificativ de rezoluția ridicată de care este capabilă mașina.

O altă constrângere este cea care urmărește ca regimurile de lucru ale motoarelor să nu încalce constrângerile impuse. Acestea au fost ierarhizate, în scopul gestionării eficiente la nivelul software, după cum este arătat pe larg în paragraful 1.3. În orice caz, înainte de a se începe trasarea unui arc de cerc, trebuie cunoscute valorile maxime ale vitezelor și ale accelerațiilor care intervin, raportate la nivelul motoarelor de acționare. În acest sens, se observă din figura 1.6 că punctele de pe traiectoria unui cerc, care prezintă valori maxime ale vitezelor și ale accelerațiilor componente se află la unghiuri care sunt multiplu de  $90^\circ$ . Pe figură a fost reliefat și cazul particular al unghiurilor multiplu impar de  $45^\circ$ , când valorile modulelor vitezelor componente sunt egale, după cum și valorile modulelor accelerațiilor sunt, de asemenea, egale.

Luând în considerație cazul execuției implantului LN 331 S din catalogul „Aesculap“, se observă că segmentele componente ale conturului acesteia sunt

racordate cu arce de cerc având raza de 5 mm. Ținând seama de cele descrise anterior, precum și de faptul că viteza de avans în material, în cazul oțelului inoxidabil biocompatibil cu grosimea de 0,4 mm, este de 30 mm/min din considerentele prezentate în cele ce urmează, verificarea valorilor maxime ale vitezelor și ale accelerațiilor se face conform aplicației numerice descrise în continuare.

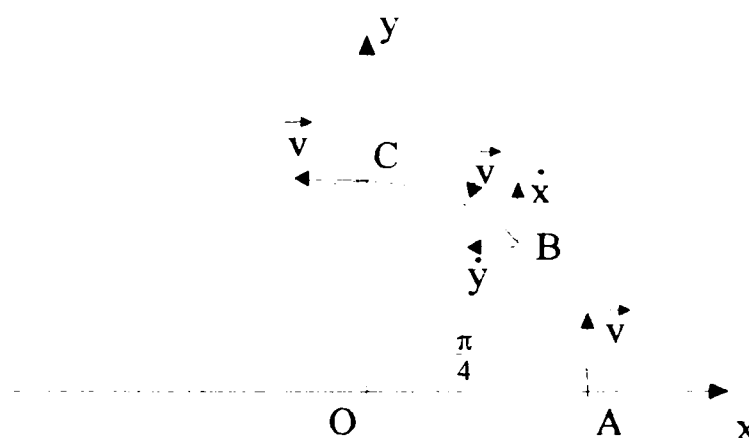


Fig. 1.6 Explicativă la trasarea arcelor de cerc

În primul rând, se observă că avem de a face cu o figură plană, caz în care  $z = 0$ . Relația (1.45) devine:

$$\rho = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}{[(\dot{x} \cdot \ddot{y} - \ddot{x} \cdot \dot{y})^2]^{1/2}} = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}{\dot{x} \cdot \ddot{y} - \ddot{x} \cdot \dot{y}}$$

Pentru  $\rho = 5 \text{ mm}$  și o viteză de avans de  $30 \text{ mm/min} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  rezultă:

Punctul A:

$$\dot{x} = 0$$

$$\dot{y} = |\vec{v}| = \text{maxim}$$

$$\ddot{x} = \text{maxim} = ?$$

$$\ddot{y} = 0$$

$$\rho = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}{\dot{x} \cdot \ddot{y} - \ddot{x} \cdot \dot{y}} = \frac{(\dot{y}^2)^{3/2}}{(-\ddot{x} \dot{y})} = \frac{\dot{y}^3}{(-\ddot{x} \dot{y})} = \frac{\dot{y}^2}{(-\ddot{x})}$$

$$\ddot{x} = \frac{\dot{y}^2}{(-\rho)} = \frac{(0,5 \cdot 10^{-3})^2}{(-5 \cdot 10^{-3})} = -5 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

Punctul B:

$$\dot{x} = \dot{y} = \frac{|\vec{v}| \cdot \sqrt{2}}{2} = 0,35 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$-\ddot{x} = \ddot{y}$$

$$\rho = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}{\dot{x} \cdot \ddot{y} - \ddot{x} \cdot \dot{y}} = \frac{(2\dot{x}^2)^{3/2}}{2\ddot{x} \dot{x}} = \frac{2\sqrt{2} \dot{x}^3}{2\ddot{x} \dot{x}} = \frac{\sqrt{2} \dot{x}^2}{\ddot{x}}$$

$$\ddot{x} = \frac{\sqrt{2} \dot{x}^2}{\rho} = \frac{(0,35 \cdot 10^{-3})^2 \cdot \sqrt{2}}{5 \cdot 10^{-3}} = 3,5 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$



Punctul C:

$$\dot{x} = |\bar{v}| = \text{maxim}$$

$$\dot{y} = 0$$

$$\ddot{x} = 0$$

$$\ddot{y} = \text{maxim} = ?$$

$$\rho = \frac{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{3/2}}{\dot{x} \cdot \ddot{y} - \ddot{x} \cdot \dot{y}} = \frac{(\dot{x}^2)^{3/2}}{\dot{x} \ddot{y}} = \frac{\dot{x}^3}{\dot{x} \ddot{y}} = \frac{\dot{x}^2}{\ddot{y}}$$

$$\ddot{y} = \frac{\dot{x}^2}{\rho} = \frac{(0,5 \cdot 10^{-3})^2}{5 \cdot 10^{-3}} = 5 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$$

În calculul traiectoriilor necesare trebuie să se țină seama de caracteristicile de material, de tipul prelucrării, de tipul și de forma sculei prelucrătoare, precum și de nivelul de finisare al suprafețelor și muchiilor obținute. Astfel, pentru obținerea implantelor din tablă de oțel inoxidabil biocompatibil, de grosime 0,4÷1,2 mm, prin frezare cu freze cilindrice Widia de  $\varnothing 1 \div 2$  mm, s-au adoptat următoarele valori, verificate experimental:

- viteza de așchiere: 120 m/min.
- avansul sculei în material: 30 mm/min.

Motorul frezei folosite are turația de 30.000 de rotații pe minut, ceea ce conduce la o viteză de așchiere de 94,25 m/min. pentru freza cilindrică  $\varnothing 1$  mm sau la o viteză de 188,5 m/min. pentru freza cilindrică  $\varnothing 2$  mm. Diametrul cel mai apropiat al frezei cilindrice, pentru obținerea vitezei indicate de așchiere la 30.000 de rotații pe minut, este  $\varnothing 1,3$  mm.

### 1.1.6 Mișcări curbilinii uzuale

În paragraful 1.1 au fost reunite elementele necesare studiului mișcării unui punct material, asociat vârfului sculei în punctul de interacțiune cu materialul, pe orice dreaptă din spațiul triortogonal acoperit de capacitățile mașinii *Comp-U-Craft*. În marea majoritate a cazurilor, piesele care se doresc a fi executate fie au forme regulate, fie se compun din forme regulate. Statistic vorbind, execuția acestor forme deține ponderea cea mai importantă din totalul operațiilor care se cer a fi executate. Având în vedere că echipamentul *Comp-U-Craft* a depășit de mult faza implementării de principiu și se află la maturitate, în timpul perfecționărilor tehnologice, s-a pus problema creșterii vitezei de execuție fără penalități de calitate a acesteia. O metodă de atingere a acestui deziderat este cea care decurge din legea lui Amdahl, care enunță că sporul maxim de performanță se obține prin creșterea vitezei cazului comun (*Make the Common Case Faster!*) Deși Amdahl a enunțat această lege referindu-se la performanțele sistemelor de calcul, ea poate fi extinsă și în alte domenii tehnice, un exemplu fiind dat în prezentul subparagraf care tratează două tipuri de curbe, mai des întâlnite în execuția pieselor. Primul caz studiat este cel al mișcării circulare întâlnite la execuția găurilor, a contururilor rotunde sau al arcelor de racord. Al doilea caz studiat este cel al mișcării pe elice, întâlnite în cazul execuției filetelor șuruburilor. Relațiile pentru aceste mișcări curbilinii particulare, regulate, comportă expresii simplificate față de cele ale unor curbe oarecare, reducând astfel efortul computațional din partea sistemului de calcul, cu influență benefică imediată asupra vitezei de execuție și asupra preciziei acesteia.

#### 1.1.6.1 Mișcarea circulară

a) Coordonate carteziene (figura 1.7) [54]

Ecuția de mișcare are forma [8], [58]:

$$x = R \cos \theta, \quad y = R \sin \theta \quad (1.46)$$

iar viteza are expresia:

$$\vec{v} = v_x \cdot \vec{i} + v_y \cdot \vec{j} \quad (1.47)$$

de unde:

$$v_x = \dot{x} = -R \cdot \dot{\theta} \cdot \sin \theta \quad (1.48)$$

$$v_y = \dot{y} = R \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta$$

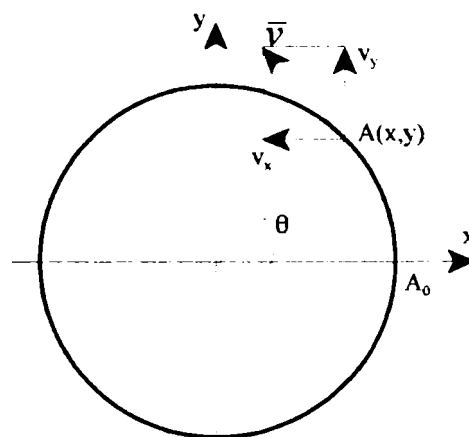


Fig. 1.7 Studiul mișcării circulare în coordonate carteziene

În relațiile (1.48)  $\dot{\theta} = \omega$  și reprezintă viteza unghiulară:

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} = R \cdot \omega \quad (1.49)$$

Accelerația se determină prin derivarea vitezei în raport cu timpul [8]:

$$\vec{a} = a_x \cdot \vec{i} + a_y \cdot \vec{j} \quad (1.50)$$

adică:

$$a_x = \dot{v}_x = -R \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \cos \theta - R \cdot \ddot{\theta} \cdot \sin \theta \quad (1.51)$$

$$a_y = \dot{v}_y = -R \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin \theta + R \cdot \ddot{\theta} \cdot \cos \theta$$

Dar  $\ddot{\theta} = \varepsilon$  și se numește *acelerație unghiulară*. Astfel [8], [58]:

$$a = \sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2} = R \sqrt{\ddot{\theta}^2 + \dot{\theta}^4} = R \sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4} \quad (1.52)$$

b) Coordonate polare (figura 1.8) [54]

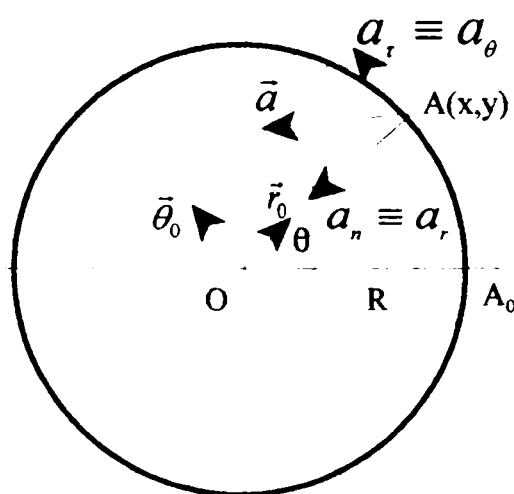


Fig. 1.8 Studiul mișcării circulare în coordonate polare

Ecuțiile mișcării  $r = r(t)$  și  $\theta = \theta(t)$ , devin pentru mișcarea circulară [58]:

$$\begin{aligned} r &= R = \text{const} \\ \theta &= \theta(t) \end{aligned} \quad (1.53)$$

Viteza este:

$$v_r = \dot{r} = 0 \quad (1.54)$$

$$v_{\theta} = r \cdot \dot{\theta} = R \cdot \dot{\theta} = R \cdot \omega \quad (1.55)$$

adică:

$$v = R \cdot \omega \quad (1.56)$$

În cazul accelerației [8]:

$$a_r = \ddot{r} - r \cdot \dot{\theta}^2 = -r \cdot \dot{\theta}^2 = -R \cdot \omega^2 \quad (1.57)$$

Semnul minus din relația (1.57) indică faptul că această componentă are sensul invers versorului  $\vec{r}_0$ .

$$a_{\theta} = 2\dot{r} \cdot \dot{\theta} + r \cdot \ddot{\theta} = r \cdot \ddot{\theta} = R \cdot \varepsilon \quad (1.58)$$

adică:

$$a = R \sqrt{\varepsilon^2 + \omega^4} \quad (1.59)$$

La finele subparagrafului anterior a fost prezentat un exemplu numeric de execuție al conturilor circulare. Acest exemplu face parte integrantă din execuția implan-tului metalic tip LN 331 S din catalogul „Aesculap“, prezentată ca studiu de caz în capitolul al patrulea.

### 1.1.6.2 Mișcarea pe elice

Ecuțiile parametrice ale elicei sunt:

$$\begin{aligned} x &= R \cdot \cos \theta \\ y &= R \cdot \sin \theta \\ z &= R \cdot \theta \cdot \tan \alpha \end{aligned} \quad (1.60)$$

unde  $\alpha$  este panta elicei, iar  $p$  este pasul ei (figura 1.9) [54].

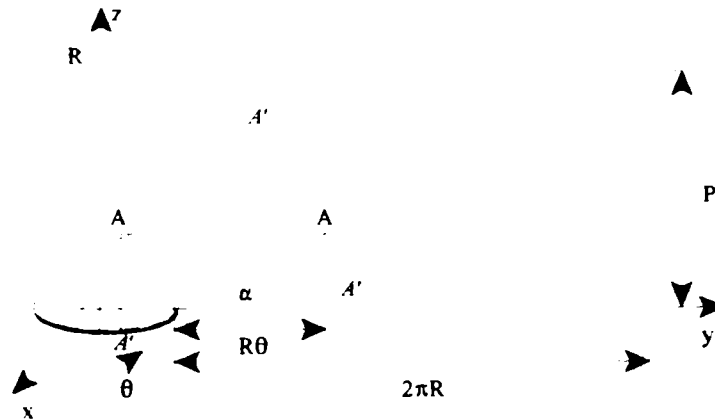


Fig. 1.9 Studiul mișcării pe elice

Ecuatiile (1.60) reprezintă legea de mișcare a mobilului pe elice dacă  $\theta = \theta(t)$ .

Viteza:

$$\begin{aligned} v_x &= \dot{x} = -R \cdot \dot{\theta} \cdot \sin \theta = -R \cdot \omega \cdot \sin \theta = -\omega \cdot y \\ v_y &= \dot{y} = R \cdot \dot{\theta} \cdot \cos \theta = R \cdot \omega \cdot \cos \theta = \omega \cdot x \\ v_z &= \dot{z} = -R \cdot \dot{\theta} \cdot \tan \alpha = -R \cdot \omega \cdot \tan \alpha = -\lambda \cdot \omega \end{aligned} \quad (1.61)$$

unde  $R \cdot \tan \alpha = \lambda$ , sau:

$$\vec{v} = \omega \cdot y \cdot \vec{i} + \omega \cdot x \cdot \vec{j} + \lambda \cdot \omega \cdot \vec{k} \quad (1.62)$$

Componenta  $\lambda \cdot \omega$  se numește *componentă de alunecare*, iar componenta  $\omega \cdot y \cdot \vec{i} + \omega \cdot x \cdot \vec{j}$  se numește *componentă de rotație*. Modulul vitezei este:

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2} = R \cdot \omega \sqrt{1 + \tan^2 \alpha} = \frac{R \cdot \omega}{\cos \alpha} \quad (1.63)$$

Accelerația:

$$\begin{aligned}
 a_x &= \ddot{x} = -R \cdot \ddot{\theta} \cdot \sin \theta - R \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \cos \theta \\
 a_y &= \ddot{y} = -R \cdot \ddot{\theta} \cdot \cos \theta - R \cdot \dot{\theta}^2 \cdot \sin \theta \\
 a_z &= \ddot{z} = R \cdot \ddot{\theta} \cdot \tan \alpha
 \end{aligned}
 \tag{1.64}$$

Modulul accelerației este:

$$a = \sqrt{\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2 + \ddot{z}^2} = R \sqrt{\dot{\theta}^4 + \ddot{\theta}^2 \cdot (1 + \tan^2 \alpha)}
 \tag{1.65}$$

Dacă  $\omega$  este constant, atunci  $\varepsilon = 0$ :

$$\begin{aligned}
 a_x &= -\omega^2 \cdot x \\
 a_y &= -\omega^2 \cdot y
 \end{aligned}
 \tag{1.66}$$

iar

$$a = R \cdot \omega^2
 \tag{1.67}$$

Determinarea razei de curbură:

Dacă  $\omega$  este constant, atunci  $a = R \cdot \omega^2$ :

$$\begin{aligned}
 a_t &= \dot{v} = 0 \\
 a_n &= \frac{v^2}{\rho} = \frac{R^2 \cdot \omega^2}{\rho \cdot \cos^2 \alpha}
 \end{aligned}
 \tag{1.68}$$

De aici se obține:

$$\rho = \frac{R}{\cos^2 \alpha} \quad (1.69)$$

Aplicația vizată direct este frezarea filetelor de formă specială, așa cum s-a arătat la finele subparagrafului 1.1.4.

Structurarea referințelor bibliografice referitoare la mișcarea punctului material a fost necesară din următoarele motive:

- Punctul material a fost asociat cu vârful sculei de lucru;
- Cunoașterea traiectoriei acestui punct nu este suficientă, deoarece tipul motoarelor pas cu pas utilizate la acționarea suportului port-sculă, în conjuncție cu masele puse în mișcare și cu tipul materialelor și a operațiilor executate, generează constrângeri de viteză și de accelerație, care trebuie modelate în algoritmi de acționare. Ponderea majoră în această modelare este dată de paragrafele referitoare la studiul mișcării în coordonate carteziene și în coordonate intrinseci, deoarece sistemul constructiv al mașinii se bazează pe compunerea mișcării din acționări pe direcții paralele cu axele unui sistem triortogonal;
- Studiul mișcării în coordonate polare plane a fost folosit atât în partea de CAD, la modelarea corecției de sculă (de exemplu, în cazul decupării unei piese cu un contur dat, cu ajutorul unei freze de diametru dat, după cum este ilustrat în figura 4.48), cât și în partea de CAM pentru determinarea vitezelor de așchiere. De exemplu, pentru execuția găurilor circulare cu o freză al cărei diametru este, evident, cunoscut, este suficientă scăderea razei sculei din valoarea razei polare, unghiul polar rămânând nemodificat (figura 1.3).
- Mișcările curbilinii uzuale au fost documentate pentru că trasarea cercurilor și a elicoidelor sunt operații întâlnite relativ des în practică, fiind necesară modelarea lor în partea de CAM. De asemenea, în vederea execuției trebuie cunoscută raportarea evoluției pe astfel de curbe la nivelul axelor triortogonale, deoarece trebuie verificată permanent



încadrarea parametrilor de acționare în constrângerile impuse de echipament și de proiect.

- Este necesară supravegherea vitezelor și a accelerațiilor atât la nivelul componentelor triortogonale (pentru a evita supracomandarea motoarelor), cât și la nivel periferic (pentru a evita ruperea sculei în material, prin depășirea regimurilor de așchiere suportate de acesta), indiferent de modul de reprezentare, respectiv de comandă, ales pentru descrierea unui tip anume de curbă. De fapt, singura situație în care aceste constrângeri sunt mai „relaxate“ este cea în care scula se deplasează „în aer“ și nu prin material, caz în care intervin doar constrângerile mașinii, fiind suficientă supravegherea doar a componentelor ortonormale ale vitezei și ale accelerației, rezultatul compunerii acestora neavând relevanță.

Se cere menționat faptul că drumul parcurs de la modelul matematic și până la comandarea efectivă a motoarelor prin software este mai lung, fiind supus unor constrângeri. Dacă la nivelul CAD reprezentarea parametrică a curbei pe care se va mișca scula prelucrătoare este suficientă, la nivelul CAM ea trebuie cunoscută ca lege de mișcare în spațiul triortogonal, în funcție de timp. Această mișcare este descompusă în segmente componente, așa cum se arată detaliat în capitolul al treilea. Pentru fiecare segment se calculează numărul de pași, precum și repartizarea acestora pe zonele de accelerație pozitivă, nulă și, respectiv, negativă. Dacă la reprezentările curbelor și a legilor de mișcare pe traiectoriile aferente se folosesc numere raționale a căror precizie este limitată doar de particularitățile sistemului de calcul, la reprezentarea segmentelor care alcătuiesc aceste traiectorii se folosesc exclusiv numere întregi, aceasta fiind o constrângere impusă de construcția motoarelor pas cu pas.

Valorile astfel calculate trec prin filtrul ierarhic al constrângerilor, descris detaliat în paragraful 1.3, pentru a nu se ajunge în situația supracomandării motoarelor de acționare. Mai exact, ierarhia a fost instituită pentru a reduce la minimum numărul de comparații, fiecare nivel raportându-se numai la cel imediat superior. Controlul

acestor valori se face prin interfețe specifice, la fiecare nivel. Astfel, în fereastra *Machine Characteristics* (figura 4.14) se controlează valorile maxime ale accelerațiilor și ale vitezelor, limitate de mașina comandată. Cu alte cuvinte, la acest nivel se stabilesc valorile maxime ale vitezelor și ale accelerațiilor, limitate de caracteristicile intrinseci ale motoarelor alese și de masele pe care acestea le pun în mișcare, fiind vorba, practic, de deplasările pe care echipamentul le face „în gol“, fără ca scula prelucrătoare să interacționeze cu materialul de prelucrat. Setarea valorilor pentru deplasarea pe axele X și Y se face unitar, pentru că între aceste axe nu există diferențe notabile, iar pentru axa Z setările sunt separate, deoarece aici intervine gravitația, ca mărime suplimentară de care trebuie ținută seama în calcule.

Se observă, din interfața prezentată în figura 4.14, că aici se pot introduce valorile limită pentru:

- viteza maximă (*Jog Speed*);
- accelerația maximă (*Acceleration*);
- lungimea axelor (*X, Y, Z Axis Length*);
- unitatea de măsură în care lucrează utilizatorul (*Ratiometric Unit*), rezoluția echipamentului (*Ratiometric Steps per Unit*);
- polaritatea comutatoarelor de sfârșit de cursă;
- întârzierea după care se începe execuția unui nou segment (*Segment Start Delay*);
- viteza minimă a motoarelor (*Low Speed*).

Ultimii doi parametri au fost intenționat lăsați la urmă, deoarece necesită un comentariu. Din figura 1.10 rezultă că, pentru execuția unui segment, viteza inițială este nulă, crește liniar (panta de accelerare fiind limitată de proprietățile lanțului cinematic de acționare), atinge viteza maximă (pe care o menține pe timpul impus de segmentul de prelucrat), după care scade până la zero pe panta de decelerare (de asemenea liniară și, în cele mai multe cazuri, simetrică cu cea de accelerare). Graficul este principial și este reprezentat continuu. În realitate, însă,

comanda directă a motoarelor se face în pași, vitezele fiind reprezentate în pași pe secundă, iar accelerațiile în pași pe secundă la pătrat. Pașii nu pot fi decât numere întregi, iar viteza nulă este interpretată drept staționare. Mai mult, la încărcare maximă, motoarele prezintă o viteză minimă la care pot înfrânge toate forțele și cuplurile rezistente, după cum la frânare, această este viteza minimă de la care se garantează oprirea completă. Rularea la viteze mai mici decât aceasta este, deci, nejustificată, motiv pentru care a fost introdusă ca valoare limită la nivelul caracteristicilor de echipament.

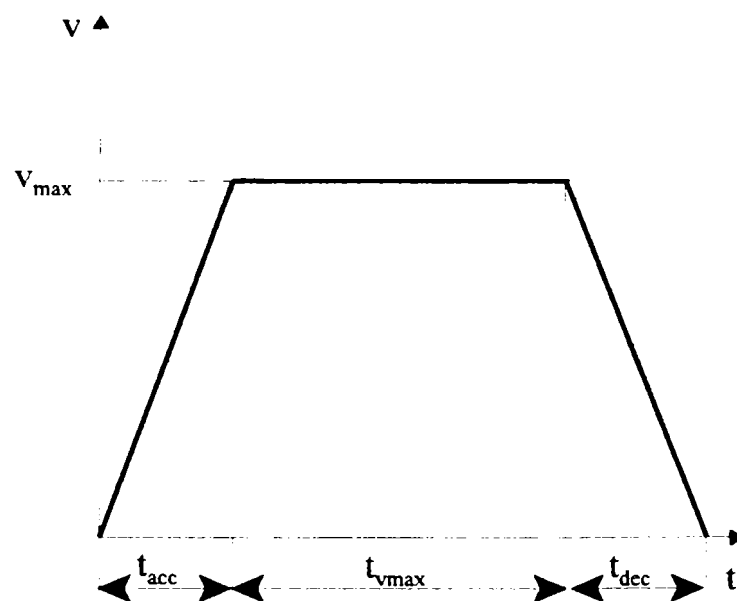


Fig. 1.10 Graficul de acționare a unui motor pentru execuția unui segment

În ceea ce privește celălalt parametru supus discuției, acesta are legătură cu reprezentarea curbelor în format HPGL, descris detaliat în capitolul al treilea. Extrem de rar este necesar ca un segment să fie trasat singular. De regulă, segmentul este cuanta de compunere a unei curbe spațiale complexe, descrierea acesteia fiind o înlanțuire a execuției acestor entități. Dacă nu se asigură o latență corespunzătoare

între ultimul pas al unui segment anterior și primul pas al unui segment următor se poate depăși panta maximă admisă a accelerației, ceea ce va conduce la pierderea de pași și, implicit, la compromiterea proiectului de executat, având în vedere faptul că, de regulă, partea de CAM din software lucrează cu coordonate relative.

## 1.2 Mișcarea compusă a rigidului

### 1.2.1 Preliminarii

Pentru a face analiza globală a unor mecanisme ale echipamentului de lucru, este necesar să se precizeze mișcarea unui rigid  $C_0$  față de un triedru mobil legat solidar de un corp  $C_1$  aflat în mișcare.

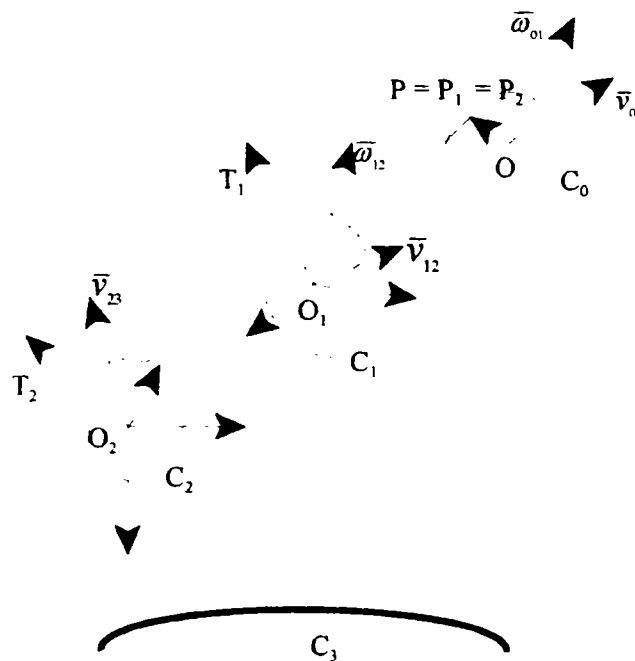


Fig. 1.11 Studiul mișcării relative a rigidului

Mișcarea corpului  $C_1$  este cunoscută, deci și mișcarea triedrului legat solidar de acest rigid față de un alt corp  $C_2$ , sau mai bine zis față de un reper legat de acest corp, este cunoscută. Corpul  $C_2$  poate avea și el o mișcare cunoscută față de un alt corp ș.a.m.d. Se dorește stabilirea distribuției de viteze și de accelerații a punctelor corpului  $C_0$  față de corpul presupus fix, când sunt cunoscute mișcările relative ale rigidelor [23].

În figura 1.11 [54], mișcarea corpului  $C_0$  față de triedrul  $T_1$ , legat de corpul  $C_1$  aflat în mișcare, este determinată de parametrii vectoriali  $\vec{v}_{01}$  și  $\vec{\omega}_{01}$ . La rândul ei, mișcarea corpului  $C_1$  față de corpul  $C_2$  este determinată de vectorii  $\vec{v}_{12}$  și  $\vec{\omega}_{12}$  etc. Se dorește determinarea vitezei și a accelerației unui punct  $P$  față de corpul  $C_3$ , precum și determinarea parametrilor  $\vec{v}_{03}$  și  $\vec{\omega}_{03}$ ,  $\vec{a}_{03}$  și  $\vec{\epsilon}_{03}$ , care caracterizează mișcarea rigidului  $C_0$  față de corpul  $C_3$  [23]. O analiză de acest tip s-a impus la conceperea schemei cinematice a echipamentului care, la rândul său, conține lanțuri cinematice în care compunerea vitezelor și a accelerațiilor se realizează conform relațiilor stabilite teoretic. Acestea, create pe baza prezentării teoretice anterioare a modului de compunere a vitezelor, sunt ilustrate în figurile 1.12, 1.13 și 1.14, pentru axele X, Y și Z ale echipamentului *Comp-U-Craft*.

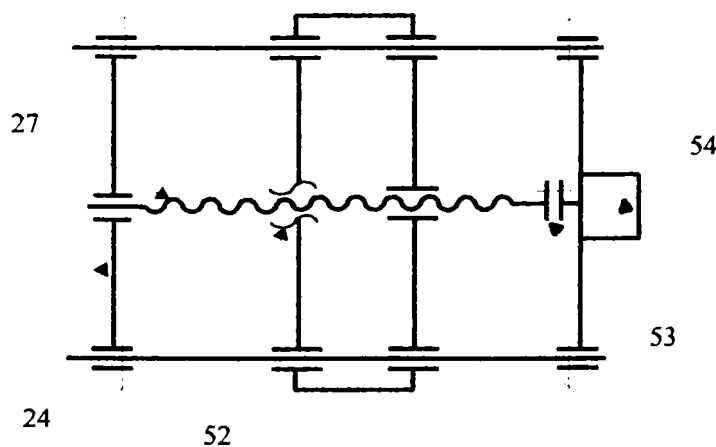


Fig. 1.12 Schema cinematică a acționării după axa X

Aționarea după axa X (figura 1.12) presupune un suport mobil, solidar cu piulița conducătoare (reperul 52) care culisează pe două glisiere încastate în pereții laterali. Motorul pas cu pas (reperul 54) acționează asupra suportului prin intermediul șurubului conducător (reperul 27), de care este legat printr-un cuplaj fix (reperul 53). Șurubul conducător trece printr-un ghidaj și se sprijină într-o bușă, în scopul evitării încovoierii sale în timpul solicitărilor dinamice. Această axă este cea mai solicitată, din punct de vedere al încărcării, deoarece susține întreg ansamblul cinematic al axei Z (figura 1.16), împreună cu suportul port-sculă și cu motorul de acționare al sculei. Din acest motiv, în paragraful 1.3 a fost detaliată proiectarea tocmai a acestei axe.

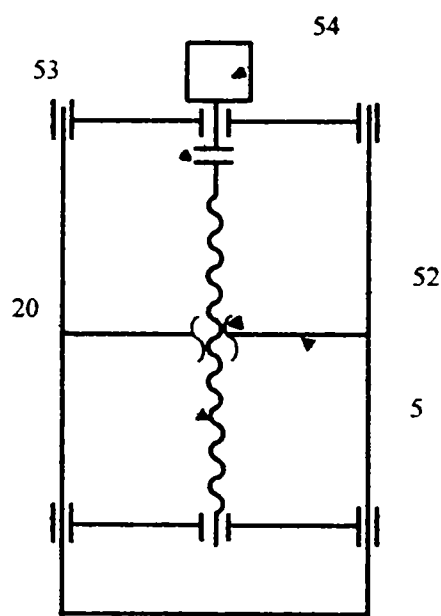


Fig. 1.13 Schema cinematică a acționării după axa Y

Ansamblul cinematic al acționării după axa Y (figura 1.13) se compune dintr-o masă mobilă, prevăzută cu găuri filetate de prindere a piesei de prelucrat, solidară cu placa spate mobilă (reperul 5) care conține piulița conducătoare (reperul 52) angrenată cu șurubul conducător (reperul 20). Motorul (reperul 54) acționează asupra acestuia din urmă printr-un cuplaj fix (reperul 53). Masa de lucru se sprijină

pe două glisiere care culisează prin intermediul bușelor încastate în placa spate fixă, care susține și motorul pas cu pas, respectiv în placa față fixă.

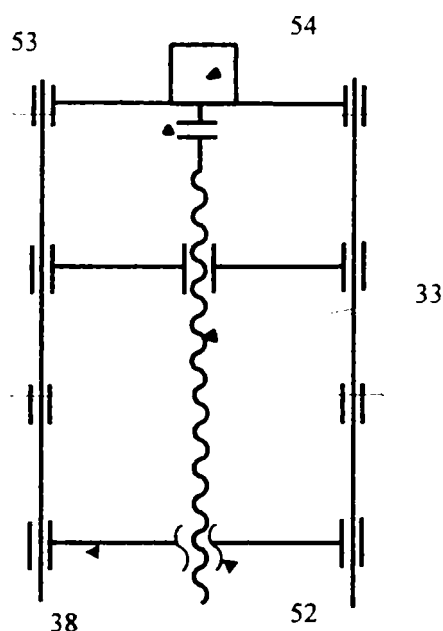


Fig. 1.14 Schema cinematică a acționării după axa Z

Schema cinematică a acționării după axa Z (figura 1.14, detaliată în figura 1.16) este similară celorlalte axe, cu deosebirea că se află în plan vertical. Astfel, motorul pas cu pas (reperul 54) acționează, prin intermediul unui cuplaj fix (reperul 53) asupra șurubului conducător (reperul 33), angrenat cu piulița conducătoare (reperul 52) care este solidară cu suportul port-sculă (reperul 38). Acesta din urmă culisează pe două glisiere solidare cu ansamblul mobil al axei X.

### 1.2.2 Determinarea vitezelor

Pentru cazul prezentat în figura 1.11 va fi determinat  $\vec{v}_p$ , adică viteza punctului  $P$  față de corpul  $C_3$  considerat fix. Viteza acestui punct, când corpul  $C_1$  este fix, se determină cu distribuția de viteze în mișcarea generală [54], [45]:

$$\vec{v}_r = \vec{v}_{01} + \vec{\omega}_{01} \times \vec{OP} \quad (1.70)$$

Viteza punctului  $P$  față de corpul  $C_2$  presupus fix, dacă se ia în considerație și deplasarea corpului  $C_1$  definită de vectorii  $\vec{v}_{12}$  și  $\vec{\omega}_{12}$ , este determinată prin observația că, în acest caz, mișcarea corpului  $C_0$  față de rigidul  $C_1$  considerat fix este o mișcare relativă. Astfel, viteza punctului  $P$ , considerând imobil corpul  $C_1$ , este o viteză relativă.

Corpul  $C_0$  se deplasează nu numai față de corpul  $C_1$ , dar și o dată cu el. Viteza punctului  $P$ , în situația în care el se manifestă ca și cum ar face parte din rigidul  $C_1$ , reprezintă viteza de transport:

$$\vec{v}_t = \vec{v}_{12} + \vec{\omega}_{12} \times \vec{O_1P_1} = \vec{v}_{12} + \vec{\omega}_{12} \times \vec{O_1P} \quad (1.71)$$

Viteza absolută, calculată față de rigidul  $C_2$ , considerat fix, va fi [45]:

$$\vec{v}_a = \vec{v}_r + \vec{v}_t = \vec{v}_{01} + \vec{\omega}_{01} \times \vec{OP} + \vec{v}_{12} + \vec{\omega}_{12} \times \vec{O_1P} \quad (1.72)$$

Corpul  $C_2$  este și el în mișcare. Viteza  $(\vec{v}_P)_{C_2}$  joacă în acest moment rolul unei viteze relative. Viteza punctului  $P$  față de un sistem legat de  $C_3$ , presupus fix, se determină prin adunarea la  $(\vec{v}_P)_{C_2}$ , care a devenit o viteză relativă, viteza punctului  $P$ . Se consideră că acest punct este rigidizat cu corpul  $C_2$  aflat în mișcare. În aceste condiții, expresia vitezei punctului  $P$  față de rigidul  $C_3$ , considerat fix, este [54]:

$$\vec{v}_P = \vec{v}_a + \vec{v}_{r2} = (\vec{v}_{01} + \vec{v}_{12} + \vec{\omega}_{01} \times \vec{OP} + \vec{\omega}_{12} \times \vec{O_1P}) + \vec{v}_{23} + \vec{\omega}_{23} \times \vec{O_2P} \quad (1.73)$$

De unde rezultă:



$$\vec{v}_P = \vec{v}_{01} + \vec{v}_{12} + \vec{v}_{23} + \vec{\omega}_{01} \times \vec{O}\vec{P} + \vec{\omega}_{12} \times \vec{O}_1\vec{P} + \vec{\omega}_{23} \times \vec{O}_2\vec{P} \quad (1.74)$$

sau [45]:

$$\vec{v}_P = \sum_{i=0}^{n-1} \vec{v}_{i,i+1} + \sum_{i=0}^{n-1} \vec{\omega}_{i,i+1} \times \vec{O}_i\vec{P} \quad (1.75)$$

Această relație stabilește distribuția de viteze a punctelor corpului  $C_0$  față de un corp fix. Pentru a putea stabili dacă un corp este în translație, rotație etc., sunt necesare două funcții  $\vec{v}$  și  $\vec{\omega}$ . Viteza  $\vec{v}$  este viteza unui punct oarecare al corpului  $C_0$ , adică viteza unui punct  $P$ , care poate fi determinată cu ajutorul formulei obținută mai înainte, iar  $\vec{\omega}$  este viteza de rotație a corpului  $C_0$  în jurul lui  $P$ , raportă la corpul fix  $C_3$ . Pentru a putea determina această viteză unghiulară, notată cu  $\vec{\omega}_{03}$ , se exprimă vitezele a două puncte ale rigidului  $C_0$  [45]:

$$\vec{v}_A = \sum \vec{v}_{i,i+1} + \sum \vec{\omega}_{i,i+1} \times \vec{O}_i\vec{A} \quad (1.76)$$

$$\vec{v}_B = \sum \vec{v}_{i,i+1} + \sum \vec{\omega}_{i,i+1} \times \vec{O}_i\vec{B} \quad (1.77)$$

Între aceste două viteze există relația:

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\omega} \times \vec{B}\vec{A} \quad (1.78)$$

unde  $\vec{\omega}$  reprezintă viteza unghiulară de rotație a corpului  $C_0$  față de un corp fix  $C_3$ . Din relațiile (1.76), (1.77) și (1.78) se obține [8]:

$$\sum \vec{v}_{i,i+1} + \sum \vec{\omega}_{i,i+1} \times \vec{O}_i\vec{B} = \sum \vec{v}_{i,i+1} + \sum \vec{\omega}_{i,i+1} \times \vec{O}_i\vec{A} + \vec{\omega}_{03} \times \vec{B}\vec{A} \quad (1.79)$$

sau:

$$\sum \vec{\omega}_{i,i+1} \times (\vec{O}_i B - \vec{O}_i A) = \vec{\omega}_{03} \times \vec{BA} \quad (1.80)$$

dar:

$$\vec{O}_i B - \vec{O}_i A = \vec{BA} \quad (1.81)$$

Generalizând, rezultă:

$$\sum \vec{\omega}_{i,i+1} = \vec{\omega}_{0n} \quad (1.82)$$

Dacă sunt cunoscuți cei doi vectori,  $\vec{v}$  și  $\vec{\omega}_{0n}$ , se poate stabili mișcarea corpului  $C_0$  față de corpul  $C_3$  în aceeași manieră în care, în statică, cunoscând torsorul de reducere al forțelor într-un punct  $\vec{R}$  și  $\vec{M}_0$  se poate stabili la ce se reduce sistemul de forțe.

Din modul de construcție al mașinii, folosind lanțuri cinematice orientate paralel cu axele reperului ortonormal, este evidentă compunerea vitezelor în coordonate carteziene, conform subparagrafului 1.1.1. Proiectarea detaliată a lanțurilor cinematice, cu studiul vitezelor și accelerațiilor lineare și unghiulare care intervin, este prezentată detaliat în subparagraful 1.3.4.

### 1.2.3 Studiul accelerațiilor

Pentru determinarea câmpului accelerațiilor unui rigid față de un reper considerat fix atunci când sunt cunoscute mișcările relative ale sistemelor de referință mobile și mișcarea corpului față de unul dintre aceste repere, se procedează în aceeași manieră folosită la determinarea vitezelor. Mișcarea punctului  $P$  față de corpul  $C_1$  este o mișcare relativă, iar mișcarea punctului o dată cu  $C_1$ , ca și cum ar face parte din acest corp, este mișcare de transport. Astfel [54]:

$$\vec{a}_a = \vec{a}_r + \vec{a}_t + \vec{a}_{Coriolis} \quad (1.83)$$

Deoarece vectorii  $\vec{v}_{01}$ ,  $\vec{a}_{01}$ ,  $\vec{\omega}_{01}$  și  $\vec{\epsilon}_{01}$  caracterizează mișcarea rigidului  $C_0$  față de  $C_1$ , considerat fix, atunci:

$$\begin{aligned} \vec{a}_r &= \vec{a}_{01} + \vec{\epsilon}_{01} \times \vec{OP} + \vec{\omega}_{01} \times (\vec{\omega}_{01} \times \vec{OP}) \\ \vec{a}_t &= \vec{a}_{12} + \vec{\epsilon}_{12} \times \vec{O_1P} + \vec{\omega}_{12} \times (\vec{\omega}_{12} \times \vec{O_1P}) \end{aligned} \quad (1.84)$$

$$\vec{a}_{Coriolis} = 2 \vec{\omega}_{12} \times \vec{v}_r = 2 \vec{\omega}_{12} \times [\vec{v}_{01} + (\vec{\omega}_{01} \times \vec{OP})]$$

Astfel:

$$\begin{aligned} \vec{a}_a &= \vec{a}_{01} + \vec{a}_{12} + \vec{\epsilon}_{01} \times \vec{OP} + \vec{\epsilon}_{12} \times \vec{O_1P} + \vec{\omega}_{01} \times (\vec{\omega}_{01} \times \vec{OP}) + \\ &+ \vec{\omega}_{12} \times (\vec{\omega}_{12} \times \vec{O_1P}) + 2 \vec{\omega}_{12} \times [\vec{v}_{01} + (\vec{\omega}_{01} \times \vec{OP})] \end{aligned} \quad (1.85)$$

sau:

$$\begin{aligned} \vec{a}_P &= \sum_{i=0}^{n-1} [\vec{a}_{i,i+1} + \vec{\epsilon}_{i,i+1} \times \vec{O_iP} + \vec{\omega}_{i,i+1} \times (\vec{\omega}_{i,i+1} \times \vec{O_iP})] + \\ &+ 2 \sum_{j=i+1}^{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} [\vec{\omega}_{j,j+1} \times (\vec{v}_{i,i+1} + \vec{\omega}_{i,i+1} \times \vec{O_iP})] \end{aligned} \quad (1.86)$$

Acest studiu este necesar datorită faptului că în lanțurile cinematice ale acționărilor pe cele trei axe apar momente (active și rezistive) care provoacă mișcări de rotație ale rotorului motorului pas cu pas și, implicit, ale șurubului conducător.

Prin intermediul angrenajului dintre acesta și piulița conducătoare, momentele sunt transformate în forțe, iar mișcarea de rotație este transformată în mișcare de translație. Dacă din punct de vedere al execuției interesează mișcarea de translație, din punct de vedere al acționării interesează mișcarea de rotație, în special sub aspectul încadrării în specificații a vitezelor (studiate în subparagraful precedent) și al accelerațiilor (studiate în paragraful curent).

#### 1.2.4 Distribuția de viteze în cazul mișcării relative particulare a rigidului. Compueri de mișcări instantanee. Compueri de translații

Se consideră că, în mișcările relative, rigidele execută translații. În acest caz, se stabilește distribuția de viteze pentru un rigid față de triedrul legat de un corp considerat fix, atunci când mișcările relative ale rigidelor sunt translații. În urma aplicării formulei generale se observă că  $\vec{\omega}_{i,i+1} = 0$ , adică nici un corp în mișcare relativă nu efectuează o mișcare de rotație. Relația pentru viteze devine:

$$\vec{v}_P = \sum_{i=0}^n \vec{v}_{i,i+1} \quad (1.87)$$

Prin compunerea unui număr oarecare de translații, se obține în final tot o mișcare de translație. În cazul în care rigidele au mișcări relative de translație, prin compunerea lor se obține o mișcare cu distribuția de viteze caracteristică tot mișcării de translație. Vectorul viteză care caracterizează mișcarea rezultantă este suma vectorială a vectorilor viteză  $\vec{v}_i$  ai mișcărilor componente.

Aceste considerații teoretice au fost necesare pentru înțelegerea mișcării suportului port-sculă, în raport cu celelalte elemente mobile ale echipamentului *Comp-U-Craft*. Practic, suportul port-sculă este acționat doar de motorul corespunzător deplasării pe verticală (axa Z), întreg sistemul putând fi deplasat pe orizontală prin acționarea cu ajutorul motorului corespunzător axei X. Deplasarea pe axa Z se face prin acționarea cu ajutorul celui de al treilea motor pas cu pas asupra mesei de lucru, de care este solidarizată piesa de prelucrat (figura 1.12).

## 1.3 Proiectarea echipamentului *Comp-U-Craft*

### 1.3.1 Principii conceptuale de bază

Echipamentul *Comp-U-Craft* a fost conceput pentru prelucrarea pieselor mici și mijlocii, adresându-se unui segment de piață mai puțin explorat, deoarece vizează producția de unicat sau producția în serie mică. Concepția care a stat la baza construcției utilajului a vizat posibilitatea realizării unor piese de gabarit cât mai mare, cu un echipament cât mai mic, în scopul scăderii prețului utilajului și a tehnologiei. Aceste idei directoare s-au realizat fără a face concesii în dauna preciziei de execuție a pieselor prelucrate cu o viteză tehnologică rezonabilă față de puterea instalată pe utilaj.

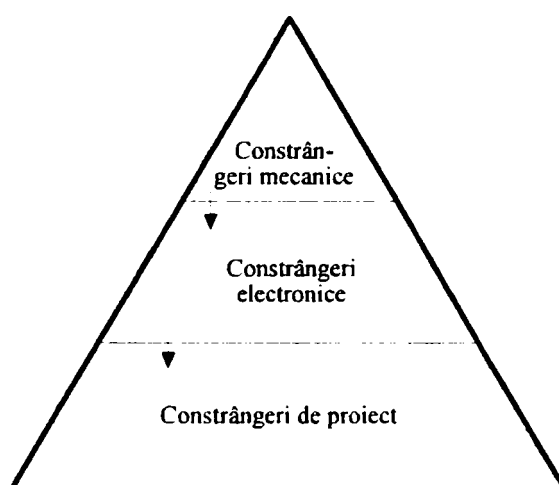


Fig. 1.15 Principii conceptuale de bază

Echipamentul *Comp-U-Craft* a fost gândit, din punct de vedere conceptual, ca o ierarhie de constrângeri (prezentate în figura 1.15) care se propagă în aval, fiind

gestionate la nivelul software. Această reprezentare ierarhică permite un management clar și obiectiv al acestor constrângeri, precum și posibilitatea reprezentării lor formale, în scopul eliminării erorilor care pot apărea. Având în vedere destinația echipamentului, de realizare a implantelor chirurgicale maxilo-faciale, se poate deduce că regimul majoritar de lucru este frezarea în diferite materiale, precum titan, oțel inoxidabil de uz chirurgical, ceramică biocompatibilă, diverși biopolimeri etc. Această operație este foarte zgomotoasă din punct de vedere acustic, mecanic și electric, ceea ce a determinat alegerea unei soluții de comandă în buclă deschisă, deoarece traductoarele de poziție existente pe piață sunt foarte sensibile la aceste tipuri de zgomote. În plus, traductoarele capabile să lucreze la precizii ridicate, comparabile cu cele pentru care a fost construită mașina, sunt agabaritice, intrând în conflict cu conceptul de proiectare al echipamentului *Comp-U-Craft*, care vizează un gabarit cât mai mic în comparație cu dimensiunile piesei prelucrate.

Alegerea soluției de comandă în buclă deschisă a beneficiat și de aportul altor argumente. Simplitatea constructivă conduce direct la scăderea costurilor, un alt obiectiv important urmărit în proiectare, pentru atingerea scopului propus inițial. De asemenea, comanda elementelor de acționare și managementul acestora se simplifică sensibil, cu efect benefic asupra efortului de proiectare și, implicit, asupra costurilor implicate.

Un dezavantaj major vine să contracareze efectul avantajelor enumerate, anume imposibilitatea de a se cunoaște exact dacă execuția a respectat fidel comanda. În astfel de cazuri, soluția banală este adoptarea unei marje acoperitoare de siguranță pentru toate regimurile de funcționare prevăzute. Din păcate, o astfel de soluție înrăutățește drastic performanța. De exemplu, dacă se prevede executarea ocazională a unor implantate de titan, în timp ce activitatea uzuală este executarea unor forme din ceară pentru realizarea implantelor din biopolimeri, introducerea constrângerilor pentru titan ar penaliza de sute de ori viteza de execuție a formelor din ceară.

Considerentele de mai sus justifică implementarea unui model ierarhizat al constrângerilor, în scopul reducerii la minimum a marjei de siguranță adoptate la execuția diferitelor proiecte pe diferite variante ale echipamentului *Comp-U-Craft*.

Ca efect secundar, dar nu mai puțin important, acest concept a condus la posibilitatea realizării unei variante unice a software-ului de comandă, capabilă a governa variantele existente și cele viitoare ale echipamentului *Comp-U-Craft*. Datorită răspândirii geografice mari a echipamentului prezentat, acest lucru simplifică foarte mult procedura de îmbunătățire a software-ului (*upgrade*) prin teletransmisie și teleadministrare, nemaifiind necesară gestionarea versiunilor mașinii și nici deplasarea unui specialist la fața locului, care să facă ajustările necesare.

Gabaritul redus al combinei s-a obținut datorită elementelor de noutate și de inovare care au stat la baza concepției tehnologice și constructive. Dintre acestea se precizează:

- transformarea mesei de lucru dintr-o suprafață imobilă într-una mobilă, ea reprezentând tocmai axa  $Oy$  a triedrului  $xOyz$ ;
- utilizarea aproape în întregime a lungimii șuruburilor conducătoare pentru axele  $Ox$  și  $Oz$ , lungime apropiată de gabaritul echipamentului pe aceste axe (un exemplu fiind dat în figura 1.16);
- folosirea în mare măsură a profilelor de aluminiu, ceea ce a favorizat disiparea căldurii produse de electronica de putere, instalată pe mașină și, în același timp, scăderea greutății totale (a se vedea justificarea care urmează);
- piesele speciale, respectiv piulițele conducătoare și bușele de ghidare din fabricație curentă, conferă o precizie mare în raport cu prețul de achiziție, evitând prelucrări pretențioase și tratamente termice (a se vedea figura 1.16);
- folosirea motoarelor pas cu pas, comandate de un program elaborat în spiritul obținerii unor regimuri de lucru cât mai eficiente, ținând seama de posibilitățile reale ale echipamentului (a se vedea detalierea care urmează).

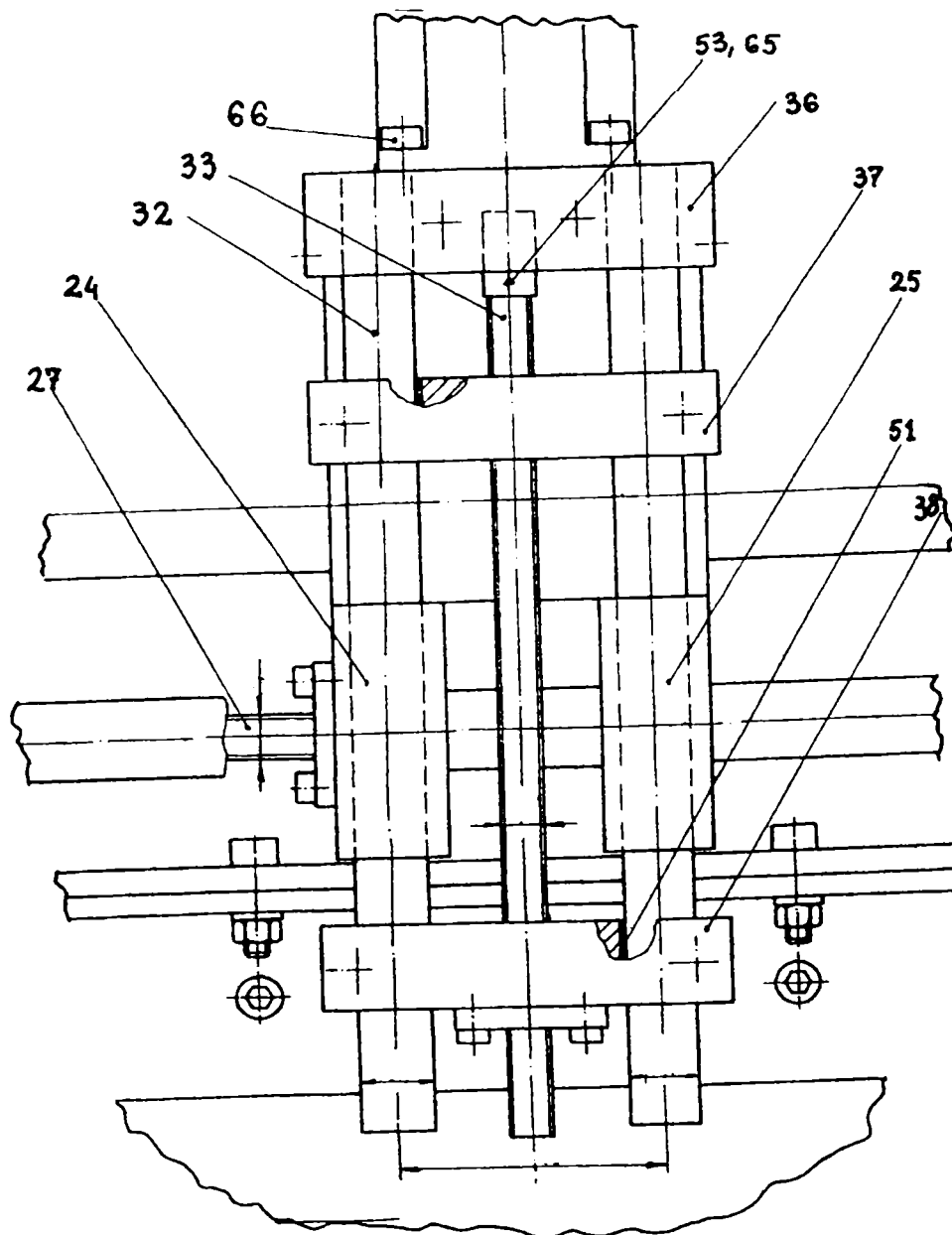


Fig. 1.16 Detaliu de acționare după axa Z

Detaliind enumerările de mai sus, trebuie început cu studiul materialelor folosite la construcția echipamentului. În această fază, în care suportul teoretic a fost parcurs și lanțurile cinematice ale acționărilor au fost elaborate, forma brută a mașinii se conturează deja. Dintre materialele uzuale folosite la construcția mașinilor-unelte, oțelul și alumiul (cu aliajele sale) se disting prin disponibilitate,



prelucrabilitate și preț. Având în vedere că mașina trebuie să susțină nu doar ansambluri cinematice, ci și electronica de putere (împreună cu sursele aferente de energie electrică) pentru acționarea motoarelor pas cu pas, a fost necesară trecerea în revistă a parametrilor termici și de dilatare, pe lângă cei specifici proiectării mecanice. O sinteză comparativă a caracteristicilor de material se află în Tabelul 1.1.

Tabelul 1.1 Caracteristici de material

Material	Oțel	Aluminiu	Aliaje de aluminiu
Densitate [kg/m <sup>3</sup> ]	$(7,8\div 7,9) \cdot 10^3$	$2,7 \cdot 10^3$	$2,6\div 2,9 \cdot 10^3$
Modulul longitudinal de elasticitate E [N/m <sup>2</sup> ]	$(10,8\div 21,2) \cdot 10^{10}$	$7,1 \cdot 10^{10}$	$(6\div 8) \cdot 10^{10}$
Rezistența de rupere, la tracțiune, R <sub>m</sub> [N/m <sup>2</sup> ]	$(44\div 75) \cdot 10^7$	$(4\div 16) \cdot 10^7$	$(30\div 70) \cdot 10^7$
Conductivitatea termică, λ [W/mK]	13÷17	231	121÷237
Coeficientul de dilatare termică liniară, α [10 <sup>-6</sup> /K]	16÷17	24	18,5÷24
Temperatura de topire, T [°C]	1300÷1520	660	

Se observă că aluminiul și aliajele sale oferă caracteristici mecanice satisfăcătoare, comparativ cu oțelul, dar la mase de două-trei ori mai mici decât dacă aceleași reperi ar fi confecționate din oțel. Pe de altă parte, comportamentul tribologic al oțelului este net superior, motiv pentru care reperatele statice și de suport au fost confecționate din aluminiu, prezentând și o foarte bună disipație termică a căldurii degajate de partea electronică, iar reperatele aflate în mișcare sau supuse frecțiunilor (glisiere, bușe, șurub conducător, piuliță conducătoare) au fost executate din oțel. Tot pentru a detalia enumerarea anterioară a elementelor inovative, trebuie precizat faptul că la aplicațiile urmărite în teză, de prelucrare a unor profile curbe, de găurire și de gravare a plăcilor din oțel inoxidabil biocompatibil pentru confecționarea implantelor chirurgicale, regimurile optime de lucru, din punct de vedere

al calității suprafețelor prelucrate s-au stabilit în urma încercărilor experimentale, efectuate după parcurgerea literaturii de specialitate.

În Tabelul 1.2 sunt prezentate regimurile de lucru pentru câteva grosimi ale tablei de oțel inoxidabil biocompatibil, corespunzătoare situației în care vârful sculei prelucrătoare descrie un arc de cerc cu raza de 5 mm (corespunzătoare racordurilor implantului tip LN 331 S din catalogul „Aesculap“), iar poziția pe traiectorie este corespunzătoare situației în care unghiul vectorului de poziție cu axa de referință, în coordonate polare, este un multiplu impar de 45°.

Tabelul 1.2 Regimuri de lucru

Grosimea materialului [mm]	Motor X	Motor Y	Motor Z	Viteza de avans în material [mm/min]
0,4	I = 4 A U = 3 V n = 8,35 rpm	I = 4 A U = 3 V n = 8,35 rpm	I = 4 A U = 3 V n = 0 rpm	30
0,8	I = 3 A U = 3 V n = 5,56 rpm	I = 3 A U = 3 V n = 5,56 rpm	I = 3 A U = 3 V n = 5,56 rpm	20
1,2	I = 4 A U = 3 V n = 5,56 rpm	I = 4 A U = 3 V n = 5,56 rpm	I = 4 A U = 3 V n = 5,56 rpm	10

Numărul mare de operații tehnologice care pot fi executate de către *Comp-U-Craft* a condus la elaborarea unui pachet de programe în continuă îmbunătățire și perfecționare, rod al experienței acumulate în timp pe diferite tipuri de prelucrări și cu diferite materiale.

### 1.3.2 Domeniu de utilizare

Echipamentul conceput și realizat (figura 1.17) răspunde numeroaselor exigențe impuse la frezarea pieselor ale căror dimensiuni se încadrează în gabaritul util al mașinii. Operațiunile pe care echipamentul *Comp-U-Craft* le poate executa sunt:

- copiere în relief, utilizată la analiza unor mulaje sau chiar ale unor fragmente extrase de os, în scopul „citirii“ exacte a suprafețelor pe care urmează a se aplica implantul metalic;
- mărirea sau micșorarea la scară a unui model, necesară în situațiile în care un model standardizat de implant trebuie aplicat la pacienți de diferite vârste, aflați în diverse stadii de dezvoltare anatomică;
- execuția unui model „în oglindă“, necesară adaptării modelelor standardizate, dar asimetrice, părților anatomice laterale.

Pe suportul port-sculă se pot fixa fie un ansamblu de scanare cu palpator electromecanic sau optoelectromecanic, fie scule de execuție prin așchiere, șlefuire, gravare, cap laser pentru debitare și gravare, cap cu plasmă pentru debitare, scule pentru electroeroziune. În cazul execuției implantului prezentat în studiul de caz, în suportul port-sculă cu bușă standard de prindere, de  $\varnothing$  43 mm, este montată o freză de 30.000 de rotații pe minut, alimentată la rețeaua de curent alternativ de 220 V și având o putere de 600 W.

### **1.3.3 Descrierea echipamentului și modul de rezolvare a problemelor constructive**

Descrierea detaliată a echipamentului *Comp-U-Craft* nu este posibilă, deoarece *CD Nelson Manufacturing & Supply Co.*, deținătorul drepturilor de autor, nu permite trecerea în domeniul public al desenului de ansamblu și al celor de detalii, considerându-le secrete de fabricație. Cu toate acestea, compania și-a dat acordul prezentării acestora în fața comisiei de evaluare a prezentei teze de doctorat, cu ocazia susținerii publice, spre consultare. Din acest motiv, în prezentul subparagraf și în cele care urmează se fac referiri la poziții și repere conținute în desenul de ansamblu și în desenele de detaliu.

Fără a divulga dimensiunile exacte și modalitățile concrete de îmbinare a diferitelor subansamble, se prezintă schemele cinematice ale acționărilor pe cele

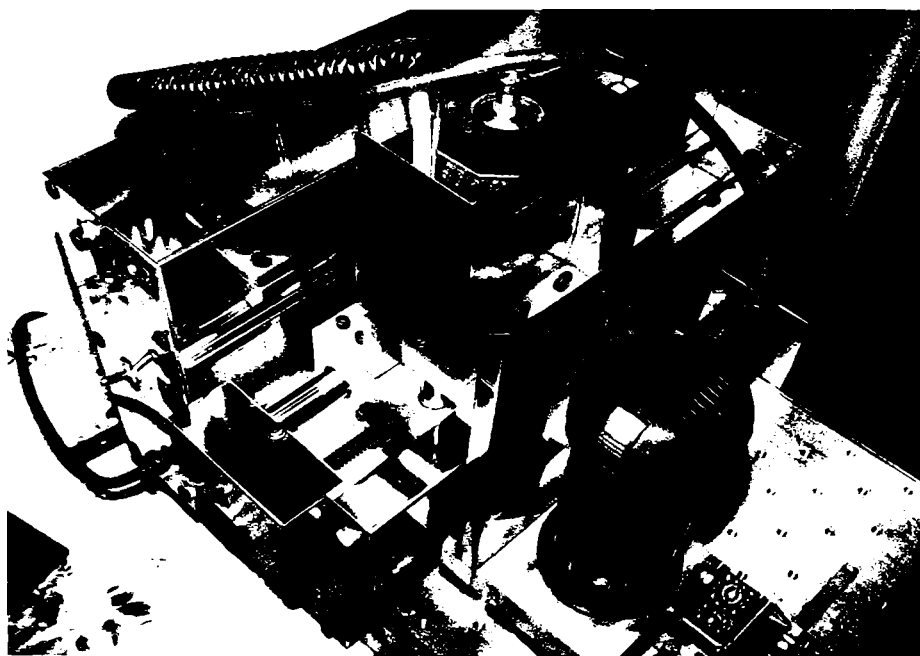
trei axe ale sistemului ortonormal de referință (figurile 1.12, 1.13 și, respectiv, 1.14). În plus, ca detaliu, este prezentat desenul detaliat al acționării pe axa Z (figura 1.16), deoarece acesta prezintă ansamblul port-sculă, iar din punct de vedere cinematic este similar celor de pe axele X și Y, cu deosebirea că în calculul dinamic aici intervine și gravitația. Dimensiunile finale au fost stabilite pe baza solicitărilor mecanice și tribologice la care sunt supuse piesele componente ale subansamblelor atât în regim static, cât și în regim dinamic.



Fig. 1.17 Echipamentul *Comp-U-Craft*, conceput și realizat

Mișcarea spațială a capului port-sculă este obținută prin compunerea simultană a mișcărilor pe trei direcții: X, Y și Z (figurile 1.12, 1.13 și, respectiv, 1.14). Transmiterea mișcării pe o anumită coordonată (X, Y sau Z) este rezolvată cu ajutorul unui motor electric pas cu pas (reperul 54), care, prin intermediul unui cuplaj (reperul 53), acționează un șurub conducător (reperele 20, 27 și 33). Șurubul conducător conține pe el câte o piuliță conducătoare (reperul 52) prinsă cu câte trei șuruburi de suportii de glisieră (reperele 24, 5 și 38) aferenți celor trei direcții de mișcare (X, Y, Z), după cum se observă în imaginea fotografică din figura 1.18.

La capetele de cursă limitarea mișcării se realizează cu senzori electromecanici. Se știe că motoarele pas cu pas dispun de un cuplu foarte mare obținut încă de la turații scăzute, ceea ce face ca problema apropierei de capetele axelor să fie una foarte sensibilă prin prisma pericolelor implicate (ruperea cuplajului, ruperea piuliței conducătoare, torsionarea sau încovoierea șurubului conducător, deformarea suportilor de glisieră etc.) [34]. Din acest motiv trebuie prevăzută o metodă de protecție, soluția banală și de largă răspândire fiind montarea la capetele axelor a unor comutatoare normal închise, înseriate electric cu circuitul de alimentare al motoarelor. Din păcate, motoarele pas cu pas sunt polifazate, iar întreruperea alimentării cu ajutorul unui singur comutator se poate face doar în cazuri particulare.



**Fig. 1.18** *Elementele constructive ale echipamentului Comp-U-Craft*

Un alt dezavantaj este dat de faptul că logica de comandă a acestora, în cazul soluției în buclă deschisă adoptată la construcția echipamentului, nu ar lua la

cunoștință de atingerea limitelor continuând să comande motoare nealimentate. Din acest motiv, s-a preferat „informarea” logicii de comandă cu privire la aceste evenimente, prin intermediul comutatoarelor de limită de cursă, pentru a elimina dezavantajele menționate. În schimb, se profilează un alt dezavantaj, cel al creșterii lanțului de reacție, ceea ce duce la creșterea proporțională a probabilității unei malfuncționări. S-a decis, totuși, că în condițiile unei proiectări judicioase atât hardware, cât și software, coroborată cu o testare în diferite condiții de funcționare pe parcursul a patru ani, acest din urmă dezavantaj cântărește mult mai puțin în balanță cu dezavantajul întreruperii funcționării motoarelor, în cazul atingerii limitei de cursă, pe partea de execuție și nu pe partea de comandă.

### **Mișcarea de-a lungul axei Y (figura 1.13)**

Mișcarea pe axa Y este organizată solidar cu placa de prindere, fixată pe placa față mobilă Y și pe placa spate mobilă Y (reperul 5). Coloanele de ghidare sunt solidare cu plăcile față și spate. Ele glisează în placa față și în placa spate prin intermediul bușelor de ghidare presate în cele două plăci față și spate. Plăcile față și spate sunt solidare cu placa de bază cu ajutorul șuruburilor. Acționarea este asigurată de motorul pas cu pas (reperul 54) prin intermediul cuplajului (reperul 53) axului filetat Y (reperul 20) și piuliței conducătoare (reperul 52). Pentru o strângere mai bună a coloanelor și a bușelor de ghidare în plăcile față și spate, atât mobile cât și fixe, s-au prevăzut șlițuri elastice [34].

### **Mișcarea de-a lungul axei X (figura 1.12)**

Coloanele de ghidare sunt solidare cu suportii de glisieră fixați pe placa orizontală, care este susținută pe verticală de suportii stânga și dreapta. Suportii menționați sunt prinși de placa de bază prin intermediul cornierelor stânga și dreapta cu ajutorul șuruburilor și a piulițelor [34].

Suportii de glisieră Z stânga și dreapta (reperele 24 și 25, figura 1.16) alunecă pe cele două coloane X cu ajutorul bușelor de ghidare, fiind acționați de șurubul din

reperul 27 și de piulița conducătoare (reperul 52). Acționarea șurubului X se face prin intermediul unui cuplaj (reperul 53) și a motorului pas cu pas (reperul 54).

### **Mișcarea de-a lungul axei Z (figurile 1.14 și 1.16)**

Suportii de glisieră din stânga și din dreapta (reperele 24 și 25) susțin glisierele Z (reperul 32), împreună cu suportul motor Z (reperul 36). Suportul superior și cel inferior Z (reperele 37 și 38), având înglobate bușele de ghidare (reperul 51), glisează împreună cu placa frontală și suportul port scule. Suportii de glisieră au practicate șlițuri elastice pentru facilitarea fixării coloanelor de ghidare și a bușelor. Strângerea coloanelor și a bușelor se face cu șuruburi. Suportul motorului Z (reperul 36) este susținut de suportul Z fixat pe suportii de glisieră stânga și dreapta, prin intermediul cornierului Z, cu ajutorul șuruburilor. Acționarea șurubului conducător Z (reperul 33) se face prin intermediul cuplajului (reperul 53) și a motorului pas cu pas (reperul 54). Motorul pas cu pas este fixat în suportul motor Z (reperul 36) cu patru șuruburi (reperul 66). Deplasările pe axele X și Z se reflectă în imaginea fotografică din figura 1.19.

În spatele plăcii orizontale și al peretelui se află incinta destinată instalației electrice și de automatizare care este închisă cu ajutorul unor capace la partea superioară și în spate, precum și pe părțile laterale. Apărătorile laterale conțin găuri de ventilație pentru a răci instalația electronică, inclusiv cu un ventilator care menține o temperatură adecvată în incinta instalației. La menținerea temperaturii sub o anumită limită admisibilă participă întreaga masă a utilajului care, fiind construit în general din aluminiu, asigură o disipare mai bună a căldurii în mediul ambiant.

Fixarea sculelor pe suportul de scule se realizează cu șuruburi în găuri prevăzute cu șlițuri pentru elasticitate (figura 1.20). Fixarea pieselor în vederea prelucrării sau a copierii pe masa de lucru este făcută cu ajutorul unor rigle sau a unor bride în funcție de configurația și de mărimea piesei, folosind găurile filetate practicate în masa utilajului (figurile 1.13 și 1.14).

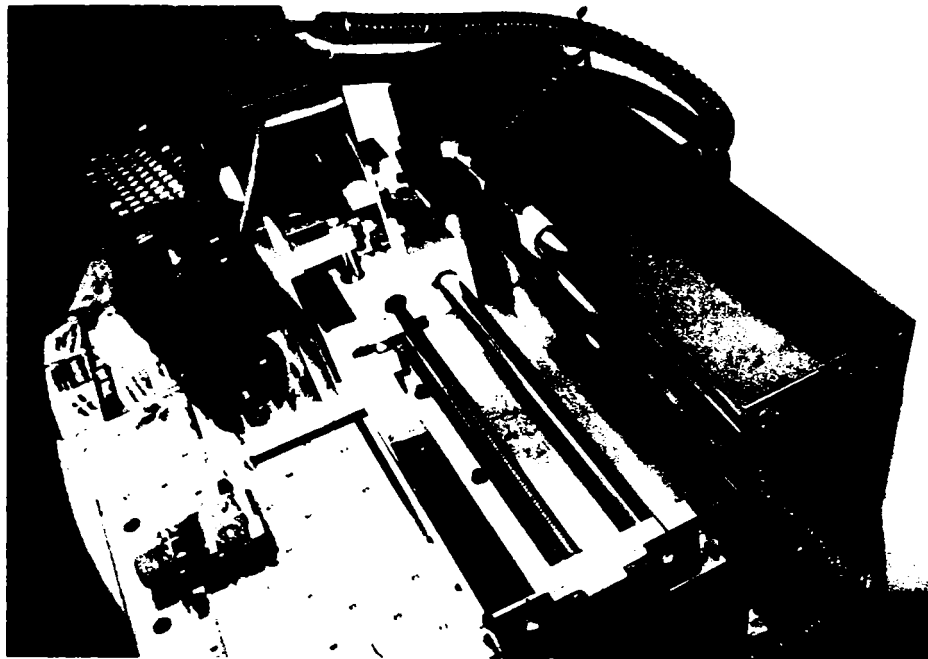


Fig. 1.19 Deplasările pe axele X și Z

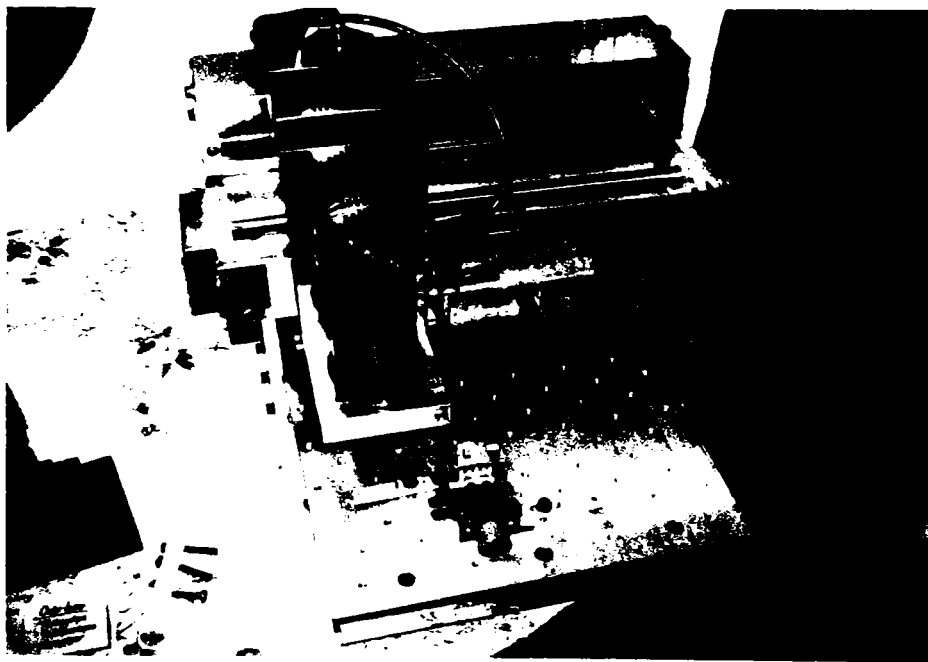


Fig. 1.20 Prinderea sculei în port-sculă



### 1.3.3.1 Toleranțe de execuție impuse la realizarea utilajului

Toleranțele de execuție pot fi grupate în toleranțe de poziție și în toleranțe de formă. Pentru a face posibilă funcționarea utilajului în condiții optime, trebuie respectate următoarele valori de toleranțe care exprimă poziția relativă a elementelor componente fixe și mobile.

- paralelismul coloanelor de ghidare  $\parallel 0,020$  impune condiția ca pe toată lungimea coloanelor diferența distanțelor între centrele lor să nu depășească  $20\mu\text{m}$ ;
- perpendicularitatea coloanelor axei X față de coloanele axei Z  $\perp 0,020 C$
- perpendicularitatea coloanelor Z față de coloanele Y  $\perp 0,016 AB$ .

Toleranțele de poziție de mai sus sunt rezultatul finit al unor lanțuri de cote și de toleranțe de poziție și de formă executate în cadrul reperelor mașinii. Trecând în revistă reperele componente cu toleranțe de poziție, putem aminti (unele repere se referă la reprezentări din desenul de ansamblu, care nu va fi făcut public, ci doar prezentat comisiei, cu ocazia susținerii publice a tezei de doctorat):

Reperul 2	Placă față fixă Y	$\parallel 0,040$ între găurile de la coloane
Reperul 3	Placă spate fixă Y	idem reperul 2; gaura de fixare a motorului pas cu pas trebuie să fie perpendiculară pe fețele reperului $\perp 0,025 C$ pentru ca motorul „să tragă“ paralel cu axa coloanelor
Reperul 4, reperul 5	Placă față mobilă Y Placă spate mobilă Y	$\parallel 0,040$ între axele găurilor de la coloane

Reperul 22, reperul 23	Suport motor X Suport X	$\parallel   0,025$ între axele de la coloane $\perp   0,025   C$ perpendicularitate între axa motorului pas cu pas și fețele reperului pentru a asigura paralelismul axei motorului cu axele coloanelor de ghidare, evitându-se blocări sau solicitări nepermise la axul motorului pas cu pas
Reperul 24, reperul 25	Suport glisieră Z stânga Suport glisieră Z dreapta	$\parallel   0,025$ între axele coloanelor X $\perp   0,025   AB$ între axa Z și axa X
Reperul 56	Suport motor Z	$\parallel   0,025$ între axele coloanelor Z $\perp   0,025   B$ între axa motorului Z și fața de așezare a flanșei motorului
Reperul 37, reperul 38	Suport superior glisieră Z Suport inferior glisieră Z	$\parallel   0,025$ între axele coloanelor Z
Reperul 41	Placă frontală Z	$\parallel   0,025$ între fețele de așezare ale plăcii, în scopul asigurării poziției corespunzătoare a suportului de scule $\square   0,025$ planeitate pe fața de prindere a plăcii (în același scop declarat mai sus)

Reperul 43 Suport pentru scule  $\parallel 0,016$  între fața de așezare a suportului și axa frezei, în scopul asigurării perpendicularității acesteia pe masa de lucru

Deoarece șurubul conducător, piulița conducătoare și glisierile trebuie să aibă o geometrie foarte exactă și un grad ridicat de finisare al suprafețelor, în scopul obținerii unor frecări reduse și constante pe toată durata deplasării și indiferent de lungimea ei, nu s-a putut asigura aprovizionarea din producția internă, recurgându-se la furnizori din Statele Unite ale Americii. Acest lucru a impus folosirea cotelor în unități imperiale de măsură și nu în cele din sistemul metric.

Toleranțele de formă contribuie la asigurarea toleranțelor de poziție și la funcționarea utilajului acolo unde sunt îmbinări fixe ori mobile. Toleranțele cotelor libere la desenele de execuție sunt conform ISO 2768–mK. Acolo unde sunt nominalizate toleranțe (câmpuri de toleranță) pe reperele de execuție, se exprimă de fapt conceptul tehnologic și funcțional al utilajului, condiția în care la montaj aceste reperi să satisfacă acele condiții general impuse. În acest sens, dăm câteva exemple semnificative:

- Reperul 2, placă față fixă Y și reperul 3, placă spate fixă Y: găurile sunt executate în ajustaj prezent  $H7/j6$  în scopul fixării bușelor de glisare în reperele mai sus amintite;
- Reperul 4, placă față mobilă și reperul 5, placă spate mobilă: găurile pentru fixarea coloanelor sunt realizate în ajustaj alunecător  $H7/h6$  pentru ușurarea montajului, însă prinderea efectivă se realizează cu ajutorul șlițurilor de elasticitate și al șuruburilor de fixare;
- Reperul 6, coloană de ghidare 3/4 țoli Y: diametrul este realizat în  $h6$  în scopul asigurării glisării bușelor în condiții corespunzătoare;
- Reperul 20, ax filetat Y și reperul 21, bușe: ajustajul între cele două reperi permite un montaj ușor între motorul pas cu pas și axul filetat;

- Reperul 22, suport motor X și reperul 23, suport X: găurile pentru prinderea coloanelor sunt realizate în ajustaj  $H7/h6$ , în scopul facilitării montajului. Strângerea coloanelor se face cu ajutorul șlițurilor de elasticitate. Gaura este executată în scopul fixării motorului pas cu pas;
- Reperul 24, suport glisieră Z stânga și reperul 25, suport glisieră Z dreapta: găurile sunt executate în ajustajul prezent  $H7/j6$  în scopul fixării bușelor de ghidare. Găurile sunt executate pentru a realiza ajustajul  $H7/h6$  în vederea montajului glisierelor Z (reperul 32);
- Reperul 33, șurub Z: diametrul este corespunzător alezajului H7, aflat în reperul 21, bușă;
- Reperul 36, suport motor Z: găurile sunt executate pentru prinderea glisierelor Z din reperul 32, iar alezajul este corespunzător motorului pas cu pas pentru axa Z;
- Reperul 43, suport scule: găurile pentru fixarea sculei de gravat și de copiat și pentru fixarea motorului de la freză.

### *1.3.3.2 Rugozități*

Starea suprafețelor reperelor (rugozitatea) are o deosebită importanță în realizarea preciziei de execuție a pieselor, implicit asupra toleranțelor specificate în documentația de execuție. Există o corespondență biunivocă între rugozitate și precizia de realizare a unei cote.

În general, utilajul este construit din aliaj de aluminiu, cu unele excepții. Aluminiul se poate așchia prin strunjire, frezare, găurire, alezare, filetare, dar nu se poate rectifica. Din acest motiv, rugozitățile cele mai fine se opresc la 1,6, iar cele uzuale la 5,2. Rugozitățile cele mai fine (0,8) se întâlnesc la glisiere, care sunt realizate din oțel și sunt rectificate în scopul asigurării unei funcționări line și precise.

### *1.3.3.3 Materiale și tratamente termice*

Materialele folosite pentru realizarea utilajului sunt, în general, profile laminate din aluminiu. La reperetele din aluminiu nu se aplică tratamente termice în cazul de față. Reperetele realizate din oțel sunt următoarele:

- Reperetele 6, 26, 32, coloane de ghidare, sunt uzinate din OLC 15, fiind supuse unui tratament termic de cementare pe o adâncime de  $0,6 \div 1$  mm și unui tratament termic de călire-revenire pentru o duritate de 50 HRC;
- Reperetele 20, 27, 33, axe filetate, sunt realizate din OLC 45 cu tratament termic de îmbunătățire pentru duritatea de 42–45 HRC;
- Reperul 21, bucușă, este realizată din OL 60;
- Reperul 9, placă de prindere, este confecționată din OLC 45, îmbunătățit;
- Reperetele 30, 31, 40, 42, 44, 45 și 46, apărători, sunt realizate din tablă de oțel inoxidabil groasă de 0,8 mm.

### *1.3.3.4 Repere realizate în cadrul unei fabricații specializate*

Bucușele de ghidare care sunt presate și cele care culisează pe coloanele de ghidare fac obiectul unei fabricații specializate. Pe o carcasă exterioară de oțel se aplică în interior un strat de teflon pentru îmbunătățirea coeficientului de frecare și pentru asigurarea preciziei dorite.

Piulițele în care acționează șuruburile filetate X, Y, Z sunt de o construcție specială, în așa fel încât să fie capabile să compenseze eventualele jocuri axiale ivite în ansamblul șurub-piuliță. Și această construcție folosește teflonul ca material de uzură.

### 1.3.4 Acționarea echipamentului *Comp-U-Craft*

#### 1.3.4.1 Generalități

Mișcarea de copiere, de așchiere, de gravare sau de debitare este rezultatul compunerii celor trei mișcări de pe axele X, Y și Z. Programele implementate în automatul programabil acționează asupra circuitelor de comandă a motoarelor pas cu pas. Acestea, în funcție de numărul de rotații executate și de turația realizată în timp, definesc parametrii regimului de scanare, așchiere, gravare etc.

Familia de motoare pas cu pas folosită pentru realizarea mașinii are următoarele elemente componente, evidențiate în figura 1.21 [69]:

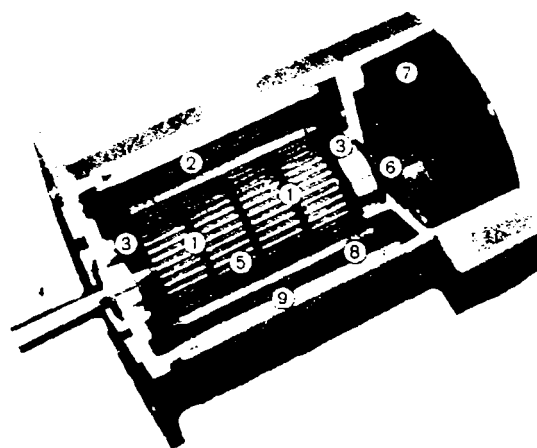


Fig. 1.21 Motor pas cu pas

- magneți permanenți, care au rolul de a interacționa cu câmpul magnetic care se creează la trecerea curentului printr-o pereche de bobine ale statorului (reperul 1);
- bobine fără bucle, prin alimentarea cărora se creează un câmp magnetic la care se va alinia magnetul permanent al rotorului (reperul 2);

- doi rulmenți, folosiți la susținerea axului rotorului, cu rolul de a reduce fricțiunile și uzura la rotirea acestuia (reperul 3);
- arbore de precizie, care asigură atât poziționarea exactă a rotorului în stator (la astfel de motoare randamentul este invers proporțional cu întrefierul dintre rotor și stator, iar un întrefier mai mic se bazează, înainte de toate, pe o prelucrare superioară și precisă a arborelui rotor), cât și transmiterea cuplului util către exterior (reperul 4);
- rotor laminat, cu 50 de dinți, fiecare dintre dinți reprezentând câte un pol al magnetului permanent, peste care sunt așezați (reperul 5);
- resort dublu, cu rolul de a asigura poziționarea axială a rotorului și de a compensa uzurile, precum și de a prelua solicitările axiale asupra acestuia (reperul 6);
- cutia terminalelor, demontabilă, are rol de a permite accesul la terminalele motorului în scopul racordării conducturilor de alimentare, precum și de a le proteja în timpul funcționării normale (reperul 7);
- bobinajul statorului, cu rolul esențial de a crea câmpul magnetic învârtitor al statorului (reperul 8);
- stator laminat cu 40 de dinți, care, fiind miez pentru bobinajul menționat la reperul 8, crește semnificativ eficiența transformării câmpului electric în câmp magnetic (reperul 9). Diferența dintre numărul de dinți ai statorului și cei ai rotorului este explicată în Anexa 5.

Avantajele acestei familii de motoare sunt:

- fiind motoare fără perii, nu necesită intervenții pentru mentenanță;
- motoarele pot fi folosite la viteze de până la 6000 rpm;
- laminarea cu 48–50 de dinți permite rotații regulate, cu rezonanță și instabilitate scăzute, ideale pentru motoarele pas cu pas;

Tabelul 1.3 Valori nominale ale motoarelor pas cu pas

Models Modell Modeles		Connections Anschlüsse Raccordements	n	Voltage Spannung Tension	Current Strom Courant	Resistance Widerstand Résistance	Inductance Induktivität Inductance	Holding Torque Haltemoment Couple de maintien	
								unipolar	bipolar
Nominal values / Nominalwerte / Valeurs nominales									
3 %/1.8°	5 %/1.8°			Vdc	A/phase	Ω	mH	Nm	Nm
	M091-FD03	leads	6	5.3	1.6	3.3	16.5	1.06	1.27
M091-FC06	M091-FD06	leads	6	2.6	3.1	0.85	4.12	1.06	1.27
M091-FC09	M091-FD09	leads	6	1.7	4.7	0.36	1.5	1.06	1.27
M091-FF206		leads*	4	3.0	3.0	1.0	10.4		1.27
	M091-FF-401	terminals	4	6.8	1	6.8	52		1.27
	M091-FD8106	leads	8	2.6	3.1	0.85	4.12	1.06	1.27
	M091-FD8009	terminals	8	1.7	4.7	0.36	1.5	1.06	1.27
	M091-FD8109	leads	6	1.7	4.7	0.36	1.5	1.06	1.27
M092-FC08	M092-FD08	leads	6	3	4	0.75	3.56	2.12	2.61
M092-FC09	M092-FD09	leads	6	2.5	4.6	0.55	2.76	2.12	2.61
	M092-FD-310	terminals	6	1.56	6.8	0.23	1.28	2.12	2.61
M092-FF206		leads*	4	4.0	4.0	1.0	11.5	-	2.67
	M092-FF-402	terminals	4	3.4	2	1.7	16.6		2.29
	M092-FD-8008	terminals	8	3	4	0.75	3.56	2.12	2.61
	M092-FD-8108	leads	8	3	4	0.75	3.56	2.12	2.61
	M092-FD-8009	terminals	8	2.5	4.6	0.55	2.76	2.12	2.61
	M092-FD-8109	leads	8	2.5	4.6	0.55	2.76	2.12	2.61
	M092-FD-8114	leads	8	1.65	6.8	0.23	1.18	2.12	2.61
M093-FC07	M093-FD07	leads	6	4.3	3.5	1.22	7.87	3.18	3.88
M093-FC11	M093-FD11	leads	6	2.64	5.5	0.48	3.19	3.18	3.88
M093-FC14	M093-FD14	leads	6	2.27	7	0.324	2	3.18	3.88
	M093-FD-301	terminals	6	1.54	11	0.14	0.85	3.18	3.88
M093-FF206		leads*	4	3.85	4.0	1.0	12.8	-	3.88
	M093-FF-402	terminals	4	4.5	3	1.5	16.9	-	3.88
	M093-FD-8007	terminals	8	4.3	3.5	1.22	7.87	3.18	3.88
	M093-FD-8107	leads	8	4.3	3.5	1.22	7.87	3.18	3.88
	M093-FD-8011	terminals	8	2.64	5.5	0.48	3.19	3.18	3.88
	M093-FD-8014	terminals	8	2.27	7	0.324	2	3.18	3.88

- fiind echipamente digitale, motoarele sunt ușor de folosit împreună cu sisteme de control digital;
- rulmenții componenți sunt de foarte bună calitate, lubrifiați pe viață;



- motoarele sunt capabile să reziste la curenți de 2,5 ori peste curențul nominal (instantaneu) fără să se demagnetizeze;
- tehnica de bobinare fără bucle oferă o rezistență ridicată contra vibrațiilor;
- izolația de clasă B a bobinelor permite utilizarea la temperaturi cuprinse între  $-40^{\circ}\text{C}$  și  $+40^{\circ}\text{C}$ .

În Tabelul 1.3 [69] se prezintă valorile nominale ale familiei de motoare pas cu pas folosite la construcția echipamentului *Comp-U-Craft*. În general, parametrii de funcționare a motoarelor pas cu pas sunt caracterizați prin:

- Evoluția cuplului în funcție de turație (figura 1.22), ea fiind reprezentată pentru trei familii de motoare pas cu pas;

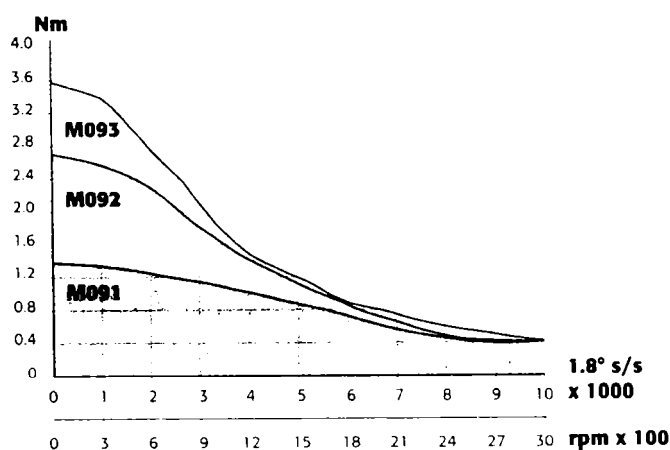


Fig. 1.22 Evoluția cuplului în funcție de turație

Din graficul prezentat în figura 1.22 [69] rezultă că motoarele pas cu pas au o evoluție foarte bună a cuplului în raport cu turația (comparativ cu alte motoare electrice), deoarece la pornire au cuplu maxim și, pe măsură ce crește turația, acesta se diminuează. Această caracteristică favorizează mișcările din punct de vedere mecanic, deoarece la pornire sunt cupluri rezistente mari datorită forțelor

inertiale și a altor cupluri rezistente care apar în cadrul regimului de lucru ales.

— Evoluția vitezei și a accelerației în funcție de timp (figura 1.23) [69].

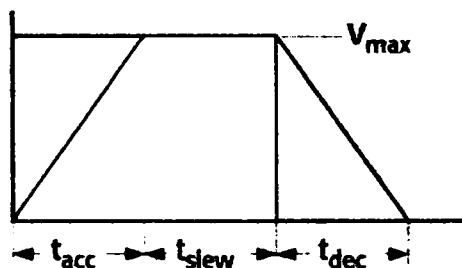


Fig. 1.23 Evoluția vitezei în funcție de timp

#### 1.3.4.2 Alegerea motorului pas cu pas

Motorul pas cu pas trebuie ales astfel încât să poată asigura un cuplu acoperitor pentru înfrângerea tuturor cuplurilor și forțelor rezistente (inertii și frecări), în situațiile cele mai defavorabile. Pentru motor, luat în sine, fabricanții oferă, de cele mai multe ori, valorile acestor cupluri și forțe rezistente, în cataloage. Motoarele, însă, nu vor funcționa niciodată fără sarcină, așa că aceste date prezentate de furnizori trebuie completate cu valorile cuplurilor și forțelor rezistente ale mecanismelor acționate. În cazul echipamentului *Comp-U-Craft*, mecanismele acționate de către motoare se compun din: cuplaj, șurub conducător, piuliță conducătoare, glisieră, suport. Acesta din urmă diferă, în funcție de axa corespunzătoare mișcării. Astfel, pentru axa Z suportul este port-sculă, pentru axa X suportul asigură prinderea întregului dispozitiv corespunzător axei Z, inclusiv motorul de acționare, iar pentru axa Y suportul este masa de lucru (figura 1.18).

Trebuie, de asemenea, observat modul în care acționează gravitația asupra mișcării. Pe axele orizontale, X și Y, gravitația influențează frecările, fiind constantă în raport cu sensul mișcării. În schimb, pe axa Z, care este verticală, gravitația acționează diferit în funcție de sensul mișcării, cumulându-se forțelor rezistente la urcarea suportului port-sculă și deducându-se din acestea la coborârea sa. Pentru alegerea motorului pas cu pas a fost selectată justificarea analitică

referitoare la axa X, deoarece este cea mai solicitată axă, având în vedere că ea susține și întreg ansamblul axei Z (figura 1.16), inclusiv motorul frezei.

*Determinarea momentului rezistent  $M_L$  redus la arborele motorului pas cu pas*

În urma experimentărilor au fost determinate, prin folosirea unor timbre tensiometrice, mărimile forțelor de așchiere pe fiecare axă. La tabla de oțel inoxidabil biocompatibil, cu grosimea de 1,2 mm, forța maximă de așchiere (de împingere a frezei) este de 11 N. Ca atare, în calcule a fost luată această valoare. Valorile introduse în calcule au fost exprimate, unde a fost necesar, în submultipli, deoarece această uzanță a proiectanților, de simplificare a calculelor, este cuprinsă și în cataloagele aflate în circulație. Totuși, la finalul calculelor, rezultatul a fost convertit în unități ale sistemului internațional, fără a face uz de multipli sau de submultipli, indiferent de valoarea rezultată. Unitățile sistemului imperial au fost folosite numai în cazul reperelor de proveniență americană, fiind exprimate astfel de producător. Șurubul conducător este plasat orizontal, având 10 spire pe țol (se evită termenul consacrat de „pas“, pentru a nu se confunda cu pașii motorului pas cu pas). Cu alte cuvinte, o rotație a șurubului conducător produce o deplasare liniară a piuliței conducătoare și a suportului cu care aceasta este solidară de 0,254 cm (acesta fiind pasul filetului șurubului conducător). Folosindu-se sistemul cinematic din figura 1.12, se ajunge la modelul din figura 1.24.

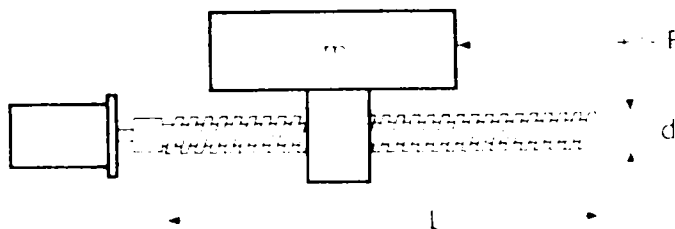


Fig. 1.24 Model cinematic pentru axa X

Analitic, momentul rezistent redus la arborele motorului se calculează astfel [69]:

$$M_L = \frac{F \cdot p}{E \cdot 2 \pi}$$

Se face observația că, în cazul axei Z, unde intervine și gravitația, formula devine:

$$M_L = \frac{(9,8m \pm F) \cdot p}{E \cdot 2 \pi}$$

unde:

- $M_L$  [Nm] este momentul rezistent, redus la arborele motorului;
- $p$  [cm/rot] este pasul filetului conducător;
- $F$  [N] este forța rezistentă, în cazul nostru forța de așchiere;
- $E = 0,45$  este randamentul filetului șurubului conducător [69].

Cu valorile menționate, rezultă:

$$M_L = \frac{F \cdot p}{E \cdot 2 \pi} = \frac{11 \cdot 0,254}{0,45 \cdot 2 \cdot 3,141592} = 0,988$$

#### *Determinarea momentului de inerție redus la arborele motorului*

Folosind același model reprezentat în figura 1.24, se aplică următoarele relații:

$$J_{total} = J_{surub} + J_{sarcina} + J_{rotor}$$

$$J_{surub} = \frac{m \cdot r^2}{2}$$

$$J_{sarcina} = m \cdot p^2 \cdot \left( \frac{1}{2\pi} \right)^2$$

unde:

- $J$  [kg·cm<sup>2</sup>] este momentul de inerție;
- $m$  [kg] este masa (fie a sarcinii, fie a șurubului, după caz);
- $r$  [cm] este raza șurubului ( $r = d/2 = 0,8$  cm).

Masa șurubului conducător fiind de 0,1 kg, se obține:

$$J_{surub} = \frac{m \cdot r^2}{2} = \frac{0,1 \cdot 0,8^2}{2} = 0,032$$

Din însumarea masei reperelor prevăzute la reperele 24, 25, 28, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 51, 52, 54, 63, la care se adaugă masa motorului frezei (1,8 kg), rezultă o masă totală deplasabilă de 7,5 kg. În aceste condiții, se obține:

$$J_{sarcina} = m \cdot p^2 \cdot \left( \frac{1}{2\pi} \right)^2 = 7,5 \cdot 0,254^2 \cdot \left( \frac{1}{2 \cdot 3,141592} \right)^2 = 0,0122$$

Având în vedere că  $J_{rotor}$  pentru motoarele din familia vizată este de 1,23 kg·cm<sup>2</sup>, rezultă:

$$J_{total} = J_{surub} + J_{sarcina} + J_{rotor} = 0,032 + 0,0122 + 1,23 = 1,2742$$

Renunțând la submultipli, se obține:

$$J_{total} = 1,2742 \cdot 10^{-4} \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$$

De regulă, în calculele tehnice ingineresti se adoptă acoperitor un moment total de inerție cu 50% mai mare decât momentul de inerție al rotorului motorului (dat în catalog). În această situație, ar fi rezultat un moment total de inerție de  $1,845 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , valoare cu 45% mai mare decât cea rezultată din calcule. Această aproximație acoperitoare se face uneori, în practică, atunci când nu se mai ține seama de regimul termic al motorului care urmează a fi ales. Risipa de resurse fiind relativ ridicată, în demersul acestei teze a fost preferată varianta analitică de calcul.

### Determinarea cuplului electromagnetic $M_e$ necesar

Cuplul electromagnetic necesar se determină astfel:

$$M_e = M_L + J_{total} \frac{d\omega}{dt} = M_L + J_{total} \epsilon$$

unde  $\epsilon = \frac{d\omega}{dt}$  este accelerația unghiulară.

$$\omega_{max} = 2 \pi \nu_{max} = 2 \pi \cdot 10 = 62,8 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$$\nu_{max} = \frac{n_{max}}{60} = \frac{300}{60} = 5 \left[ \frac{\text{rot}}{\text{s}} \right]$$

Din graficul din figura 1.22 se alege  $n_{max} = 300 \text{ rot/min}$ , zonă în care evoluția cuplului este favorabilă, pentru operarea mașinii *Comp-U-Craft* în sarcină. Pentru deplasările în gol se adoptă  $n_{max} = 600 \text{ rot/min}$ . Se observă că, la  $5 \text{ rot/s}$ , respectiv  $300 \text{ rot/min}$ , corespund  $1000 \text{ pasi/s}$ , deoarece o rotație cuprinde  $200$  de pași.

Se ia în considerație execuția unei deplasări cu pornire din repaus, accelerare până la viteza maximă, deplasare cu viteză maximă, urmată de decelerare până la repaus, întreg ciclul durând un timp  $t = 0,5$  s (figura 1.23). Perioadele alocate regimurilor de accelerație pozitivă, nulă și, respectiv, negativă sunt egale între ele.

$$t_a = t_p = t_d = \frac{t}{3} = \frac{0,5}{3} = 0,166 \text{ [s]}$$

Rezultă că accelerația se execută în  $1000 \times 0,166 = 166$  pasi.

$$\epsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{68,2}{0,166} = 378 \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right]$$

$$M_e = M_L + J_{total} \epsilon = 0,988 + 1,274 \cdot 10^{-4} \cdot 378 = 1,036 \text{ [Nm]}$$

#### *Determinarea regimului termic de lucru*

La alegerea motorului pas cu pas se ține seama și de regimul de lucru, respectiv de solicitarea termică a motorului. Din acest motiv, la cuplul electromagnetic  $M_e$  necesar se aplică următorii coeficienți (STAS 1893/1-87):

$C_T = 1$ , coeficient care ține seama de temperatura mediului ambiant;

$C_S = 1,4$ , coeficient de serviciu care ține seama de gradul de șoc;

$C_F = 1,5$ , coeficient care ține seama de frecvența pornirilor.

$$M_{necesar} = M_e \cdot C_T \cdot C_S \cdot C_F = 1,036 \cdot 1 \cdot 1,4 \cdot 1,5 = 2,175 \text{ [Nm]}$$

Se alege un motor din familia M092 care are un cuplu de 2,12 Nm, cu legături unipolare, sau un motor din aceeași familie cu un cuplu de 2,61 Nm, cu legături

bipolare. Evident, pentru a oferi un cuplu acoperitor, motorul M092 a fost cablat bipolar.

### 1.3.5 Verificarea experimentală a soluțiilor adoptate cu ajutorul studiului metalografic

Cu ajutorul echipamentului *Comp-U-Craft* au fost executate cinci exemplare, identice din punct de vedere al dimensiunilor și al materialului (oțel inoxidabil biocompatibil cu grosimea de 0,4 mm), ale implantelor chirurgicale metalice tip LN 331 S din catalogul „Aesculap”. La fiecare exemplar au fost folosite valori diferite (dar în vecinătatea celor rezultate din calcul sau din cataloage) ale vitezelor de avans și de așchiere. Frezele folosite au fost de tip Widia, acționate cu un motor cu turația de 30.000 rpm.

Condițiile de execuție au fost următoarele:

- proba 1: freză  $\varnothing$  2 mm, rezultând viteza de așchiere de 188,5 m/min, viteza de avans fiind de 40 mm/min;
- proba 2: freză  $\varnothing$  2 mm, rezultând viteza de așchiere de 188,5 m/min, viteza de avans fiind de 30 mm/min;
- proba 3: freză  $\varnothing$  1 mm, rezultând viteza de așchiere de 94,25 m/min, viteza de avans fiind de 30 mm/min;
- proba 4: freză  $\varnothing$  1 mm, rezultând viteza de așchiere de 94,25 m/min, viteza de avans fiind de 40 mm/min;
- proba 5: freză  $\varnothing$  1,3 mm, rezultând viteza de așchiere de 122,52 m/min, viteza de avans fiind de 30 mm/min;

Analiza macroscopică a probelor executate (figurile 1.25÷1.29) a evidențiat aspecte diferite ale suprafețelor prelucrate.

În figura 1.25 se observă mari neregularități ale suprafeței prelucrate, ceea ce denotă o viteză mare de avans, necorelată cu viteza de așchiere și cu posibilitatea evacuării căldurii generate și a șpanului rezultat în urma așchierii.





Fig. 1.25 Aspect macrostructural al suprafeței prelucrate a probei 1

Aspectul suprafeței prelucrate a probei 2 (figura 1.26) este sensibil îmbunătățit, fiind uniform, dar prezintă încă o rugozitate mare.

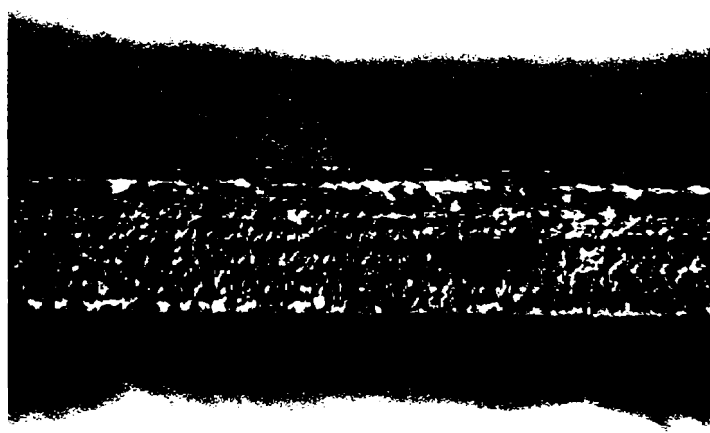


Fig. 1.26 Aspect macrostructural al suprafeței prelucrate a probei 2



Fig. 1.27 *Aspect macrostructural al suprafeței prelucrate a probei 3*

Suprafața prelucrată a probei 3 (figura 1.27) are o structură regulată, cu rugozitate mai mică decât a probelor anterioare, fiind acceptabilă pentru scopul propus.



Fig. 1.28 *Aspect macrostructural al suprafeței prelucrate a probei 4*

Proba 4 (figura 1.28) denotă o suprafață neregulată și rugoasă, cu defecte de material.



**Fig. 1.29** *Aspect macrostructural al suprafeței prelucrate a probei 5*

Proba 5 (figura 1.29) etalează cea mai bună suprafață prelucrată, fiind regulată și cu rugozități minime.

Pentru scoaterea în evidență a aspectului geometric al suprafețelor prelucrate prin cele cinci regimuri menționate anterior, au fost efectuate probe metalografice la mărimi de 150 de ori, astfel încât să fie posibil studiul suprafețelor transversale. În figurile 1.30÷1.34 sunt prezentate aceste analize corespunzătoare eşantioanelor supuse celor cinci regimuri de prelucrare.

Secțiunea transversală pe suprafața prelucrată a probei 1 (figura 1.30) prezentând neregularități și fiind ușor înclinată, sprijină concluziile studiului microscopic de respingere a probei ca necorespunzătoare.

Secțiunea transversală a probei 2 (figura 1.31) prezintă o înclinare mare a suprafeței prelucrate, în sensul de avans, fiind, de asemenea, necorespunzătoare scopului propus.

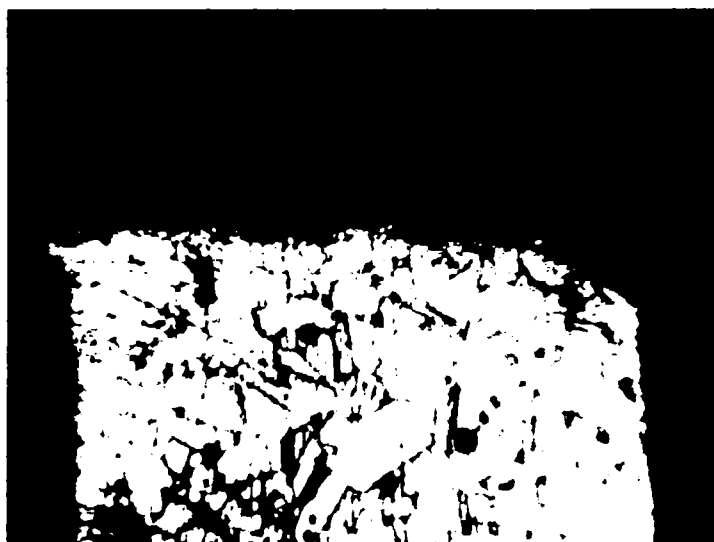


Fig. 1.30 Secțiune transversală pe suprafața prelucrată a probei 1

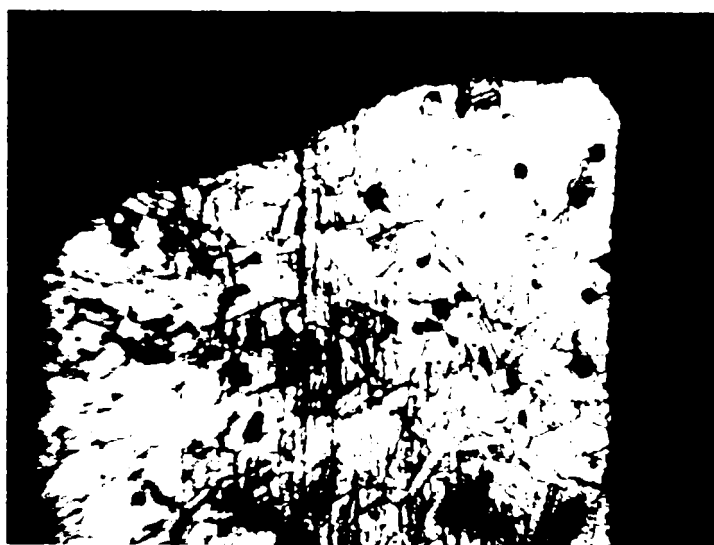


Fig. 1.31 Secțiune transversală pe suprafața prelucrată a probei 2



Fig. 1.32 Secțiune transversală pe suprafața prelucrată a probei 3

Secțiunea transversală a probei 3 (figura 1.32) prezintă o suprafață satisfăcătoare tehnologic, de rugozitate minimă și geometrie corespunzătoare.

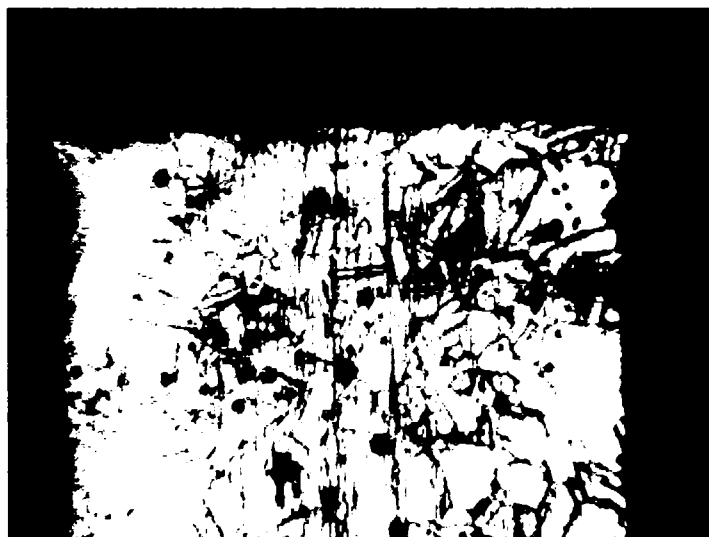


Fig. 1.33 Secțiune transversală pe suprafața prelucrată a probei 4

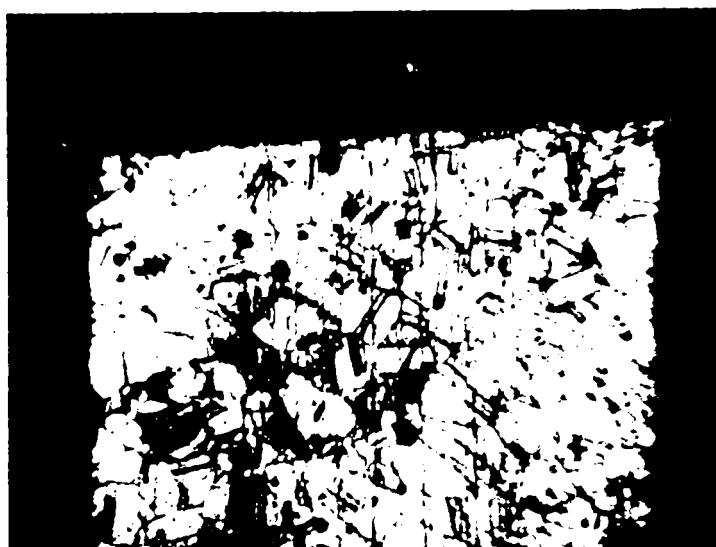


Fig. 1.34 Secțiune transversală pe suprafața prelucrată a probei 5

Proba 4 (figura 1.33) prezintă o secțiune transversală cu aspect mai bun decât probele 1 și 2, dar cu rugozitate ușor necorespunzătoare și cu unele defecte ale suprafeței, nefiind acceptabilă din punct de vedere al cerințelor impuse implantelor chirurgicale metalice, cranio-maxilo-faciale.

Proba 5 (figura 1.34) prezintă o geometrie și o rugozitate corespunzătoare a suprafețelor prelucrate, confirmând observațiile macroscopice care indică un regim corect de prelucrare.

Transformările structurale care apar la nivelul suprafețelor prelucrate sunt puse în evidență prin analiza metalografică microstructurală ( $\times 500$ ), așa cum se prezintă în figurile 1.35÷1.39.

La această mărire, secțiunea transversală prin suprafața prelucrată a probei 1 (figura 1.35) prezintă modificări structurale la nivel superficial, ceea ce o clasifică drept necorespunzătoare scopului propus.

Proba 2 (figura 1.36) reliefează un aspect îmbunătățit, fără defecte de material, dar prezentând în continuare modificări superficiale ale structurii, datorate regimului termic necorespunzător.



Fig. 1.35 Analiza metalografică microstructurală ( $\times 500$ ) a probei 1



Fig. 1.36 Analiza metalografică microstructurală ( $\times 500$ ) a probei 2



Fig. 1.37 Analiza metalografică microstructurală ( $\times 500$ ) a probei 3

Proba 3 (figura 1.37) prezintă o suprafață corespunzătoare, cu modificări structurale minore la nivelul suprafeței prelucrate. Proba corespunde scopului propus.

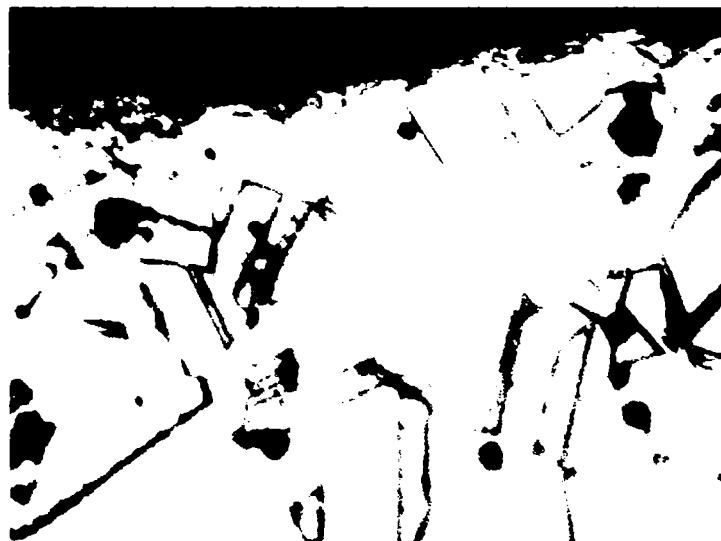


Fig. 1.38 Analiza metalografică microstructurală ( $\times 500$ ) a probei 4

Proba 4 (figura 1.38) prezintă o suprafață cu modificări structurale minore, dar cu geometrie și rugozitate necorespunzătoare.





Fig. 1.39 Analiza metalografică microstructurală ( $\times 500$ ) a probei 5

Proba 5 (figura 1.39) prezintă cele mai bune rezultate din punct de vedere al stării suprafeței și al geometriei acesteia. Din punct de vedere metalografic, proba corespunde în întregime scopului propus, fiind, deci, acceptabilă. Grăunții austenitici au o formă austenitică regulată, poligonală, cu incluziuni minime la suprafețele de separație, acestea prezentându-se globular și cu o repartiție relativ uniformă.

În concluzie, analiza metalografică relevă un oțel inoxidabil austenic, cu granulație omogenă, ceea ce îl face potrivit din punct de vedere al solicitărilor statice și dinamice din timpul utilizării ca implant chirurgical cranio-maxilo-facial. Se adeverește că trebuie să existe corelație de proporționalitate directă între viteza de așchiere și cea de avans, raportul dintre acestea influențând rugozitatea. Totuși, valorile limită nu trebuie depășite în condițiile aceleiași tehnologii de disipare a căldurii, deoarece apar modificări structurale în stratul superficial al suprafeței prelucrate (mai mare la probele 1 și 2 și minim la probele 3 și 5), ceea ce duce la schimbarea comportamentului implantului față de solicitările avute în vedere.



## 2. CONSIDERAȚII ASUPRA PĂRȚII DE HARDWARE

### 2.1 Specificații inițiale

Echipamentul *Comp-U-Craft* are posibilitatea deplasării unei scule în spațiul tridimensional, folosind acționarea pe trei axe paralele cu cele ale sistemului de referință ortonormal. S-a ales acționarea cu motoare pas cu pas care, în ciuda câtorva dezavantaje, minore față de scopul urmărit (deplasare într-un spațiu discret, deplasare bruscă între două stări succesive), oferă avantaje importante, care simplifică proiectarea și diminuează semnificativ costurile de producție și de exploatare (comandă facilă, în buclă deschisă, cu ajutorul unor dispozitive digitale, cuplu mare de pornire și de oprire, cuplu mare de menținere în repaus). Deși, după cum se va arăta în continuare, funcționarea unui motor pas cu pas poate fi reprezentată într-o tabelă de stări, fiind astfel susceptibilă de implementare cu dispozitive digitale, comanda acestui tip de motoare nu se poate realiza direct cu ajutorul unui sistem de calcul, din cauza unor constrângeri care pot fi grupate în două categorii importante: comunicația cu sistemul de calcul și interfațarea dintre semnalele emise de acesta cu cele necesitate de către motoare.

În ceea ce privește categoria constrângerilor de comunicație, primele piedici apărute în tipul proiectării au fost cele relative la sincronizarea semnalelor de comandă. Evident că orice proiectant într-un domeniu ingineresc va încerca întotdeauna rezolvarea unei sarcini cu consum minim de resurse. Având în vedere că un motor pas cu pas necesită, din punct de vedere logic, doar două semnale pentru o comandă minimală (pas și direcție), inițial a apărut atractivă ideea utilizării portului paralel pentru transmiterea semnalelor de comandă către modulul de interfață cu motoarele pas cu pas. Această soluție, deși a simplificat la maxi-

mum comunicația, nefiind necesară construcția unui dispozitiv hardware specializat, a complicat, în schimb, proiectarea software-ului de comandă a echipamentului. Conflictul au apărut din cauza caracterului discret, în timp, al funcționării celor două dispozitive care trebuiau interconectate: calculatorul și echipamentul multifuncțional *Comp-U-Craft*. Constrângerile care acționează asupra celor două dispozitive, din acest punct de vedere, sunt de natură diferită. În ceea ce privește comanda motoarelor pas cu pas, trebuie să se țină seama de valorile limită absolute, specificate de producător, privitor la accelerația, viteza maximă și, respectiv, decelerația aferente unei deplasări a sculei. Aceste valori trebuie coroborate cu masele elementelor mobile ale echipamentului, acționate de aceste motoare, pentru a se asigura înfrângerea inerțiilor și a momentelor inerțiale care apar. Urmează un nou nivel de constrângeri legate, de această dată, de material, de tipul prelucrării și de felul sculei.

Este evident faptul că, prin renunțarea la construirea unui echipament dedicat comunicației, singura metodă de aplicare a semnalelor de comandă prin intermediul portului paralel al calculatorului este cea sincronă, din cauza necesității de a respecta constrângerile amintite anterior. Din păcate, acest lucru este considerabil îngreunat de sistemele moderne de operare, care sunt *multitasking* și *multithreading*. Aceasta înseamnă că va fi foarte dificilă emiterea semnalelor de comandă la momente determinate de timp, deoarece procesorul unic al calculatorului trebuie să execute simultan mai multe sarcini, unele cu mai multe fire de execuție. Termenul „simultan“ este un eufemism generat de percepția imperfectă a unui observator uman, în realitate procesorul lucrând pentru o singură sarcină la un moment dat și comutând de foarte multe ori între acestea, într-o unitate sesizabilă de timp. Sarcinile suplimentare (adică cele care nu se ocupă de transmiterea semnalelor de comandă către echipament) nu pot fi eliminate dintr-un număr de motive. Este suficient să se amintească, dintre acestea, faptul că unele sunt transparente pentru utilizator, fiind chiar componente ale sistemului de operare. Este adevărat că sistemele moderne de calcul operează la viteze superioare cu câteva ordine de mărime față de cele necesare pentru comanda echipamentului, ceea ce crește probabilitatea ca software-ul de comandă să aibă drept de execuție în ferestre de timp aflate în interiorul celor tolerate de necesitățile de acționare a motoarelor pas cu pas.

Din rațiuni comerciale, sistemul de operare ales ca platformă pentru software-ul de comandă este Microsoft Windows. Acesta a fost ales nu doar datorită răspândirii sale covârșitoare, ci și pentru că pentru această platformă există un număr mare de aplicații de la terți furnizori, cu care potențialul beneficiar al echipamentului *Comp-U-Craft* este, foarte probabil, familiarizat. Din păcate, Windows nu implementează un *multitasking* preemptiv, fiind preferată metoda subiectivă a unor recomandări pentru programatorii de aplicații, în ceea ce privește cedarea controlului către sistemul de operare. Bineînțeles că acest lucru împiedică cunoașterea deterministă a momentelor în care pot fi trimise semnalele de comandă către motoarele pas cu pas ale echipamentului, aceste momente fiind puternic influențate de modul în care au fost scrise celelalte programe care rulează „simultan“ pe respectivul sistem de calcul.

Metoda folosită pentru a evita această situație conflictuală a fost una tipic inginerească și anume de transformare a dezavantajului în avantaj. După analiza unui număr relativ mare de fișiere în format HPGL, s-a constatat că, deși acesta suportă descrieri de segmente, cercuri și arce, cvasitotalitatea aplicațiilor de proiectare asistată cu calculatorul folosesc doar segmentul, celelalte curbe reprezentate fiind doar o înlănțuire a acestei entități. Ca atare, soluția a fost rularea rutinei de trasare a unui segment cu prioritate maximă, la nivelul nucleului sistemului de operare (*Ring 0*) și cedarea controlului către acesta doar la sfârșitul execuției segmentului respectiv. Desigur că această analiză este doar principială, problematica fiind mult mai nuanțată și putând constitui obiectul unui studiu amplu, în sine. Practic, sistemele de operare din familia Windows au parcurs un drum lung, migrând de la *multitasking*-ul cooperativ către cel preemptiv. Totuși, nici versiunea 3.1 nu era pur cooperativă (nu i se cerea programatorului să specifice explicit momentul în care aplicația sa trebuie să returneze controlul către sistemul de operare), după cum nici versiunea XP, deși foarte restrictivă cu libertățile acordate programatorilor, nu este pur preemptivă, deoarece există posibilitatea rulării (e adevărat, doar sub formă de *driver*) unor aplicații la nivelul nucleului, cu ignorarea tuturor întreruperilor mascabile, ceea ce imprimă un puternic caracter cooperativ într-un mediu proiectat ca preemptiv. Versiunea XP este deosebit de bogată în

facilități de temporizare și prioritizare, cu reguli foarte stricte, atât la nivelul aplicațiilor de utilizator, cât și la nivelul *driver*-elor, creând mult mai multe premise pentru rezolvarea software a constrângerilor de timp menționate anterior, decât versiunile timpurii.

Această soluție, deși rezolvă problema în mod satisfăcător și cu costuri minime, nu este foarte elegantă. Soluția standard, în astfel de cazuri în care nu există o relație stabilă între vitezele de lucru ale celor două dispozitive, constă în adoptarea unei comunicații asincrone cu un dispozitiv intermediar, având rolul principal de tampon al fluxului de comenzi. Acest dispozitiv trebuie să aibă rolul, pe de o parte, de a comunica cu sistemul de calcul, la momentele de timp agreate de acesta, pentru a primi blocuri de comenzi pentru motoarele pas cu pas împreună cu informațiile de sincronizare, și de a transmite aceste comenzi către echipament la momentele de timp impuse de complexul de constrângeri date de motoare, echipament, material, prelucrare, sculă, așa cum s-a arătat la începutul acestui capitol.

Între posibilitățile de realizare a acestui deziderat, s-a impus rapid soluția comunicării prin interfața USB 1.0 datorită câtorva avantaje clare: generalizarea acestui tip de port pe sistemele de calcul construite în ultimii ani, costul scăzut al implementării și al elementelor de conectare, fiabilitatea ridicată (datorată implementării detecției și corecției erorilor la nivelul hardware-ului și al sistemului de operare), precum și posibilitatea de a lega un număr mare de echipamente multifuncționale *Comp-U-Craft* la un singur sistem de calcul (cu avantaje imediate în ceea ce privește scăderea costurilor de investiție și de producție și creșterea productivității muncii). Această soluție este descrisă funcțional în paragraful 2.2, detalierea implementării nefiind permisă.

Celălalt grup de constrângeri se referă la interfațarea dintre semnalele de comandă generate de echipamentele digitale (îndeobște, de mică putere) și cele necesitate de motoarele pas cu pas (de regulă, de medie sau mare putere). Pentru simplificarea acestei interfețe (cu consecințe directe asupra fiabilității și mentenabilității) a fost aleasă soluția formării semnalelor de comandă (din punct de vedere al duratelor) la nivelul dispozitivului digital descris în paragraful 2.2, ceea ce are drept urmare reducerea proiectării acestei interfețe la nivelul unui amplificator de

tensiune și de curent, astfel încât să se obțină parametrii ceruți de motoarele pas cu pas.

O consecință indirectă a acestei abordări este faptul că utilizarea unor modele diferite de motoare pas cu pas la construcția unor echipamente cu destinații diferite nu necesită reproiectarea acestei interfețe, ci doar un efort de reprogramare a unor parametri ai programului rulat de către dispozitivul digital. Astfel, paragraful 2.3 studiază regimurile de funcționare ale motoarelor pas cu pas de tipul celor folosite la construcția mașinii, prezentând, în final, implementarea unei interfețe electronice care să suporte comanda acestora în regimurile respective.

## 2.2 Comunicația dintre sistemul de calcul și echipamentul *Comp-U-Craft*

Pentru comanda a trei motoare pas cu pas (corespunzătoare celor trei axe carteziane) printr-un sistem comandat de un calculator personal (PC) este necesară transmiterea unor semnale de la acesta către echipament. Formatul acestor semnale (comenzi) pe care le acceptă circuitul de comandă a motorului pas cu pas este *direcție:pas*, unde *direcția* se dă, pentru fiecare motor, sub forma unui bit (de exemplu, 0 pentru stânga și 1 pentru dreapta), iar *pasul* este un semnal treaptă (motorul sesizează nivelul ridicat al unui semnal treaptă, pentru care acționează cu un pas) [60].

O dată cunoscută o secvență logică de comenzi, se dorește ca aceasta să fie transmisă, spre execuție, motorului. În același timp, nu se consideră acceptabil ca sistemul de comandă PC să fie ocupat 100% din timpul de calcul cu transmisia acestor comenzi. Această ultimă restricție permite calculatorului de comandă să poată executa și alte sarcini în timp ce dispozitivul fizic comandă motorul pentru

un set de instrucțiuni. De asemenea, s-a urmărit stabilirea unei soluții care să simplifice modificarea anumitor parametri ai transmisiei (logica de comandă a motorului se poate schimba și soluția aleasă trebuie să poată fi ușor adaptabilă).

O primă problemă care a necesitat rezolvare a fost conectarea mai multor dispozitive la același calculator. Soluția aleasă a fost comunicarea prin USB (*Universal Serial Bus*), deoarece acest tip de interfață oferă cea mai ieftină soluție, fără penalități de performanță în cazul avut în vedere [60].

O altă problemă a fost asigurarea unei fiabilități ridicate a sistemului, în condițiile necesității unor reprogramări facile. Posibilitățile luate în considerație au fost multiple, căutându-se o soluție simplă, performantă și ieftină. Folosirea unei memorii EPROM sau EEPROM ar fi avut avantajul unei relative simplități, dar nu era suficient de flexibilă. Astfel, o dată programat EPROM-ul, utilizatorul nu ar mai fi avut posibilitatea de a actualiza software-ul care rulează pe microcontroler, ci numai cel de pe PC. Această limitare a fost depășită de soluția aleasă în final, și anume microcontrolerul EZ-USB. În acest caz, programul care rulează pe microcontroler este adus în RAM-ul local, prin interfața USB, în etapa de inițializare a dispozitivului. Soluția este doar în aparență mai complexă decât prima, fiindcă, de fapt, procesul de aducere a programului se realizează automat de către hardware, adică de către microcontroler, sub supravegherea *driver*-ului care rulează pe PC. Astfel, se obține o flexibilitate maximă, atât software-ul de pe PC, cât și cel pentru microcontroler putând fi actualizate ușor de către utilizatorul final, lăsându-se loc pentru ulterioare îmbunătățiri sau extinderi ale facilităților oferite. Această flexibilitate deosebită nu produce o creștere valorică substanțială a echipamentului, deoarece se micșorează numărul de circuite folosite, nemaifiind necesar EPROM-ul [60].

Soluția constă într-un dispozitiv cu microcontroler care preia datele (direcție, număr de pași) de la un PC și generează apoi semnalele corespunzătoare de comandă pentru motor. Comunicația cu PC-ul se realizează prin portul USB (se vor putea astfel conecta până la 127 de dispozitive la un singur PC). Protocolul de comunicație va fi simplu, dispozitivul preluând un număr de comenzi pentru care va genera semnale de acționare pentru motor. La momentul când setul de comenzi se apropie de sfârșit, dispozitivul va semnala PC-ului că are nevoie de o nouă



tranșă de date, pe care o va prelua în fundal, adică transparent față de motor, astfel încât acesta nu va sesiza întreruperi în seria de comenzi.

Dispozitivul oferă posibilitatea reprogramării facile, denumită în continuare *software uploading* [91], [92]. Mai precis, programul nu va fi găzduit într-o memorie EPROM, EEPROM, OTP etc. (a căror rescriere necesită utilizarea unor dispozitive speciale sau este chiar imposibilă prin procedee exclusiv electrice), ci va fi descărcat dinamic, la fiecare reconectare a dispozitivului la sistemul de calcul. Acesta va sesiza conectarea dispozitivului și va iniția un transfer de date spre el. Singurul cod programat cu adevărat în dispozitiv este cel care va efectua descărcarea programului la reconectare, necesar în dialogul PC–dispozitiv. Acesta este găzduit chiar de resursele microcontrolerului.

### 2.2.1 Soluția hardware

Cele prezentate în preambulul paragrafului 2.2 creionează demersul proiectării prin trecerea în revistă a necesităților și identificarea celor mai simple și mai eficiente soluții. În cazul care face obiectul tezei de față s-a preferat adoptarea unei metodologii de proiectare recente și foarte performante sub aspectul raportului dintre performanță și preț, anume co-designul hardware și software. Astfel, după ce toate constrângerile de temporizare au fost puse în evidență prin proiectarea judicioasă a părții mecanice, ceea ce a permis alegerea corectă a motoarelor de acționare, acestea au devenit premise pentru proiectarea dispozitivului de comunicare asincronă și de generare a semnalelor de comandă. Nu ar fi în interesul unei proiectări eficiente să se dezvolte soluții eminentemente originale acolo unde există soluții acceptabile, prefabricate de către marii furnizori. Justificarea acestui demers constă în creșterea nepermisă a parametrului TTM (*Time To Market*), în imposibilitatea de a asigura *ab initio* o fiabilitate echivalentă cu a soluțiilor consacrate, precum și în costurile mult mai ridicate ale proiectării. Soluția EZ-USB a firmei Cypress s-a remarcat prin:

- putere suficientă de calcul la un preț acceptabil;

- arhitectură ușor de exploatat și de extins, datorită nemultiplexării magistrelor;
- interfață USB gata implementată, soluționând problema comunicării;
- consum redus de energie, putând fi alimentat prin interfața USB;
- semnale suficiente pe porturile de ieșire pentru necesități de comandă ale versiunilor curente și viitoare ale mașinii *Comp-U-Craft*;
- posibilitate de *software uploading*, obținându-se o flexibilitate ridicată.

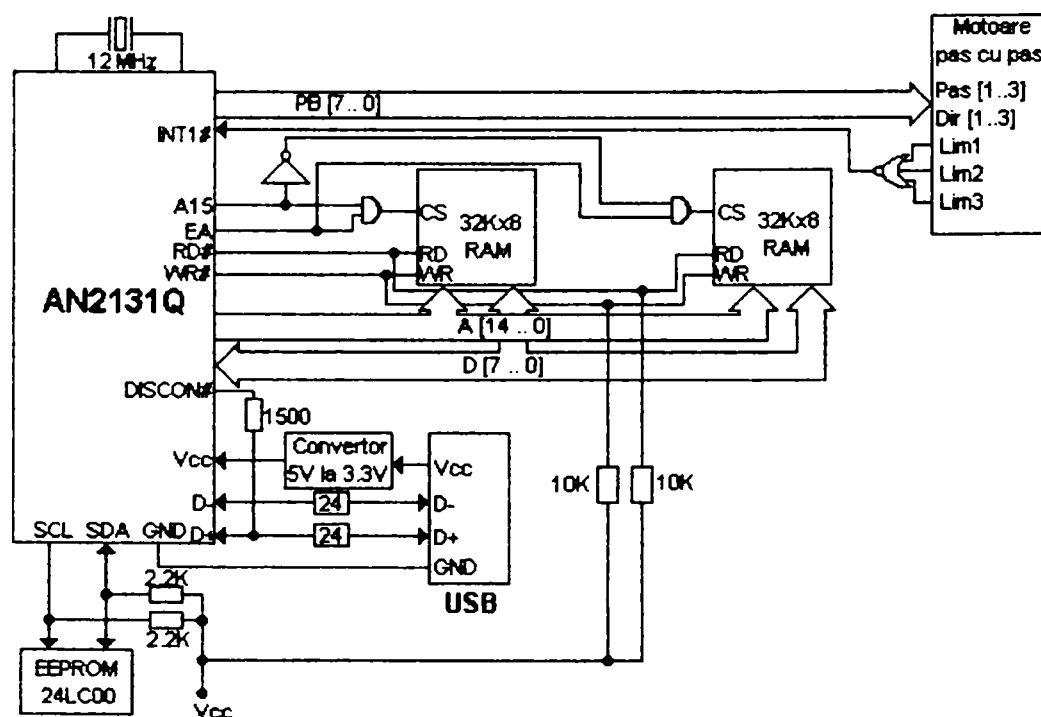


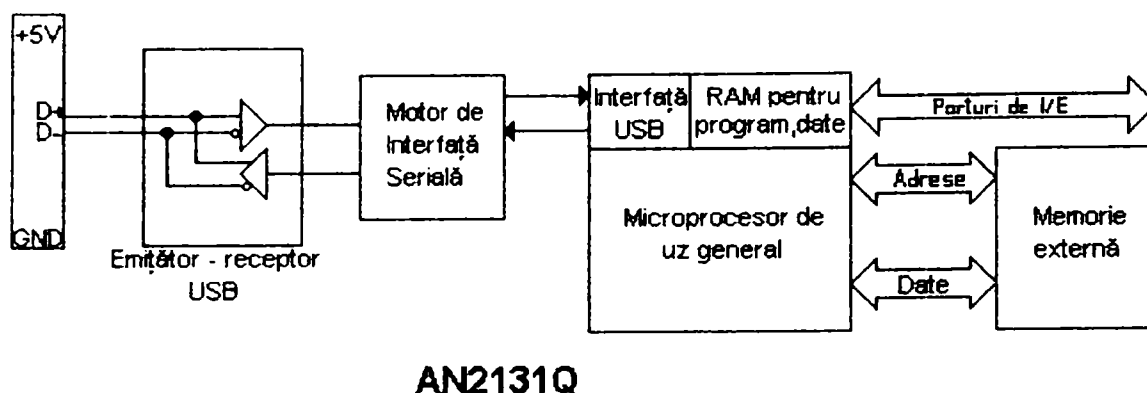
Fig. 2.1 Schema de principiu a soluției hardware

La fel ca și în capitolul precedent, detalierea modului de comunicare și de interfață nu este posibilă pentru a nu leza interesele legitime ale *CD Nelson Manufacturing & Supply Co.*, motiv pentru care sunt prezentate doar scheme bloc și principii de funcționare. Astfel, sunt trecute în revistă cele două componente ale

proiectării mixte hardware-software, precum și capabilitățile de comunicație USB. Soluția hardware este redată în schema din figura 2.1. Semnalele de la sesizoarele de capăt de cursă ajung și la pinii 0, 1 și 2 ai portului C (PC), pentru ca aplicația rulată pe calculator să poată identifica axa pe care s-a atins capătul de cursă.

Schema cuprinde următoarele componente principale:

- a) Un circuit integrat AN2131Q (figura 2.2), [91], microcontroler îmbunătățit din familia 8051, este produs de firma Cypress și conceput special pentru a lucra cu portul USB al unui PC. Îmbunătățirile constă în viteza de lucru, o interfață serială în plus, un al treilea temporizator pe 16 biți, magistrale nemultiplexate de adrese și de date, opt întreruperi adiționale, precum și un consum redus datorat alimentării la 3.3 V. AN2131Q are posibilitatea de *software uploading*, prin care software-ul pe care îl va rula este adus de pe PC, facilitate care nu numai că face inutilă prezența unui EPROM, ci, mai ales, oferă posibilitatea unor actualizări ulterioare. Pe lângă aceasta, dotarea circuitului este remarcabilă. Nucleul 8051 inclus este foarte performant, datorită frecvenței la care lucrează, 24 MHz, cât și a îmbunătățirilor aduse. Acestea îl fac să proceseze mult mai rapid instrucțiunile, un ciclu mașină având 4 perioade de tact, față de 12 la alte microcontrolere. Capacitatea de 8 KB a memoriei RAM, inclusă în interiorul microcontrolerului, este suficientă pentru a conține software-ul care rulează, o parte dintre date și tampoanele pentru transferul pe USB. Numărul relativ mare (80) de pini ai acestui microcontroler duce la o simplificare a schemei și la o reducere a costurilor, prin eliminarea unor circuite necesare demultiplexării magistrelor. Cei 24 de biți prezenți pe porturi sunt suficienți pentru aplicație, oferind chiar posibilitatea unei extinderi ulterioare. Dintre cele trei temporizatoare existente se folosește doar unul. Se remarcă precizia acestora, întârzierea minimă pe care o pot genera fiind de 0,166 ms (deși în aplicații se admite o întârziere minimă de 0,5 ms). Microcontrolerul ales este o soluție optimă după criteriile preț/performanță, rezolvând simplu problemele identificate cu un minim de circuite. Schema cu pinii microcontrolerului este prezentată în continuare, în figura 2.3 [91].

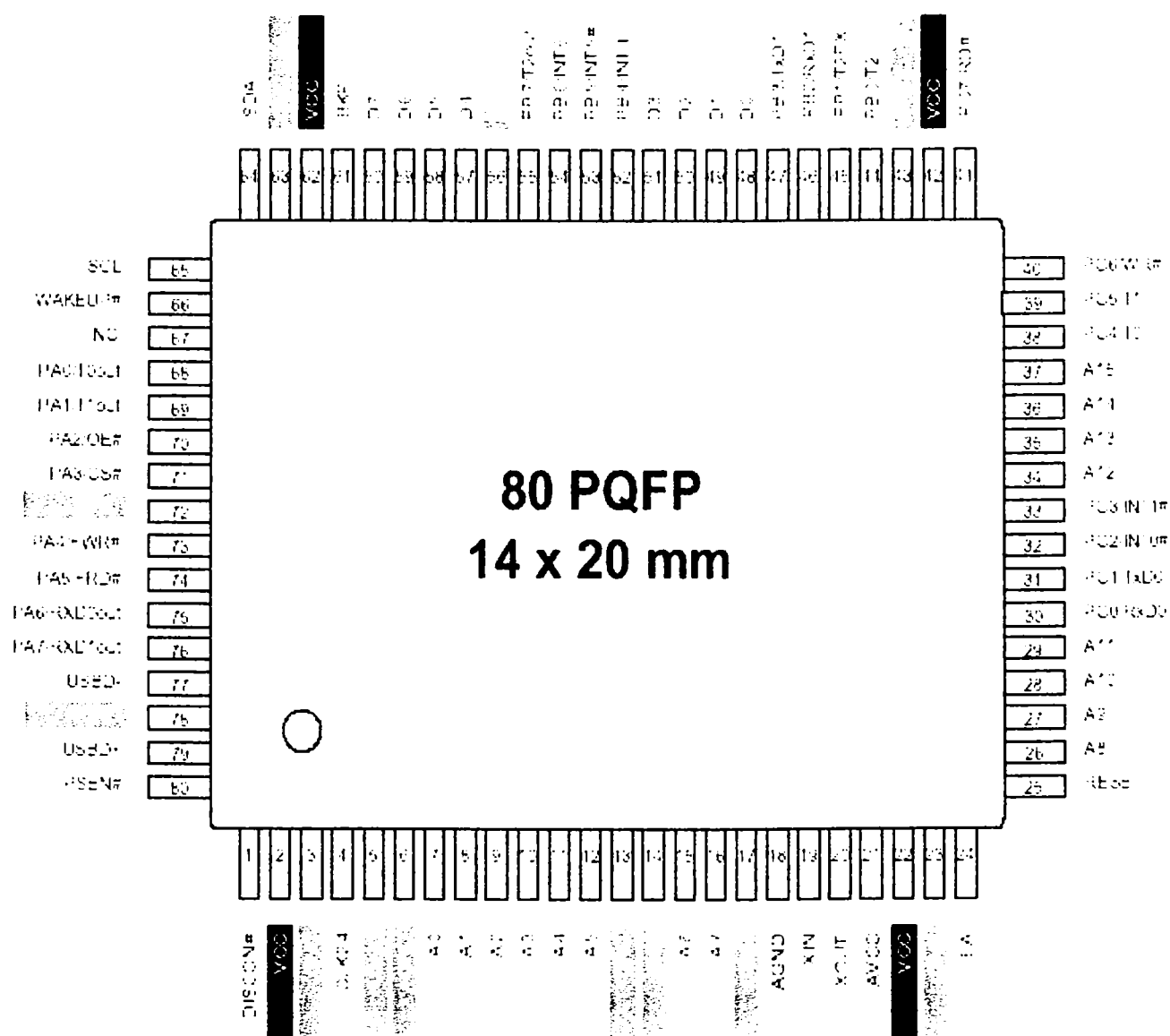


AN2131Q

Fig. 2.2 Schema de principiu a circuitului integrat AN2131Q

- b) O memorie EEPROM de 16 octeți, conectată pe interfața I<sup>2</sup>C a microcontrolerului, care are rolul de a furniza datele necesare în cadrul procesului de enumerare și reenumerare care are loc la conectarea dispozitivului la portul USB al calculatorului.
- c) Două memorii SRAM de câte 32 KB, în care sunt păstrate datele care urmează a fi transmise către motoarele pas cu pas. Selecția uneia dintre cele două capsule se face în funcție de bitul cel mai semnificativ al magistralei de adrese. Semnalele de citire, respectiv de scriere, din și în aceste memorii, generate de către microcontroler, sunt *RD#* și *WR#*.
- d) Un conector USB la care se cuplează cablul de legătură cu calculatorul. Prin acest cablu se realizează atât transmiterea de date de la PC spre microcontroler, cât și alimentarea plăcii la o tensiune de 5 V. Curentul asigurat de către portul USB al calculatorului este de 500 de mA, în cazul unei legături directe și de 100 de mA în cazul în care, datorită anumitor motive (distanța mare între PC și microcontroler, mai multe microcontrolere conectate la PC etc.), legătura este făcută printr-un concentrator (*Hub*).
- e) Un convertor de tensiune interpus între borna Vcc a conectorului USB și pinii Vcc ai microcontrolerului. Acesta este necesar deoarece tensiunea asigurată

de către PC este de 5 V (poate scădea până la 4,4V), iar tensiunea de alimentare a lui AN2131Q este de 3,3 V.



- f) O parte care monitorizează echipamentul cu motoare pas cu pas. Se poate observa, astfel, modul în care sunt transmise comenzile către mașină și felul în care se generează o întrerupere în cazul depășirii uneia dintre limite. Comenzile sunt transmise sub forma unui octet plasat pe portul B al microcontrolerului. Șase biți sunt folosiți pentru a transmite trei direcții și trei pași, iar doi biți sunt nefolosiți. Semnalul *INT1#* este activat în momentul în care unul dintre limitatoare a semnalizat depășire.
- g) Rezistoare de diferite valori care au rolul, în general, de tragere la 1 logic, fiind legate între diferite semnale din schemă și *Vcc*, cu scopul de a determina valoarea acestor semnale imediat după reset, precum și atunci când nu sunt folosite. Excepție fac cele două rezistențe de  $24 \Omega$ , plasate pe liniile de date *D+* și *D-* dintre microcontroler și USB, care au rol de adaptor de linie.
- h) Un generator de impulsuri de tact de 12 MHz care se leagă la intrarea *XIN*. Această soluție hardware se numește SMC (*Stepper Motor Controller*).

### 2.2.1.1 Detalii referitoare la interfața USB

Interfața USB a fost construită pentru a deveni un standard în industria producției de periferice pentru calculatoare personale. La elaborarea sa au fost luate în considerație următoarele aspecte [180]:

- conectarea facilă a mai multor periferice la un PC;
- capabilitatea soluției de a atinge viteze de transfer de până la 480Mb/s;
- suport complet pentru transmisia de date audio, video și voce în timp real;
- un protocol flexibil, capabil să combine transferuri izocrone de date cu transferuri asincrone;
- independența conectării perifericelor față de configurația internă a calculatorului;
- realizarea unei interfețe standardizate pentru toate tipurile de periferice.

În primă instanță, USB-ul este o magistrală de date la care se pot conecta direct periferice. Taxonomia spațiului alocat pe USB pentru aplicații este redată în Tabelul 2.1 [94].

**Tabelul 2.1** Taxonomia spațiului alocat pe USB

Performanțe	Aplicații	Caracteristici
<i>LOW-SPEED</i> 10Kbps÷100Kbps	echipamente periferice interactive: tastatură, șoricel, <i>joystick</i> , creion optic	ușor de folosit, conectare și deconectare facilă
<i>FULL-SPEED</i> 500Kbps÷10Mbps	date comprimate audio și video: radio, audio, microfon	caracteristici asemănătoare cazului precedent
<i>HIGH-SPEED</i> 20Mbps÷400Mbps	date audio și video în timp real: video, audio, dispozitive de stocare a datelor	aceleași caracteristici ca în cazul precedent, lărgime de banda cu mult mai mare decât în celelalte două cazuri

### 2.2.1.2 Arhitectura magistralei USB

Din punct de vedere al arhitecturii unei interconexiuni dintre un echipament periferic și USB, se remarcă trei componente esențiale [180]:

- modul de interconectare: topologia magistralei, adică tipul legăturii dintre echipament și gazdă, modul de transmisie a datelor înspre și dinspre USB, precum și „distribuția temporală“ (*time sharing*) în cadrul transmisiei datelor pe magistrala USB înspre controlerul gazdă a USB;
- perifericul conectat la USB;
- gazda USB din calculatorul la care a fost conectat perifericul.

Gazda USB este unică pentru un sistem dat. Interfața dintre ea și periferice este referită standard prin denumirea de *Host Controller*. Toate perifericele sunt atașate prin intermediul unui *hub*. Acesta are prevăzuți biți pentru indicarea prezenței unui periferic pe unul dintre porturile *hub*-ului respectiv. Conectarea sau deconectarea unui periferic la USB este, deci, sinonimă cu poziționarea sau anularea bitului de prezență a unui periferic pe portul *hub*-ului și, totodată, transmiterea informației de conectare sau de deconectare a perifericului spre gazda USB. Echipamentele USB pot fi atât periferice, cât și *hub*-uri care permit conectarea mai multor dispozitive la controlerul USB. Ambele prezintă următoarele trei caracteristici majore, [94]:

- sunt adaptate la protocolul USB;
- au răspuns standardizat la operațiile USB de reset, configurare și control;
- transmit, folosind unul dintre modurile de transfer a datelor pe USB, informațiile lor specifice pentru dialogul cu PC-ul la care sunt conectate, respectiv cu aplicația care le guvernează.

Protocolul transferurilor pe magistrală se bazează pe faptul că USB este o magistrală care necesită *polling*. Fiecare transfer de date (tranzacție) include în general trei pachete de date [94]:

- fiecare tranzacție începe atunci când controlerul gazdă transmite pe magistrală un pachet, denumit *token packet*, care conține tipul și direcția tranzacției, adresa perifericului USB, precum și un număr de destinatar (*endpoint*, reprezentând o adresă logică din cadrul perifericului, atribuită uneia dintre componentele funcționale ale acestuia, capabilă să recepționeze sau să transmită date pe magistrala USB);
- perifericul destinatar recepționează pachetul care îi este adresat prin decodificarea adresei din pachet, după care fie primește un nou pachet de la controlerul USB, fie transmite un pachet către controlerul USB, în funcție de direcția transferului, specificată în *token packet*;
- în general, tranzacția se încheie cu pachetul de *handshake*, indicând dacă transferul a fost efectuat cu succes, excepție fiind transferul izocron.



Transferul de date pe magistrala USB între gazdă și un periferic este de tip „conductă” (*pipe*) și poate fi de două feluri: „flux” (*stream*, care conține dialogul de date dintre periferic și *driver* sau aplicație) și „mesaj” (*message*, care conține dialogul de date dintre periferic și gazda USB). Transferul de date pe USB poate fi funcțional și de control și de tip conductă. Unui periferic îi pot corespunde mai multe conducte. Spre exemplu, un periferic poate avea o conductă de transmisie de date spre USB și o conductă de recepție de date dinspre USB. Tipurile de transfer de date pe USB sunt următoarele [93]:

- transferuri de control, folosite la configurarea unui periferic la conectare sau pentru controlul conductelor deschise pentru acel dispozitiv;
- transferuri „vrac” (*bulk*), generate în blocuri de lungime relativ mare și la intervale scurte de timp între ele;
- transferuri prin întrerupere, folosite, în general, pentru răspunsuri în urma unor anumite acțiuni ale perifericului;
- transferuri izocrone, care ocupă o lățime de bandă dinainte stabilită, în scopul unui transfer în timp real cu o latență predeterminată.

O conductă suportă numai unul dintre aceste tipuri de transfer de date. Vor fi detaliate în continuare transferul informațiilor de control, precum și două tipuri de transferuri de date. Dintre acestea, în cazul echipamentului realizat se folosește (pe lângă transferul informațiilor de control, folosit în momentul conectării) transferul de date în vrac.

- transferul de date de control, folosite de *USB System Software* pentru a configura perifericele în momentul în care sunt atașate la USB (figura 2.4) [91]. Alte *driver*-e de sistem pot folosi acest tip de transfer de date într-un mod specific aplicației pentru care au fost concepute. Transferul are loc fără nici un fel de pierderi de date [93];
- transferul izocron de date este continuu și are loc în timp real (figura 2.5) [91]. Lățimea de bandă inițial specificată este aleasă astfel

încât să acopere viteza necesară transferului în timp real între dispozitivul care transmite datele respective și USB. Latența necesară și prestabilită este și ea direct dependentă de tamponanele care se află la dispoziția *endpoint*-ului care transmite datele. Acest mod de transmitere a datelor nu poate, însă, împiedica în nici un fel eventualele erori, deoarece, neexistând pachetul de *handshake*, nu există nici posibilitatea unei cereri de reluare (*retry request*) în cazul în care blocul de date primit este incomplet sau cu erori de transmisie [93];

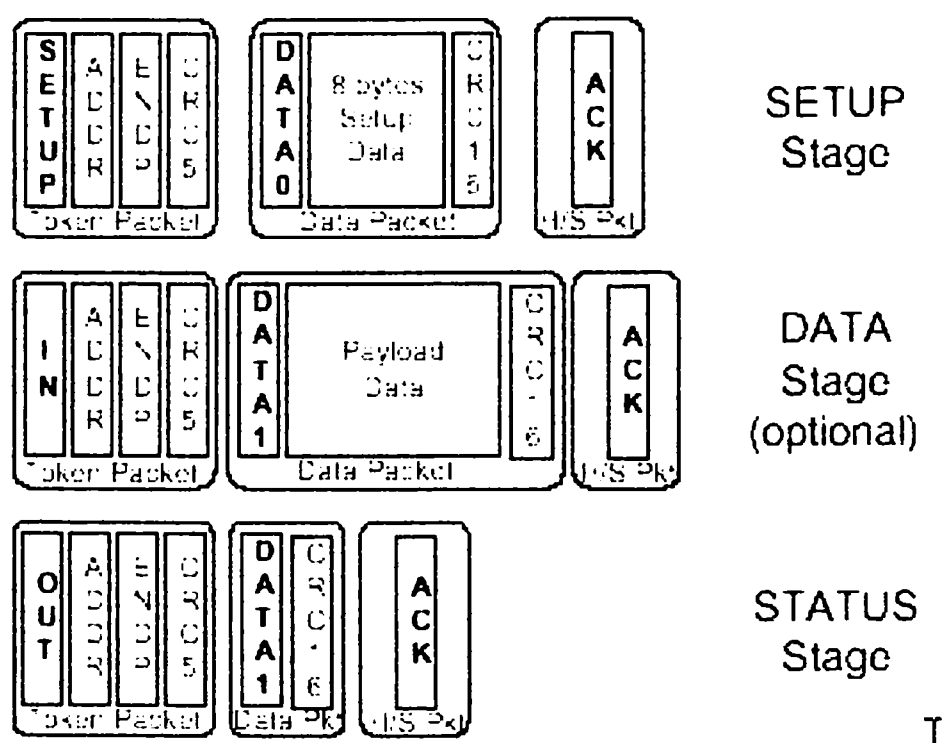


Fig. 2.4 Transferul de date de control

- transferul de date în vrac (*bulk*) (figura 2.6) [91]. Alocarea lățimii de bandă pe USB pentru un periferic se face pe baza conductelor necesare acestuia. O singură conductă este activă la un moment dat pe controlerul USB, ceea ce conduce la necesitatea ca fiecare *endpoint* să aibă la dispoziție un anumit mod de trecere a datelor printr-un

tampon. De aceea, cu cât este mai mare lățimea de bandă alocată pentru o conductă, cu atât trebuie crescută capacitatea tamponelor prevăzute pentru acel *endpoint* [93].

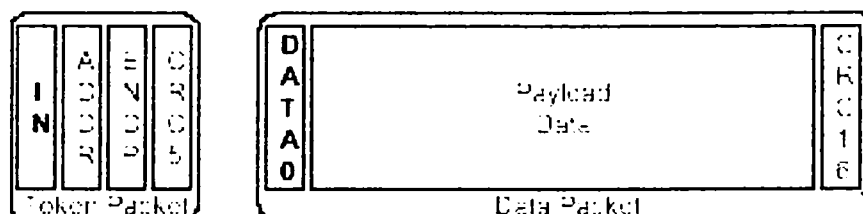


Fig. 2.5 Transferul izocron de date

Din punct de vedere logic, transferurile de date au loc după diagrama prezentată în figura 2.7 [93]:

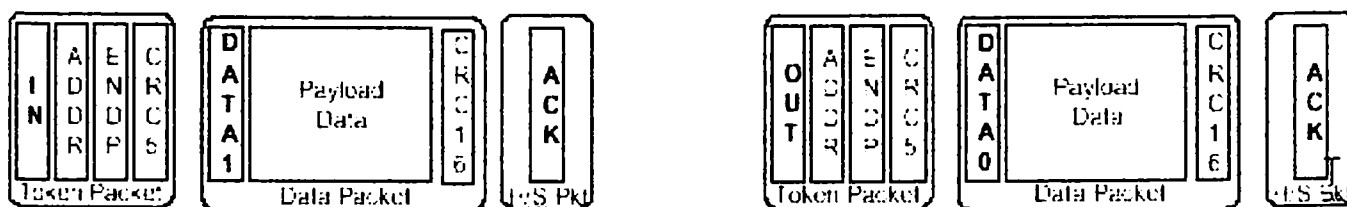


Fig. 2.6 Transferul de date în vrac

Comunicarea între programul utilizator are loc la nivel fizic între controlerul gazdă din calculator și *Serial Interface Engine*. La primul nivel al protocolului USB are loc identificarea perifericului cărui îi este alocată magistrala. La nivelul superior al dialogului prin interfața USB are loc comunicarea dintre aplicația software care rulează pe calculator și fiecare dintre funcțiile implementate de periferic.

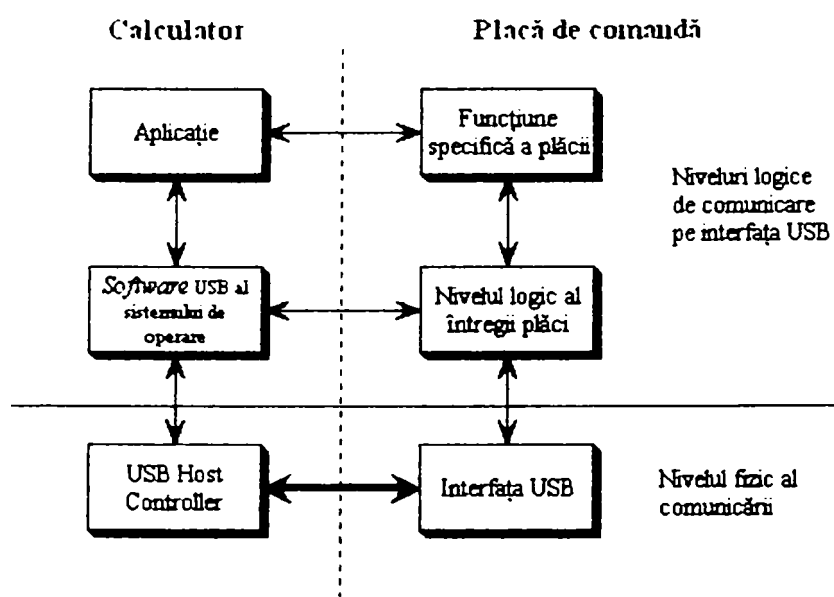


Fig. 2.7 Diagrama logică a transferurilor de date prin USB

### 2.2.1.3 Inițializarea perifericului

Perifericele care folosesc magistrala USB trebuie să fie compatibile cu standardul *Plug & Play*. Inițializarea unui periferic are loc de fiecare dată când acesta este conectat la magistrala USB. Pașii parcurși în această fază sunt următorii [93]:

- informarea controlerului gazdă de către *Hub* ca urmare a conectării unui periferic printr-o conductă specializată;
- interogarea *hub*-ului de către controlerul gazdă, care determină natura schimbării în rețeaua USB;
- intrarea în așteptare a controlerului gazdă (100 de milisecunde) pentru a stabili alimentarea perifericului, după identificarea portului la care acesta a fost inserat;
- trimiterea de către controlerul gazdă a unui mesaj de reset spre acel port;

- îndeplinirea de către *Hub* a cererii de reset adresată de controlerul gazdă, moment din care dispozitivul va trebui să răspundă pe adresa de periferic 00H;
- alegerea de către controlerul gazdă a unei adrese pentru dispozitivul atașat;
- interogarea perifericului de către controlerul gazdă asupra lățimii de bandă, necesară menținerii controlului pe noua adresă și transmiterea noii adrese;
- citirea de către controlerul gazdă a configurației *endpoint*-urilor plăcii (proces care poate dura mai multe milisecunde);
- atribuirea de către controlerul gazdă a unui cod de configurare a perifericului, după analizarea informațiilor obținute.

Din acest moment, dispozitivul va putea fi folosit de către aplicațiile software aferente, întrucât *endpoint*-urile acestuia funcționează după logica stabilită de proiectantul funcțiunilor perifericului.

#### 2.2.1.4 Programarea interfeței USB în mediul de operare Windows. Descrierea driver-ului

Driver-ul SMC.SYS aparține controlerului motoarelor pas cu pas — SMC (*Stepper Motor Controller*). Acest *driver* se ocupă de interfațarea dintre aplicația care rulează la nivelul utilizator și *driver*-ul controlerului gazdă, care se ocupă de arbitrarea accesului la magistrala USB și de transmiterea efectivă a pachetelor de date pe aceasta. De asemenea, *driver*-ul controlerului gazdă se ocupă de atașarea antetelor corespunzătoare la pachetele care se trimit pe magistrala USB. Aceste pachete identifică receptorul, sincronizarea și alte asemenea informații necesare pentru evitarea conflictelor și a situațiilor de recepție eronată la nivelul perifericeilor conectate la magistrala USB. De asemenea, *driver*-ul controlerului gazdă se ocupă și cu gestionarea pachetelor de date care sosesc de pe magistrala USB. El

decodifică informația din antete și identifică destinatarul pachetului, adică *driver*-ul perifericului care a trimis pachetul, trimițându-i *driver*-ului corespunzător o notificare despre pachetul care a sosit.

Perifericul (adică SMC-ul) are cinci *endpoint*-uri, adică cinci adrese alocate pe USB. *Endpoint*-ul 0 corespunde unei conducte de control de intrare-ieșire, prin intermediul căreia se stabilesc caracteristicile ieșirilor plăcii. Celelalte *endpoint*-uri corespund unor conducte prin care transferul se face în vrac sau prin întreruperi.

*Driver*-ul folosește USBDI (*USB Driver Interface*), care este interfața standard dintre *driver* și aplicație. Interfața dintre controlerul gazdă și *driver* este denumită HCDI (*Host Controller Driver Interface*). *Driver*-ul trebuie să rezolve IRP-urile (*I/O Request Packets*) pe care le primește de la managerul de I/O al sistemului și care sunt legate printre altele de *Power Management* și de *Plug and Play*. IRP-urile sunt structurile de bază prin care managerul de I/O comunică cu *driver*-ul. USBDI este parte a arhitecturii pe niveluri WDM (*Windows Driver Model*) și este interfața oferită mini-*driver*-elor care lucrează în modul *kernel* de către stiva de *driver*-e USB a sistemului de operare. Un mini-*driver* comunică cu stiva USB printr-o interfață IRP. Există două metode de bază prin care se face comunicarea și amândouă sunt folosite de către SMC.SYS:

- Mini-*driver*-ul de USB transmite o structură de tip URB (*USB Request Block*) către *driver*-ul de pe următorul nivel din stiva de *driver*-e, ca parametru într-un IRP cu câmpul `MajorFunction` egal cu `IRP_MJ_INTERNAL_DEVICE_CONTROL` și următorul IRP din stiva de IRP-uri cu câmpul `Parameters.DeviceIoControl.IoControlCode` egal cu `IOCTL_INTERNAL_USB_SUBMIT_URB`;
- Mini-*driver*-ul USB transmite un IRP cu `MajorFunction` egal cu `IRP_MJ_INTERNAL_DEVICE_CONTROL` și următorul IRP din stivă va avea câmpul `Parameters.DeviceIoControl.IoControlCode` egal cu unul dintre `IOCTL_INTERNAL_USB_` alte coduri de funcții.

## 2.2.2 Soluția software

În scopul creșterii flexibilității dispozitivului de comunicație și de comandă s-a preferat încărcarea programului de guvernare a comunicației cu PC-ul și de comandă a motoarelor pas cu pas din calculator, în locul înscrierii într-o memorie nevolatilă locală. Această soluție, denumită în continuare *software uploading*, pe lângă avantajul clar din punct de vedere al flexibilității, permite renunțarea la folosirea locală a unei memorii nevolatice (cunoscute ca având latență ridicată) și înlocuirea acesteia cu o memorie RAM, mult mai rapidă, la care volatilitatea nu mai deranjează datorită folosirii acestei soluții. Se vor detalia problemele individuale legate de partea software a proiectului: *software uploading*, protocolul folosit, transferul de date, programarea temporizatoarelor, comanda propriu-zisă a motoarelor, corecția erorilor.

### 2.2.2.1 Software uploading

Aducerea programului din PC în RAM-ul intern al microcontrolerului se realizează de către hardware, în câteva etape. Inițial, PC-ul observă conectarea unui dispozitiv USB, care este identificat ca fiind un microcontroler EZ-USB. Se încarcă *driver*-ul corespunzător acestuia, care, la rândul său, inițializează transferul. Se trimite, astfel, programul respectiv către microcontroler, care îl stochează în memoria internă și îl lansează în execuție.

### 2.2.2.2 Protocolul folosit

Pentru transmiterea datelor specifice comenzii motoarelor s-a stabilit un protocol la nivel de aplicație. Astfel, pachetul de date trimise spre microcontroler va consta din grupuri de câte șase octeți, astfel:

- un octet pentru comanda motoarelor, cu biți corespunzători direcției și sensului de mișcare;

- trei octeți pentru numărul de pași făcuți în direcția respectivă, numărul maxim de pași fiind, deci, 16.777.216;
- doi octeți pentru întârzierea dorită între pași, putându-se, deci, obține o întârziere maximă de  $65.536 \times 0,5 \mu s = 32,7 \text{ ms}$ , suficientă pentru aplicație.

Aceste pachete vor fi scrise în două zone tampon din memoria RAM externă de pe placă. În timp ce se generează comenzi pentru motoare, conform datelor din una dintre zone, cealaltă zonă este actualizată în fundal, aducându-se pe USB date noi. Această actualizare se face prin întreruperi, în paralel cu generarea comenzilor.

PC-ul poate citi de la microcontroler informații de stare referitoare la zona tampon din care ia datele la momentul curent, precum și referitoare la starea limitatoarelor. Acestea semnalează faptul că a fost atinsă o margine și că motoarele trebuie oprite. De asemenea, PC-ul poate comanda în orice moment oprirea motoarelor.

### *2.2.2.3 Transferul de date*

Transferul de date se realizează atât prin întreruperi, cât și în vrac, în rutine corespunzătoare fiecărei conducte USB folosite. Se utilizează, astfel, o conductă pentru transferul de comenzi și de informații de stare și alte câteva conducte pentru datele propriu-zise. Se remarcă faptul că prioritatea întreruperii temporizatoarelor a fost stabilită la o valoare mai mare decât cea a întreruperilor USB. În consecință, generarea semnalelor de comandă nu va fi afectată de sosirea vreunui pachet de date pe USB, caz în care se va aștepta terminarea executării rutinei de comandă a motoarelor.

Se remarcă o particularitate a interfeței USB: dispozitivele nu pot avea niciodată inițiativa unui transfer. Astfel, microcontrolerul nu poate cere PC-ului un nou pachet de date. Este de datoria software-ului de PC (la nivel de aplicație) să verifice la anumite intervale de timp dacă microcontrolerul are nevoie de date noi și, dacă da, să le furnizeze. Aceste intervale sunt alese astfel încât, în majoritatea cazurilor, SMC-ul să aibă nevoie de date și, totodată, să nu se risipească un interval prea mare de timp de la terminarea execuției ultimei comenzi și momentul



interogării, evitându-se aglomerarea traficului pe USB. Acest lucru se realizează prin aproximarea timpului de execuție, necesar instrucțiunilor transmise. După terminarea execuției unui bloc de instrucții (moment identic cu momentul disponibilității SMC-ului de a primi date) se pornește un temporizator care va identifica momentul reinterogării SMC-ului.

#### 2.2.2.4 Programarea temporizatorului

Ținând seama de cerințele aplicației, s-a constatat că, pentru generarea întârzierilor necesare comandării celor minim trei motoare, este suficientă folosirea unui singur temporizator pe 16 biți. În perspectiva unei viitoare extinderi a aplicației, care ar putea implica generarea unor întârzieri mai mari, microcontrolerul ales oferă facilitatea folosirii unui temporizator pe mai mult de 16 biți, prin conectarea în cascadă a temporizatoarelor existente, pe 16 biți.

Temporizatorul folosit numără cu frecvența de 2 MHz, putând genera o întârziere minimă de 0,5  $\mu$ s și una maximă de 32,7 ms. Procesul numărării decurge astfel: se încarcă în temporizator o valoare inițială, apoi acesta se pornește printr-un bit dedicat. Valoarea înscrisă începe să se incrementeze cu frecvența precizată. La depășirea capacității temporizatorului (*overflow*), acesta generează o întrerupere. Temporizatorul este folosit la comanda motoarelor astfel: se încarcă cu valoarea corespunzătoare generării unei întreruperi după durata unui „simț“ (denumire improprie, provenită de la variabila din program, care definește valoarea minimă de timp a unui impuls de pas, pentru ca acesta să poată fi executat de către motor), apoi se pornește. Pe durata numărării, portul folosit la comanda motoarelor va indica nivel 1 logic motoarelor care lucrează la comanda curentă.

La apariția întreruperii, temporizatorul va fi reprogramat să genereze o nouă întrerupere după durata corespunzătoare întârzierii (nivelul coborât al semnalului transmis motoarelor). Portul dedicat comenzii motoarelor va fi programat acum să indice nivel 0 logic tuturor motoarelor. În continuare, pe măsură ce apar întreru-

perile, procesul se repetă de un număr de ori, corespunzător cu numărul de pași. După terminarea execuției pașilor unei comenzi, se trece la comanda următoare.

Precizia întârzierii este suficient de bună pentru aplicație, dar ea se poate, teoretic, îmbunătăți și mai mult, temporizatoarele având posibilitatea de a funcționa și la frecvența de 6 MHz, pentru o întârziere minimă de 0,167  $\mu$ s. Din nou se remarcă flexibilitatea soluției alese, ea putând fi ușor adaptată la noi cerințe ale aplicației.

#### *2.2.2.5 Corecția erorilor*

O problemă deosebit de importantă este cea a corecției erorilor apărute în cazul transmisiei datelor. Interfața USB se remarcă prin standardizarea corecției erorilor și includerea ei în hardware. Astfel, fiecare pachet transmis pe USB conține un cod CRC (*Cyclic Redundancy Check*), pentru a da receptorului posibilitatea de a verifica integritatea datelor primite. Dacă ele sunt corecte, receptorul răspunde cu ACK (*ACKnowledge*), iar dacă nu, răspunsul este NAK (*Not ACKnowledge*). Lipsa oricărui răspuns determină emițătorul să repete transmiterea pachetului, fapt care se întâmplă și în cazul răspunsului NAK. Astfel, se asigură transmiterea corectă a fiecărui pachet.

Trebuie tratată și situația în care răspunsul ACK sau NAK este el însuși corupt. În cazul lui NAK nu există nici o problemă, pachetul fiind oricum retransmis. Dar, în cazul unui ACK corupt, datorită faptului că receptorul așteaptă un următor pachet, iar emițătorul trimite din nou același pachet, există riscul ca același pachet transmis de două ori să fie considerat de receptor ca două pachete diferite de date. Pentru a preveni această situație, fiecare pachet are atașat un bit suplimentar de control. Acești biți alternează între 0 și 1 pentru pachete consecutive. Revenind la cazul pachetului corupt ACK, receptorul va deduce din acest bit de control că este vorba despre același pachet pe care deja îl primise corect și îl va ignora.

Pentru programator corecția este invizibilă, el primește datele corectate de către hardware. Faptul că un pachet sau altul a fost corupt și a trebuit să fie retransmis este irelevant pentru programator. Software-ul care rulează pe microcontroler nu trebuie să trateze în nici un fel această situație. Astfel, programele scrise sunt mai

simple și timpul de realizare al lor devine mai scurt. Se remarcă superioritatea interfeței USB față de alte interfețe, în acest caz.

Sursa primei versiuni a programului care rulează pe microcontroler, în limbaj de asamblare, este prezentată în Anexa 1. Programul a fost mult dezvoltat și modificat ulterior pe variante valabile pentru anumite tipuri de aplicații tehnologice. Datorită resurselor limitate de memorie, disponibile la nivelul microcontrolerului, se va încărca prin *software uploading* doar varianta corespunzătoare categoriei de aplicații avute în vedere.

## 2.3 Interfațarea dintre dispozitivul digital și motoarele pas cu pas

La acest nivel, semnalele logice de comandă sunt deja obținute, la momentele corespunzătoare de timp. Energia acestora este insuficientă pentru a alimenta înfășurările motoarelor de acționare. Din acest motiv, este necesară proiectarea unei interfețe electronice de putere, care să asigure adaptarea dintre semnalele de comandă și modul de aplicare a tensiunilor de alimentare a motoarelor.

Motoarele pas cu pas, avute în vedere la proiectarea prezentei aplicații din rațiunile expuse în capitolul întâi, cunosc o ofertă industrială deosebit de bogată și de diversă, fapt datorat, în principal, numărului uriaș de domenii de utilizare. Dacă sub aspect dinamic, la finele calculelor de proiectare a părții mecanice, a fost identificat ca satisfăcător motorul M092 al companiei Warner Electric, în acest capitol alegerea respectivă devine premisă de proiectare pentru interfața electronică de putere. Cu toate acestea, problema nu este atât de simplă pe cât pare, deoarece se cunosc multiple moduri de cablare, de comandă și de excitare a motoarelor pas cu pas, uneori chiar pentru același tip de motor. Însuși motorul ales, M092, poate fi cablat și comandat atât în regim unipolar, cât și în regim bipolar, acceptând excitații în una sau două faze, în pas întreg, în jumătate de pas, în

micropas sau în curent constant, astfel încât o sinteză teoretică a modurilor de funcționare a unui motor pas cu pas, de uz general, a fost necesară în scopul unei proiectări judicioase a interfeței electronice de putere.

Prin acest demers de proiectare s-a urmărit să se limiteze cât mai puțin posibilitățile de comandă ale motoarelor de acționare, astfel încât ele să corespundă unui număr cât mai mare de aplicații, atât curente, cât și avute în vedere pentru dezvoltări ulterioare. Ținând seama că este mai puțin costisitor și mai puțin cronofag a se face o îmbunătățire software decât una hardware, s-a urmărit ca selecția modului de excitație să se facă la acest nivel. Modul de cablare a rămas eminent hardware, neridicând probleme, iar în ceea ce privește modul de comandă a fost aleasă soluția bipolară, din rațiunile expuse în capitolul întâi. Avantajele și dezavantajele fiecărui aspect prezentat în sinteza teoretică vor fi discutate la fața locului.

Interfațarea cu motoarele se realizează cu ajutorul porturilor microcontrolerului. Prin porturi se trimite fiecăruia dintre motoare direcția și pasul, citindu-se, de asemenea, limitatoarele de cursă. Direcțiile se precizează în unul dintre cei șase octeți primiți într-un pachet de date. În același octet se precizează care dintre motoare vor fi pornite. Corespunzător acestor informații, în momentul când trebuie comandate motoarele, se trimit semnale 1 logic pe intrările de pas ale motoarelor vizate. Acest semnal trebuie ținut la 1 logic un anumit interval de timp (limitat inferior de necesitatea ca motorul să învingă toate forțele și cuplurile de inerție și să-și deplaseze rotorul spre perechea de poli, excitată în acel moment), după care va fi coborât la 0 logic.

### **2.3.1 Moduri de comandă**

Pentru atingerea performanțelor tehnologice impuse de prelucrările avute în vedere, se disting următoarele moduri de comandă:

- Comandă unipolară [79]: în acest caz, motorul are șase fire (a se vedea Anexa 5), schema de principiu fiind reprezentată în figura 2.8. Acest tip de

motor pas cu pas este foarte răspândit datorită simplității cu care se proiectează comanda acestuia [95], [104], [110].

- Comandă bipolară [79]: în acest caz, motorul are patru fire (a se vedea Anexa 5), schema de principiu fiind reprezentată în figura 2.9. La acest tip de motor pas cu pas, bobinele sunt utilizate mult mai eficient și se obține un cuplu mare relativ la dimensiunea motorului. După apariția circuitelor de comandă monolitice integrate, acest tip de motor a început să fie tot mai răspândit în aplicațiile industriale [95], [97].

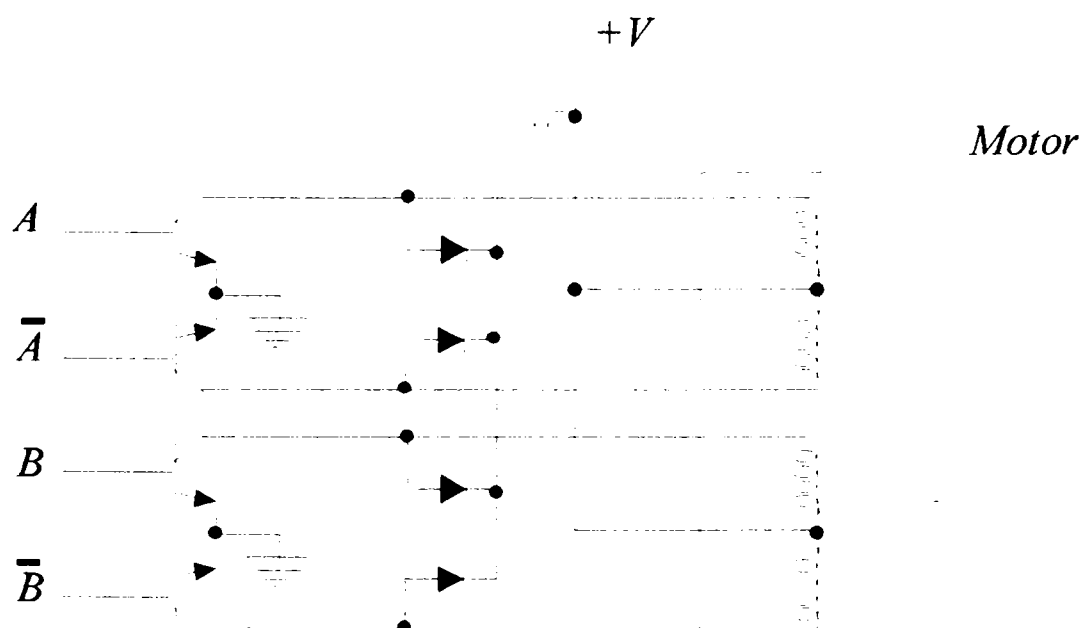


Fig. 2.8 Schema de principiu pentru comanda unipolară

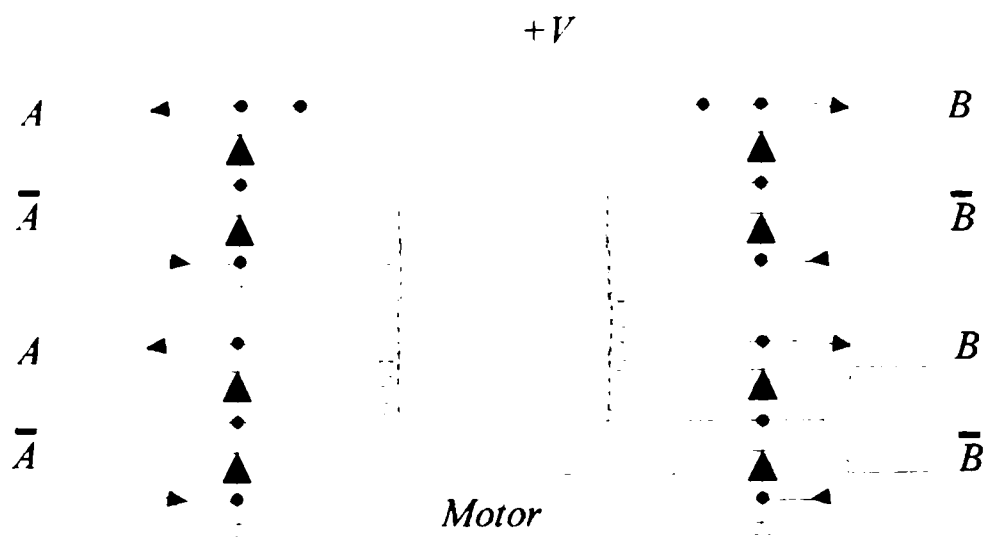


Fig. 2.9 Schema de principiu pentru comanda bipolară

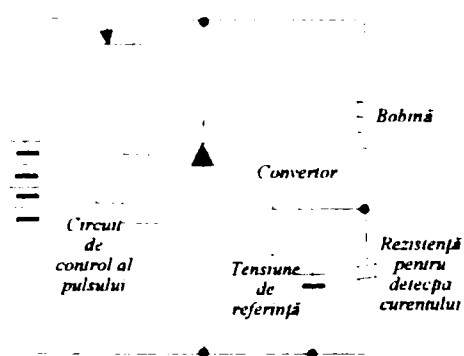


Fig. 2.10 Schema de principiu pentru comanda în comutație

— Comandă în comutație [79]: figura 2.10 prezintă schema de principiu a acestui tip de comandă a motoarelor pas cu pas. Comanda în comutație permite aplicarea unor tensiuni ridicate pe bobină, un curent mare de start și o pierdere mică de putere [104]. Perioada de comutare a curentului este determinată de următoarele moduri de excitație [96], [98]:

- a) auto-excitare: frecvența de pornire/oprire este dependentă de constanta de timp a bobinei;
- b) excitare separată: poate varia timpul de pornire pe parcursul perioadei de comutare a unui oscilator de referință cu frecvență ridicată.

Un exemplu de formă de undă tensiuni/curent este prezentat în figura 2.11.



Fig. 2.11 Exemplu de forme de undă

Se observă din [69] că la cablarea și comanda în mod unipolar cuplul dezvoltat este insuficient pentru a anula cuplul rezistent redus la arborele motorului. Pe de altă parte, comanda în comutație, în ciuda avantajelor prezentate mai sus, este mult prea costisitoare (și prea zgomotoasă din punct de vedere al compatibilității electromagnetice) față de avantajele aduse. Dintre acestea, unele nici nu sunt necesare scopului propus, așa că și această soluție de comandă a fost eliminată. În concluzie, a fost aleasă varianta comenzii bipolare, care oferă cuplul activ necesar, această alegere fiind transmisă mai departe ca premisă de proiectare.

### 2.3.2 Moduri de excitare

Motoarele pas cu pas prezintă următoarele moduri de excitare:

- Excitare într-o singură fază [79], [99]: o singură fază este excitată la un moment dat, iar consumul de putere este mic. În figura 2.12 este descrisă secvența de excitație caracteristică acestui mod.
- Excitare în două faze [79]: la un moment dat sunt excitate două faze, deci se consumă de două ori mai multă putere decât în cazul metodei anterioare. Cuplul de ieșire este mare, iar oscilațiile de amortizare sunt mici. Acest mod de excitație este cel mai răspândit. Figura 2.13 prezintă secvența de excitație caracteristică acestui mod.



Fig. 2.12 Excitație într-o singură fază

- Excitare în jumătate de pas [79], [99]: alternează cele două moduri de excitație prezentate anterior. Metoda consumă de 1,5 ori mai multă putere decât în cazul excitației într-o singură fază. Unghiul pasului este egal cu jumătate din valoarea pe care o are în cazul excitației într-o singură fază. În figura 2.14 este descrisă secvența de excitație folosită în acest mod.
- Excitare în micropas [79], [99]: facilitează obținerea unor unghiuri foarte fine folosind controlul curentului. Valoarea unghiului pasului este egală cu jumătate din valoarea de la metoda precedentă și cu o pătrime față de metoda de excitație în două faze. Acest mod de excitație este folosit pentru



obținerea unor pași cât mai fini sau a unei rotații cât mai line. Figura 2.15 prezintă secvența de excitare pentru acest caz.



Fig. 2.13 Excitare în două faze

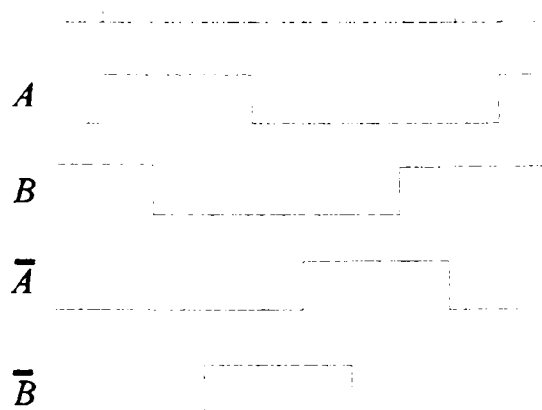


Fig. 2.14 Excitare în jumătate de pas

Fiecare dintre modurile de excitare evidențiate mai sus își dovedește utilitatea în situații întâlnite la prelucrarea implantelor metalice cranio-maxilo-faciale. De

exemplu, excitarea într-o singură fază, fiind economică, dar de cuplu scăzut, este utilă la deplasarea sculei în gol sau în materiale cu duritate deosebit de scăzută (materiale plastice biodegradabile, biopolimeri etc.) Comanda în două faze oferă un cuplu mai mult decât suficient, eliminând o parte dintre problemele legate de oscilațiile de amortizare și de rezonanța acestora. Față de aceste prime două metode, comanda în jumătate de pas dublează rezoluția, dar are un consum variabil de curent, prezentând, implicit, variații de cuplu. Comanda în micropași multiplică rezoluția fără a fi necesară schimbarea motorului, reducând la minimum zgomotul produs de oscilațiile de amortizare, dar complică interfața electronică de putere.

A

B

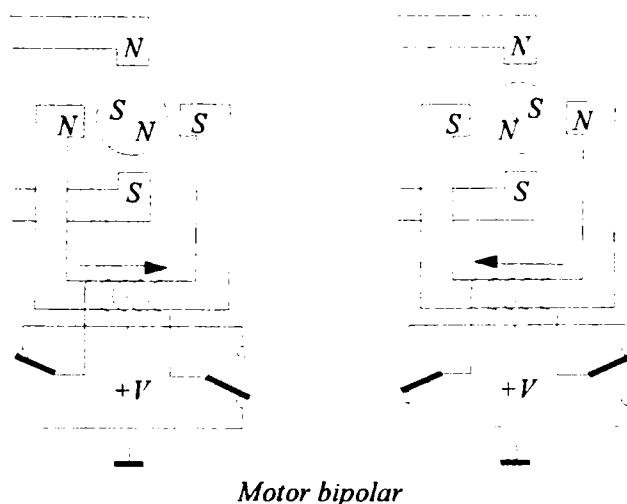
Fig. 2.15 Excitare în micropas

Comanda în două faze s-a dovedit utilă pentru prelucrarea tablei de oțel inoxidabil de grosime de până la 1,2 mm, rezoluția fiind și ea acceptabilă în raport cu tipul prelucrării. Acest lucru a fost confirmat de studiile metalografice macroscopice și microstructurale, prezentate la sfârșitul capitolului întâi. În implementarea prezentă, comanda în micropas încă nu este posibilă, dar este în mod sigur necesară, deoarece încercarea de a obține implante din titan s-a soldat cu un eșec, chiar și la comanda în jumătate de pas (figura 4.12). Cauza eșecului se regăsește într-un complex de împrejurări nefavorabile. Mașina, neavând instalație de răcire cu emulsie în jet continuu și facând pași prea mari comparativ cu posibilitățile de așchiere ale sculei, încerca la fiecare pas să dizloce o cantitate prea mare de material într-o unitate prea mică de timp (de la un pas la altul consecutiv deplasarea se face brusc), iar căldura degajată producea modificări structurale, atât ale materia-

lului, cât și ale sculei. Ca urmare, după două treceri (din trei) prin tabla de titan de 1,2 mm grosime, freza s-a rupt. Astfel, comanda în micropas s-a constituit într-un obiectiv important al cercetărilor viitoare.

### 2.3.3 Unipolar vs. bipolar

Un motor pas cu pas se mișcă cu câte un pas atunci când direcția curentului care curge prin bobine se schimbă, inversând câmpul magnetic al polilor statorului. Diferența dintre motoarele unipolare și cele bipolare constă în modul în care se realizează această inversare. Motoarele bipolare au o singură bobină de câmp și două comutatoare de încărcare, ce comută în direcții diferite (Figura 2.16) [57]. Motoarele unipolare au două bobine de câmp separate și un singur comutator de încărcare [109] (figura 2.17) [57].



**Fig. 2.16** Inversarea câmpului magnetic al polilor statorului în cazul motoarelor bipolare

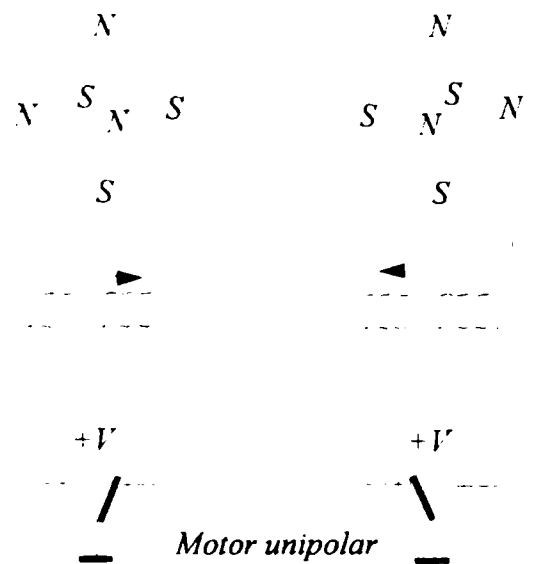


Fig. 2.17 Inversarea câmpului magnetic al polilor statorului în cazul motoarelor unipolare

Avantajul circuitului bipolar constă în faptul că există o singură înfășurare cu un factor de compresie bun (rezistivitate mică), însă cele două comutatoare impun folosirea a mai multor semiconductoare. Spre deosebire, circuitul unipolar necesită doar un comutator, însă marele dezavantaj îl reprezintă cele două înfășurări care semnifică o rezistivitate mult mai mare [100], [107]. Cuplul motorului pas cu pas este proporțional cu intensitatea câmpului magnetic dezvoltat de spirele de pe stator și poate fi crescut prin adăugarea de noi spire sau prin mărirea curentului. Limita naturală care se opune creșterii curentului constă în pericolul saturării miezului de fier [102]. O problemă și mai mare este încălzirea motorului datorită pierderii de putere în spirele statorului. Curentul prin spire poate fi crescut cu factorul  $\sqrt{2}$ , iar această creștere are un efect direct proporțional asupra cuplului. La limita de pierdere în putere, motoarele bipolare generează un cuplu cu 40% mai mare decât motoarele unipolare construite din același cadru (figura 2.18) [57].

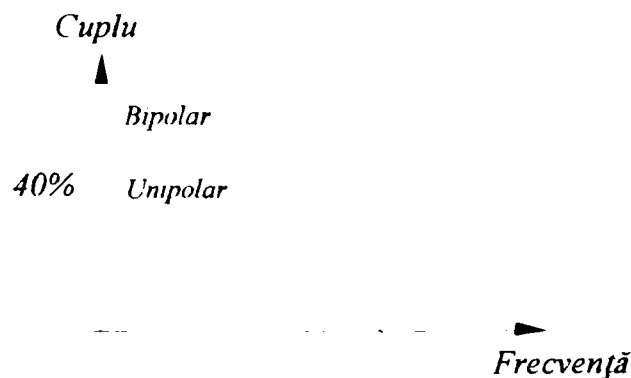


Fig. 2.18 Cuplul generat de motoare unipolare vs. bipolare

Dacă nu este necesar un cuplu mai mare, atunci se poate reduce fie dimensiunea motorului, fie pierderea de putere. În acest caz, alegerea a fost simplă, deoarece, pentru motorul M092, comanda unipolară nu genera un cuplu suficient pentru a anula și a depăși cuplul rezistent redus la arborele său.

### 2.3.4 Comanda în curent constant

Pentru a menține pierderea de putere a motorului pas cu pas între limite rezonabile, trebuie controlată intensitatea curentului prin spire. O soluție simplă și populară constă în a oferi atâta tensiune cât este necesară, utilizând rezistența  $R_L$  a înfășurării pentru limitarea curentului (figura 2.19a) [57].

O soluție mult mai complicată, dar mult mai eficientă și mai precisă, presupune includerea unui generator de curent (figura 2.19b) [57] pentru a obține independență față de rezistența înfășurării. Sursa de tensiune din figura 2.19b) trebuie să fie mai mare decât cea din figura 2.19a).

Pentru a obține un cuplu mare la viteze ridicate este necesar un generator de curent, așa ca în figura 2.19b). Acesta limitează doar faza curentului și devine activ doar în momentul în care curentul prin bobină își atinge valoarea nominală.

Peste această valoare generatorul de curent este în saturație, iar sursa de tensiune este aplicată direct la înfășurare, [42]. Figura 2.20 [57] prezintă relația, tipică pentru un motor pas cu pas, dintre cuplu și viteză. Este evident că puterea crește pe măsură ce crește cuplul.

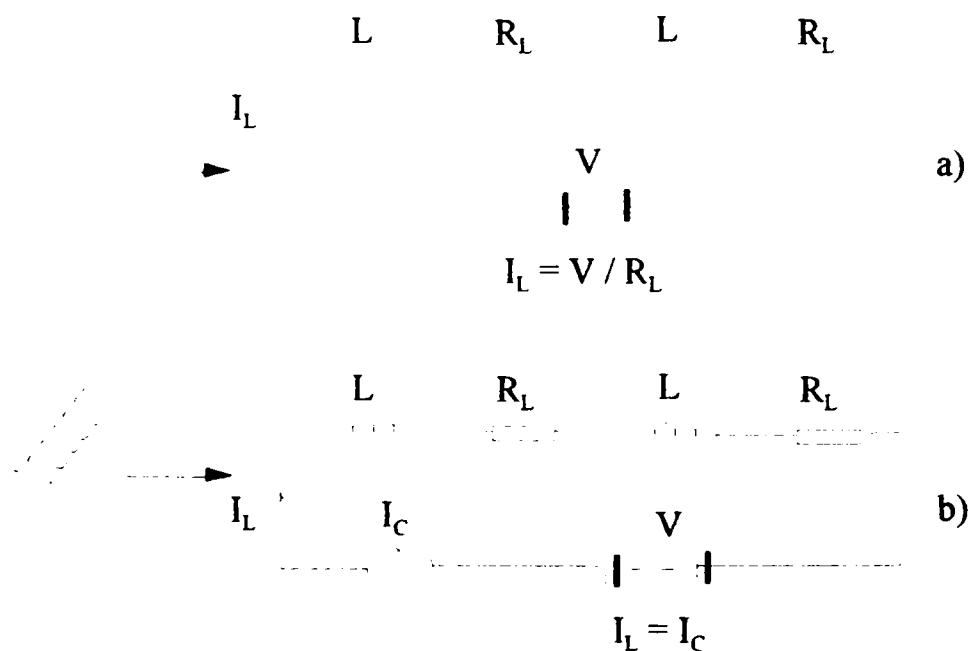


Fig. 2.19 Metode de limitare a curentului

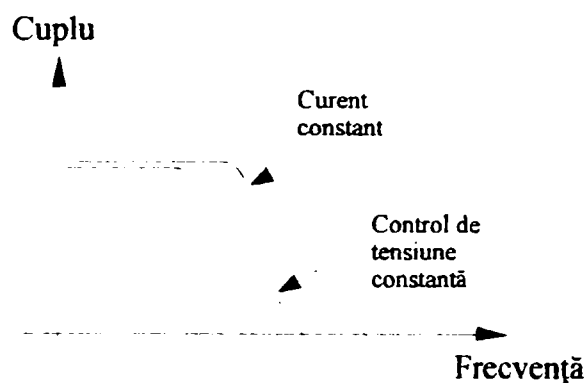


Fig. 2.20 Relația cuplu/frecvență tipică pentru motoarele pas cu pas

Generatorul de curent, combinat cu sursa de tensiune ridicată, garantează că rata de schimbare a sensului curentului prin înfășurări este suficient de mare. În stare staționară sau la număr mic de rotații, pierderea de putere în generatorul de curent crește foarte mult, deși motorul nu generează mai multă energie. Se spune că factorul eficiență este foarte slab în acest caz. Pentru îmbunătățirea acestui factor se folosește un comutator pentru reglarea curentului, așa cum se vede în figura 2.21.

Înfășurarea unei faze este comutată la sursa de tensiune înainte ca valoarea curentului, măsurat pe rezistența  $R_s$ , să atingă valoarea nominală. În acel moment, comutatorul, care a fost conectat la  $+V$ , își schimbă poziția și scurtcircuitază bobina. În acest fel, curentul este înmagazinat, dar va scădea datorită pierderilor interne ale bobinei. Pe parcursul acestei faze, timpul de descărcare a curentului este determinat de către un monostabil sau de un oscilator în puls. După acest timp, unul dintre poli se va schimba determinând trecerea comutatoarelor înapoi la  $+V$ , iar ciclul va porni din nou.

Deoarece, folosind această tehnică, singurele pierderi sunt cele în saturație ale comutatorului și ale rezistenței bobinei, eficiența totală este foarte mare [57].

Această comandă atrage, în special, sub aspectul creșterii cuplului la turații ridicate ale motorului pas cu pas, adică exact acolo unde acest tip de motoare își etalează principalul dezavantaj. Din păcate, ameliorarea acestui parametru necesită interfețe complicate și costisitoare, iar experimentele făcute au arătat că, în buclă deschisă, precizia are de suferit inadmisibil de mult. Ținând seama și de faptul că la execuția implantelor metalice nu sunt necesare viteze mari de deplasare, acest mod de comandă a fost trecut pe lista unor eforturi viitoare de proiectare.

### 2.3.5 Posibile îmbunătățiri ale circuitelor unipolare

Nu ar avea nici un sens să se aplice principiul anterior unui circuit unipolar, deoarece ar fi necesare două comutatoare suplimentare pe fiecare fază pentru a scurtcircuita bobinele și, astfel, numărul de componente ar fi identic cu cel de la circuitul bipolar. O îmbunătățire rezonabilă pentru circuitul unipolar este comanda

în dublu nivel (*Bi-Level-Drive*) (figura 2.22) [57]. Acest principiu presupune folosirea a două surse de tensiune. La fiecare pas nou al motorului, ambele bobine sunt conectate, pentru o scurtă perioadă de timp, la o sursă de tensiune ridicată. Acest lucru determină o creștere considerabilă a curentului la comutare, iar comportamentul lui corespunde, mai mult sau mai puțin, principiului de stabilizare a puterii. După o perioadă determinată, comutatoarele se deschid și va fi conectată la bobine, prin intermediul unei diode, o sursă de tensiune scăzută [106].

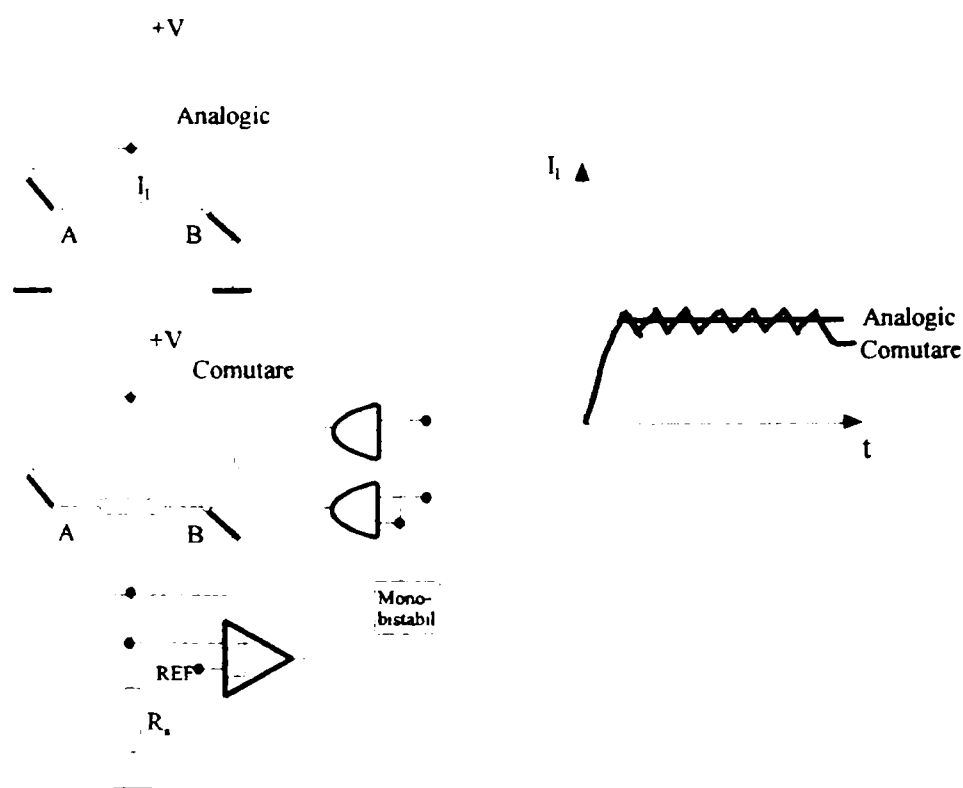


Fig. 2.21 Îmbunătățirea factorului eficiență

Această soluție este prezentată doar teoretic, deoarece ar fi viabilă doar în cazul trasării unor segmente relativ lungi. În practică, însă, prezența unui monostabil de comandă (care generează întâzieri fixe) în conjuncție cu necesitatea execuției unor segmente de lungime variabilă ar putea genera conflicte. Dacă, însă, comanda comutatoarelor s-ar face cu un semnal logic, schema s-ar preta pentru implemen-



tarea comenzii în jumătate de pas cu creștere de curent, ceea ce ar ameliora dezavantajul cuplului variabil constat la acest tip de excitație, detaliat în subparagraful următor. Dat fiind sporul sensibil de performanță raportat la costurile mici ale implementării, acest deziderat s-a constituit într-o cerință de proiectare pentru viitorul apropiat.

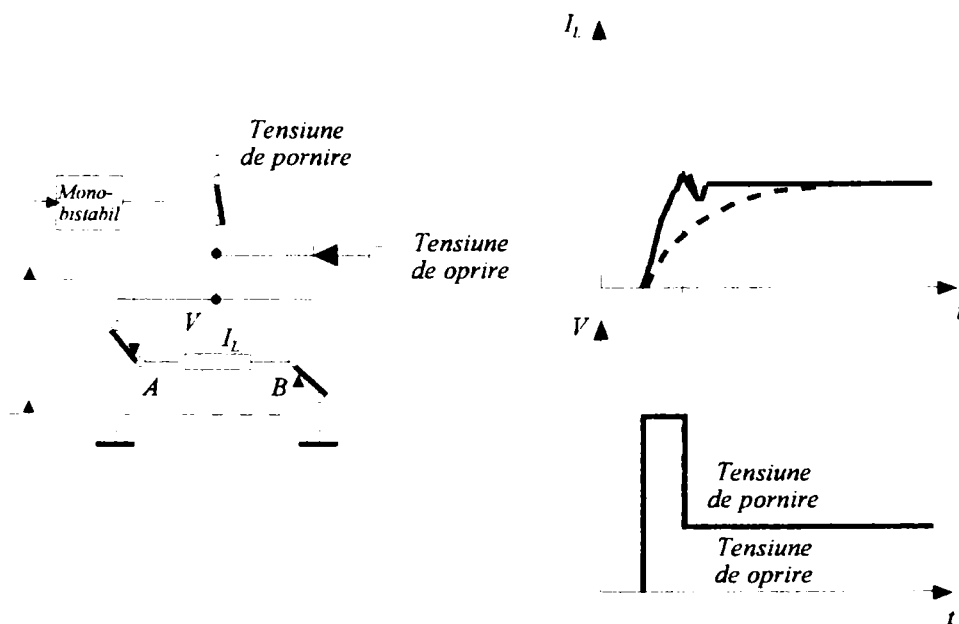


Fig. 2.22 Comanda în dublu nivel a motoarelor unipolare

### 2.3.6 Avantaje și dezavantaje ale comenzii în jumătate de pas

Avantajul major al motoarelor pas cu pas care operează în regim de jumătate de pas constă în dublarea rezoluției poziționării. În cazul unui motor cu  $3,6^\circ$  pe pas, vor fi  $1,8^\circ$  pe pas, adică 200 de pași pe rotație. Acesta, însă, nu este singurul motiv pentru care se apelează la comanda în jumătate de pas. Uneori, ea este necesară în cazul în care operația este afectată de vibrațiile motorului [Www40]. Acestea pot

fi atât de pronunțate încât, pentru anumite domenii de frecvență a pașilor, motorul să nu mai aibă cuplu și să își piardă complet poziția (figura 2.23) [57], deoarece, rotorul motorului și câmpul magnetic schimbător al statorului formează un sistem elastic de mase, care poate fi stimulat să vibreze. În practică, sarcina ar putea să amortizeze acest sistem dacă forța de fricțiune ar fi suficient de mare.

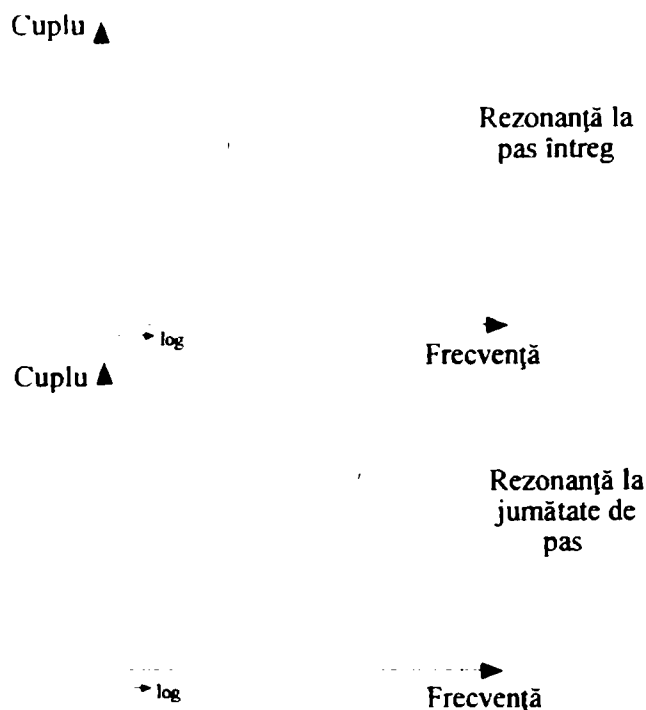


Fig. 2.23 Caracteristici cuplu/frecvență a pașilor

În cele mai multe cazuri, folosirea comenzii pe jumătate de pas ajută, deoarece cursa parcursă de rotor se înjumătățește, iar sistemul este mai puțin stimulat. Cu toate acestea, soluția nu este foarte răspândită datorită câtorva dezavantaje [111]:

- motorul cu jumătate de pas necesită de două ori mai multe pulsuri de ceas, frecvența fiind, deci, de două ori mai mare decât a motorului cu pas întreg;
- în poziția jumătate de pas, motorul are doar jumătate din cuplul pe care îl are în cazul pasului întreg.

Pierderea dinamică este cu atât mai mare cu cât momentul sarcinii se apropie de cuplul limită al motorului. Efectul scade pe măsură ce crește numărul de rotații.

Pierderea de cuplu din cazul funcționării în jumătate de pas este foarte dezavantajoasă. Dacă din acest motiv se va alege un motor mai mare, acest lucru va influența semnificativ costul final al întregului sistem.

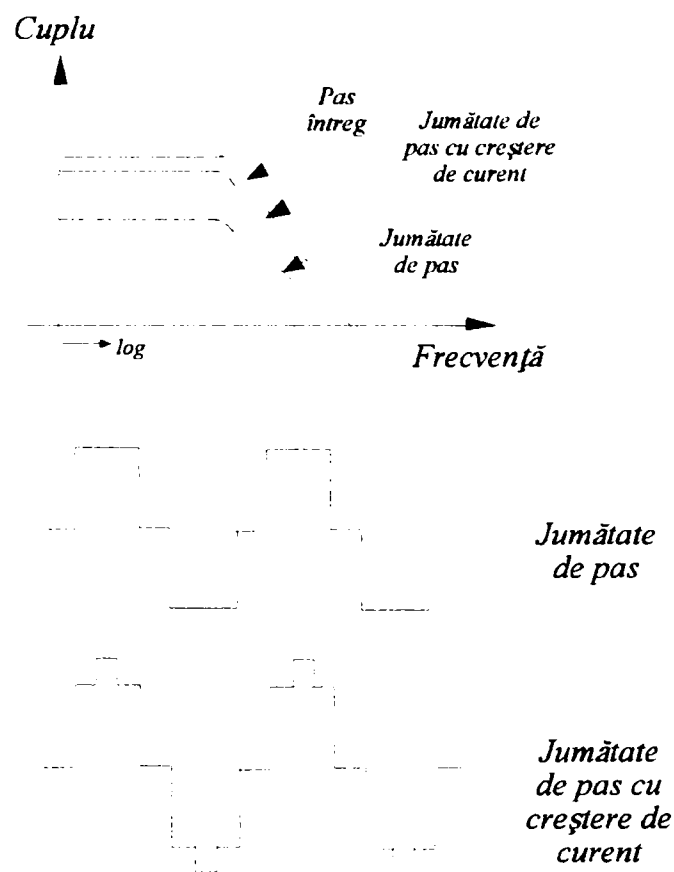


Fig. 2.24 Caracteristici cuplu/frecvență și curentul unei faze

Soluția pentru această situație constă în compensarea scăderii cuplului prin creșterea curentului prin bobine cu factorul  $\sqrt{2}$ , în faza bobinei care rămâne activă. Acest factor de creștere a curentului dublează puterea de dispersie a fazei active. Puterea totală disipată este egală cu puterea disipată în funcționarea în pas întreg, deoarece faza inactivă nu disipă putere. Cuplul rezultat în urma folosirii acestei soluții este de 90% din cuplul obținut în cazul funcționării în pas întreg. Singurul lucru care trebuie evitat este oprirea motorului la atingerea valorii limită a curentului în poziția jumătate de pas. Figura 2.24 prezintă variația curentului unei faze a motorului pas cu pas, funcționând în modul jumătate de pas, cu și fără creștere de curent, precum și caracteristicile cuplu/frecvență a pasului pentru fiecare situație [111]. Oportunitatea aplicării acestei soluții a fost discutată la finele subparagrafului anterior.

### **2.3.7 Semnale de comandă generate electronic**

Parcurgând concluziile prezentării teoretice anterioare, au fost sintetizate necesitățile de proiectare ale etajului final, de putere, al interfeței electronice de comandă a motoarelor. Pentru a executa pași într-o anumită direcție, însă, motoarele pășitoare, pe lângă adoptarea unui mod de cablare și, respectiv, de excitație, au nevoie de o anumită secvență de aplicare a excitațiilor. Deoarece s-a stabilit, pe parcursul proiectării, că la interfața dintre echipamentul logic și cel de putere apar doar două semnale (de direcție și, respectiv, de pas), este evidentă necesitatea proiectării unui circuit care să genereze, pe baza semnalelor logice amintite, secvența necesară de excitație a înfășurărilor motoarelor pas cu pas.

Evident că, și în acest caz, proiectarea începe obligatoriu cu consultarea cataloagelor marilor furnizori, în căutarea unor soluții consacrate și fiabile. În cataloagele firmei SGS-Thompson se poate constata prezența unei perechi de circuite ale căror caracteristici electrice corespund necesităților de comandă identificate în lanțul de proiectare analizat până acum. Primul dintre ele, L297, se ocupă de generarea secvenței de comandă a înfășurărilor motorului pășitor, fiind tratat în cele ce urmează. Cel de al doilea, L298N, amplifică semnalele corespunzătoare fazelor până la nivelul cerut de motor, fiind tratat în subparagraful următor. Evident că,

la fel ca în cazul oricărei soluții industriale mature, soluția este fiabilizată prin implementarea unor circuite de protecție.

Pentru a putea funcționa, un motor pas cu pas are nevoie de semnale de comutație pentru câteva comenzi separate, dar nu independente. În 95% dintre aplicațiile de astăzi, cel care generează aceste comenzi digitale este un sistem cu microprocesor. În cea mai simplă formă a sa, comanda cu pas întreg necesită doar două semnale rectangulare în cuadratură. Dependent de faza care este activă, motorul se rotește în sensul acelor de ceasornic sau în sens invers, iar viteza de rotație este proporțională cu frecvența semnalului de tact. Situația se complică, însă, pentru comanda cu jumătate de pas. Sunt necesare patru semnale de control, iar în anumite condiții particulare, chiar șase. Figura 2.25 [57] prezintă relația dintre forma de undă a curentului unei faze și semnalele de control pentru pas întreg și jumătate de pas.

De vreme ce toate semnalele din fiecare mod sunt în relații bine stabilite unele cu altele, este posibilă generarea lor folosind logică standard. Dacă se dorește să existe posibilitatea de a alege între pas întreg și jumătate de pas, o implementare logică bună devine destul de costisitoare, recomandabil, în acest caz, fiind un circuit integrat cu funcție specifică. Circuitul L294 integrează toate circuitele de control necesare pentru a comanda motoare pas cu pas unipolare și bipolare. În combinație cu un circuit de comandă dual port, cum este L298N, formează o interfață completă între microprocesor și motorul pas cu pas [80].

Acest circuit integrat primește semnale de control de la controlerul unui sistem, de regulă un microcalculator, și generează toate semnalele de comandă necesare. Mai conține și două circuite de comutare PWM necesare pentru reglarea curentului în bobinele motorului. Circuitul L297 în combinație cu un circuit de comandă prezintă numeroase avantaje:

- sunt necesare foarte puține componente, astfel încât costurile de asamblare sunt mici, fiabilitatea ridicată și spațiul necesar redus;
- software-ul necesar este simplificat, iar încărcarea sistemului este redusă.

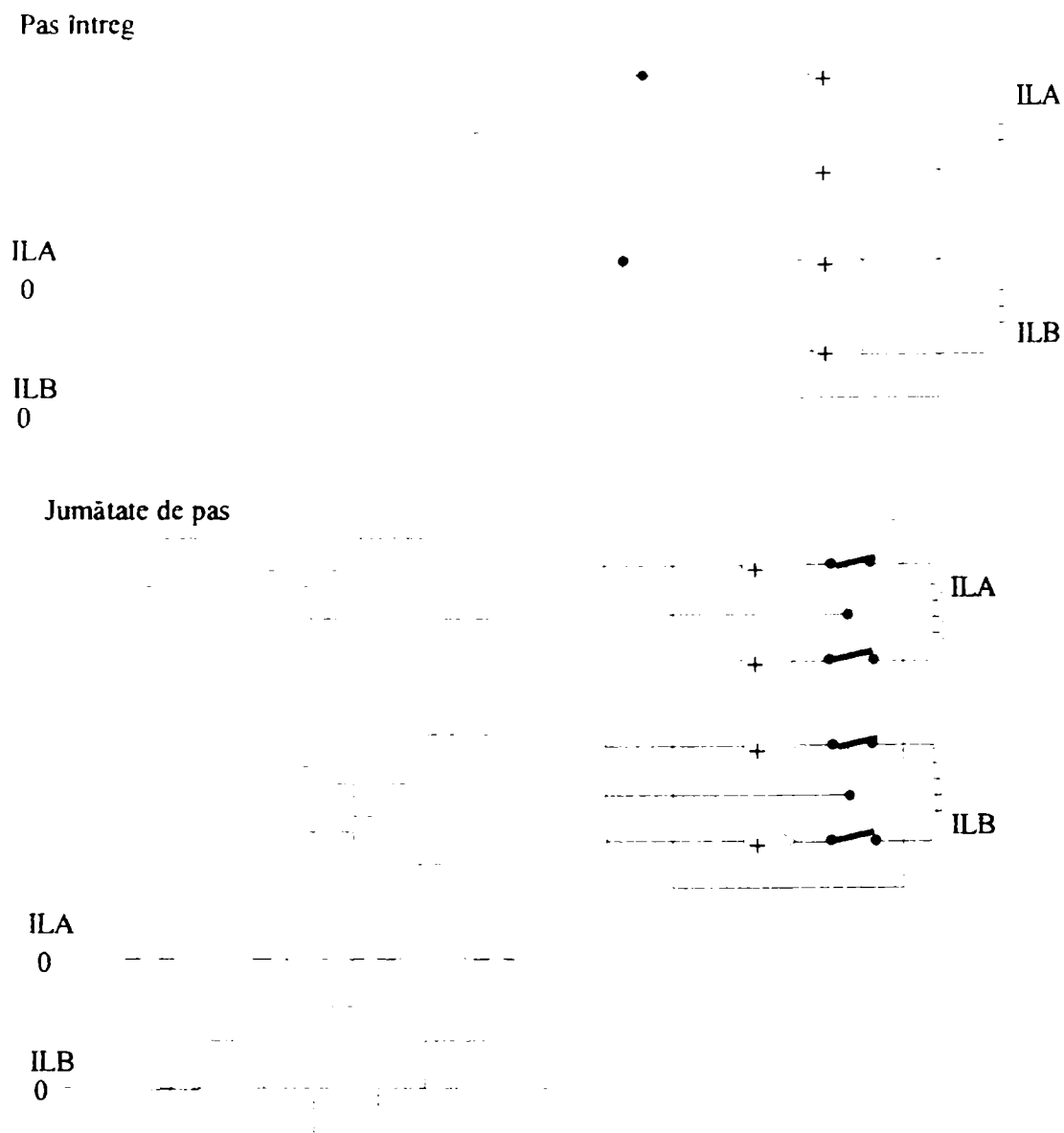


Fig. 2.25 Relația dintre forma de undă a curentului unei faze și semnalele de control pentru pas întreg și jumătate de pas

Pentru a putea funcționa, motoarele pas cu pas au nevoie de patru semnale de control [57]:

$\overline{CLOCK}$  — semnalul de tact pe baza căruia se efectuează pașii;

$\overline{RESET}$  — activarea acestuia are ca efect aducerea semnalelor de pe nivelul final la valori predefinite, de pornire;

$DIRECTION$  — determină sensul de rotație al axelor motorului;

$HALF/FULL$  — decide modul de funcționare al motorului (pas întreg sau jumătate de pas).

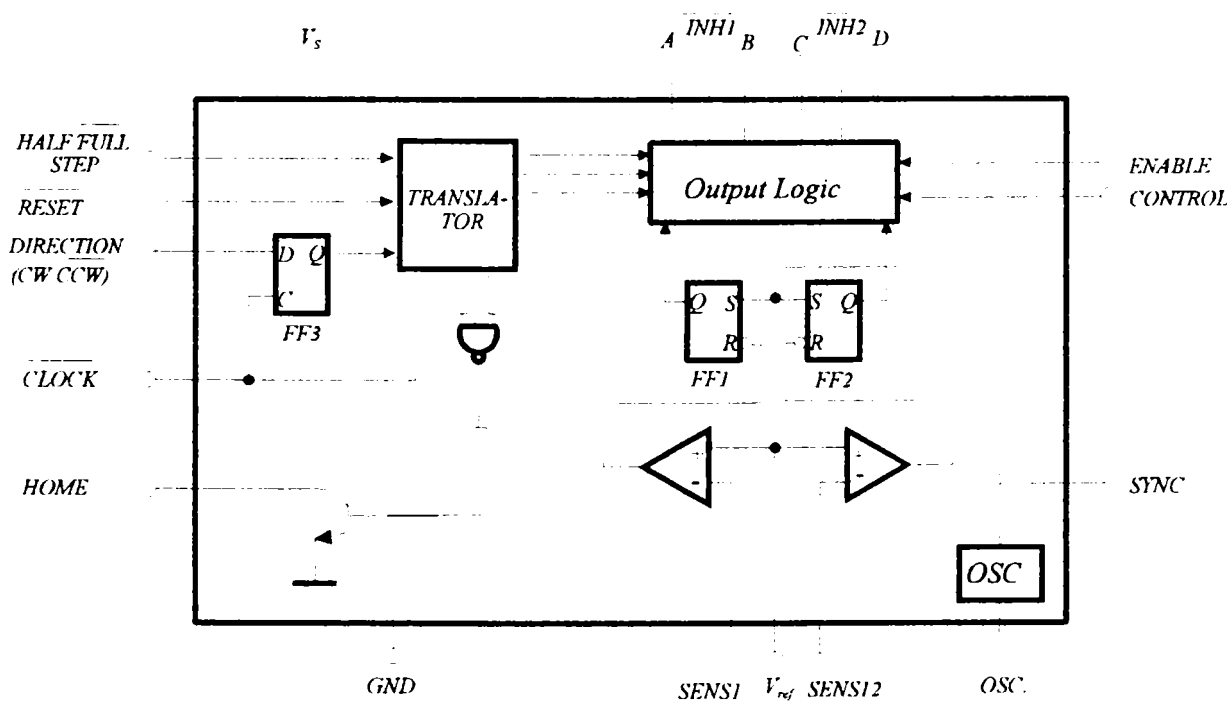


Fig. 2.26 Schema bloc a circuitului L297

Observație: — o prezentare completă a funcțiilor pinilor, precum și semnificația pinilor după încapsulare se găsesc în Anexa 2.

Inima circuitului L297, a cărei schemă bloc este prezentată în figura 2.26 [80], [81], este constituită de blocul numit translator, care generează secvențele pentru comanda fazelor, necesare pentru funcționarea motorului (indiferent de modul ales). Acest bloc este controlat de două semnale de intrare — direcția ( $CW/CCW$ )

și modul de funcționare ( $HALF/\overline{FULL}$ ) și de un semnal de tact care permite translatorului să avanseze de la un pas la altul.

Translatorul generează patru ieșiri care vor fi procesate, mai departe, de către blocul cu ieșiri logice, bloc care implementează funcțiile de inhibare și de comutare. Intern, translatorul este alcătuit dintr-un numărător pe trei biți și o parte combinațională care generează o secvență de opt coduri adiacente, așa cum se vede în figura 2.27 [80].

Toate cele trei secvențe de comandă (jumătate de pas, o fază pas întreg, două faze pas întreg) pot fi generate foarte ușor pornind de la această secvență principală. Această secvență de stare corespunde modului jumătate de pas, selectat cu valoare logică ridicată pe intrarea  $HALF/\overline{FULL}$ . Formele de undă pentru această secvență sunt prezentate în figura 2.28 [80], [81].

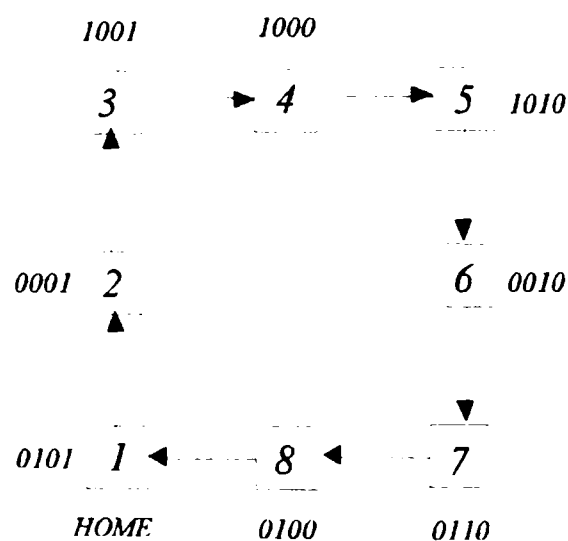


Fig. 2.27 Generarea secvenței de opt coduri adiacente



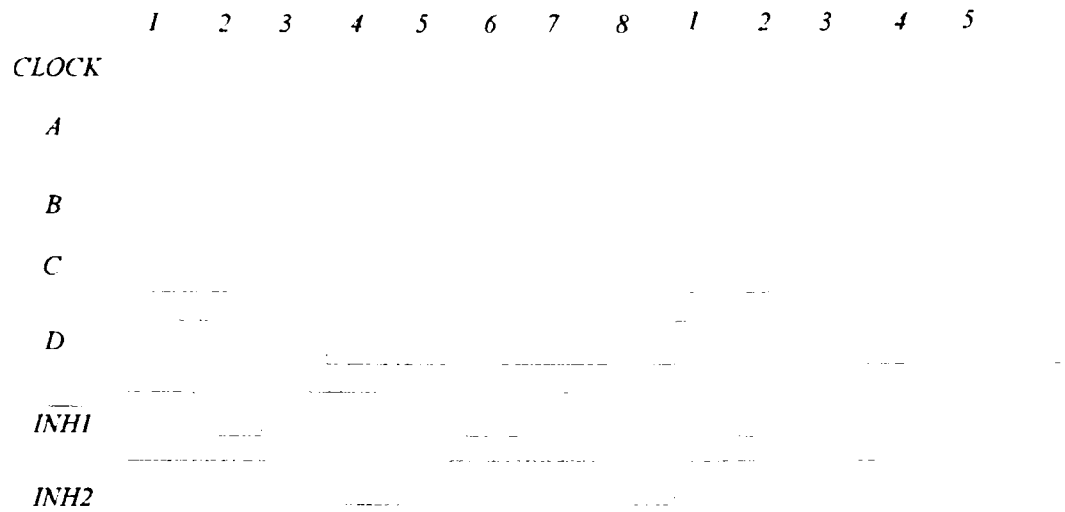


Fig. 2.28 Formele de undă pentru secvența de stare din figura 2.27

În figura 2.27 au fost generate două semnale noi,  $\overline{INH1}$  și  $\overline{INH2}$ , despre care se vor da mai multe detalii în paragrafele următoare. Ambele moduri cu pas întreg se obțin prin sărirea stărilor alternative în secvențe de opt pași. Acest lucru se materializează prin faptul că impulsul de tact ocolește primul nivel al număratorului pe trei biți din translator.

Cel mai puțin semnificativ bit al acestui numărător nu este afectat, motiv pentru care secvanța generată depinde doar de starea translatorului când modul pas întreg este selectat (semnalul de intrare  $HALF/\overline{FULL}$  este pe zero).

Dacă modul de funcționare în pas întreg este selectat când translatorul se află într-o stare impară, va fi generată secvența în două faze prezentată în figura 2.29 [80], [81].

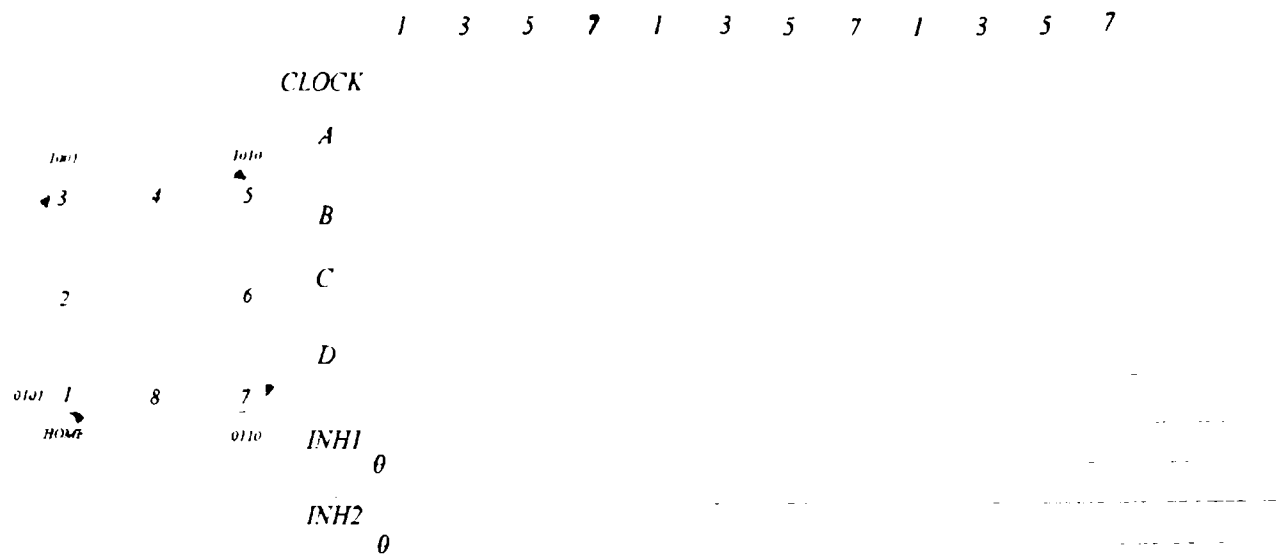


Fig. 2.29 Secvență generată când translatorul se află într-o stare impară la alegerea modului de lucru

Funcționarea monofazică în pas întreg se obține prin selecția modului de funcționare în pas întreg când translatorul e într-o stare pară (figura 2.30 [80], [81]).

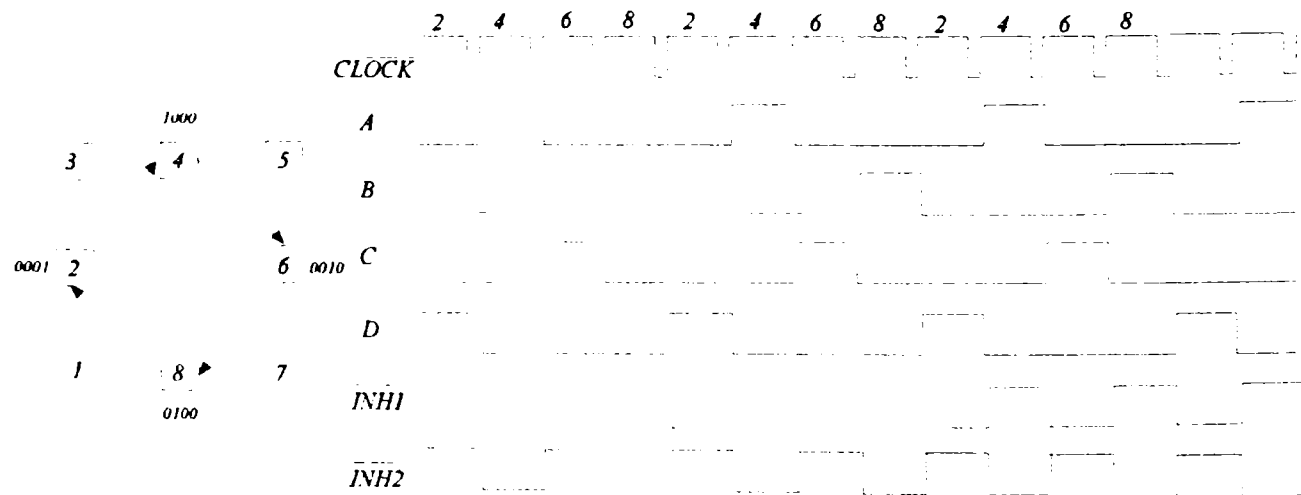


Fig. 2.30 Secvență generată când translatorul se află într-o stare pară la alegerea modului de funcționare

2.3.7.1 Semnificația semnalelor  $\overline{INH1}$  și  $\overline{INH2}$

În modurile de lucru în jumătate de pas și în pas întreg într-o singură fază sunt generate două semnale suplimentare,  $\overline{INH1}$  și  $\overline{INH2}$ . Acestea sunt semnale de inhibare care sunt cuplate la intrările de validare ale circuitului de comandă a motorului (cum este L298N) și servesc la diminuarea curentului când o înfășurare este oprită. Datorită faptului că în modul de comandă în pas întreg în două faze ambele înfășurări sunt alimentate în mod continuu, nu este necesară generarea acestor semnale.

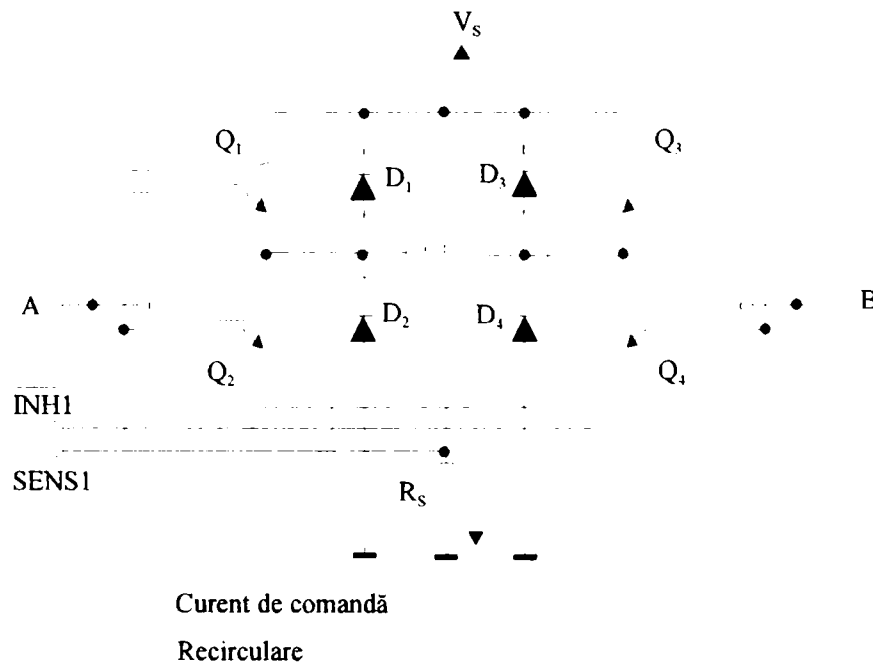


Fig. 2.31 Rolul semnalelor  $\overline{INH1}$  și  $\overline{INH2}$

Pentru a sublinia rolul acestor semnale, figura 2.31 [80] prezintă o jumătate a circuitului L298N conectat la prima fază a unui motor bipolar în două faze. Intrările  $A$  și  $B$  ale acestui circuit determină tranzistorul care va fi activ în fiecare din cele două perechi simetrice. Pe de altă parte, intrarea  $\overline{INH1}$  inhibă toate cele

patru tranzistoare. Se presupune că la intrarea  $A$  se aplică nivel de tensiune ridicat, iar la intrarea  $B$ , nivel de tensiune scăzut, caz în care, curentul se scurge prin  $Q_1$ ,  $Q_4$  și înfășurarea motorului. Dacă în acest moment, la  $A$  se aplică nivel scăzut de tensiune, curentul va recircula prin  $D_2$ ,  $Q_4$  și  $R_S$ , având ca efect o ușoară scădere a valorii sale și o creștere a pierderilor pe  $R_S$ . Dacă, însă, o dată cu aplicarea unui nivel redus de tensiune la  $A$  se activează și intrarea  $\overline{INH1}$ , toate cele patru tranzistoare vor fi inhibate.

În acest caz, curentul va recircula de la masă spre  $V_S$  prin  $D_2$  și  $D_3$ , determinând o atenuare rapidă și care să permită o funcționare rapidă a motorului. De asemenea, deoarece curentul de recirculare nu trece prin  $R_S$ , este posibilă folosirea unui rezistor mai puțin costisitor. Situația este identică și în cazul celei de-a doua înfășurări, celeilalte jumătăți a circuitului L298N și a semnalelor  $C$ ,  $D$  și  $\overline{INH2}$ . Semnalele  $\overline{INH1}$  și  $\overline{INH2}$  sunt generate pe baza unor funcții OR:

$$A + B = \overline{INH1}$$

$$C + D = \overline{INH2}$$

Unul dintre semnalele de intrare la blocul translator este semnalul  $\overline{RESET}$ , al cărui rol este de a aduce blocul translator la poziția gazdă (starea 1,  $ABCD = 0101$ ). Ieșirea  $HOME$  semnalizează această stare de fapt. Conectat la blocul care implementează logica de ieșire, semnalul  $ENABLE$  este folosit pentru a dezactiva comanda motorului când sistemul este inițializat. Valoare scăzută de tensiune pe acest semnal are ca efect activarea semnalelor  $\overline{INH1}$  și  $\overline{INH2}$ .

### 2.3.7.2 Reglarea curentului de sarcină

Pentru a obține caracteristici satisfăcătoare ale vitezei și cuplului, este esențială existența unei metode de control a curentului de sarcină. Câteva dintre acestea sunt: comutarea între două surse de tensiune, modularea în comutație a ratei

pulsului, modularea în comutație a lățimii pulsului. Circuitul L298N realizează reglarea curentului de sarcină folosind două comutatoare PWM, câte una pentru fiecare fază a unui motor bipolar, sau câte una pentru fiecare pereche de înfășurători a unui motor unipolar. În cazul unui motor unipolar, înfășurările *A* și *B* (*C* și *D*) nu sunt activate niciodată simultan astfel încât pot să împartă același comutator [101].

Fiecare comutator este alcătuit dintr-un comparator, un bistabil și un rezistor extern pentru detectare. Un oscilator încorporat în chip generează pulsurile la rata de comutare ambelor comutatoare. În cazul fiecărui comutator (figura 2.32 [80]), bistabilul este setat de către fiecare puls de la oscilator, activând ieșirea și permițând curentului de sarcină să crească. Pe măsură ce valoarea acestuia crește, se mărește și tensiunea de pe rezistorul de detecție, iar când valoarea tensiunii atinge  $V_{ref}$ , bistabilul este resetat, ieșirea lui fiind dezactivată până la sosirea următorului puls de la oscilator. Demn de remarcat este faptul că,  $V_{ref}$  determină valoarea maximă a curentului de sarcină.

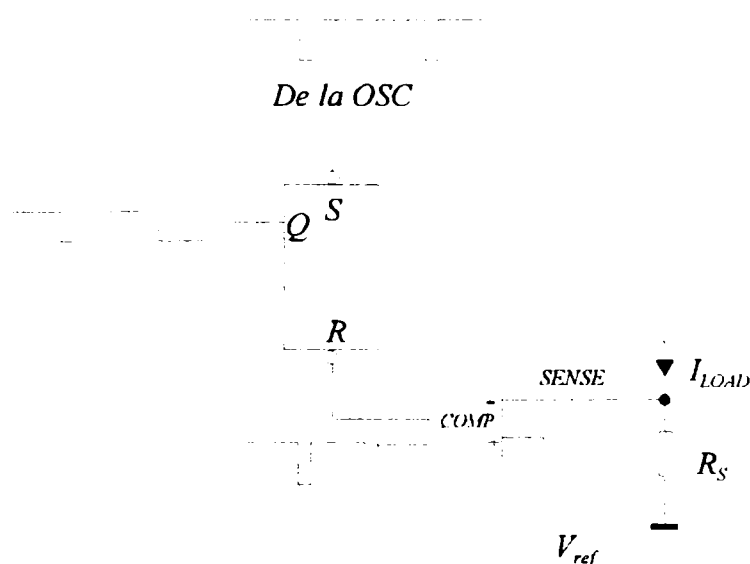


Fig. 2.32 Controlarea curentului de sarcină



rezistor și un tranzistor pot fi acoperite toate cazurile imaginabile. Figura 2.34 conține diagrama curentului optim de fază pe parcursul operației de poziționare.

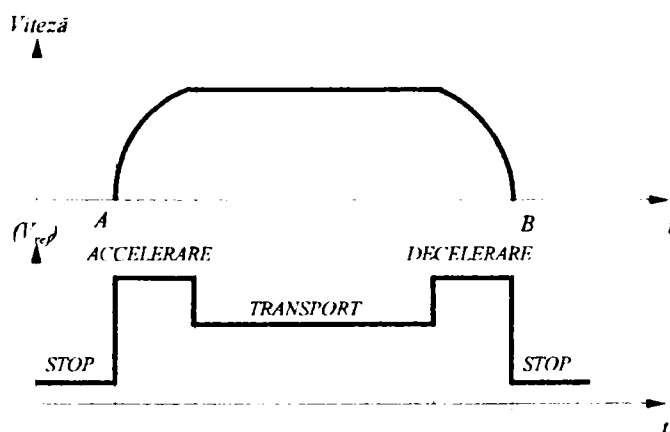
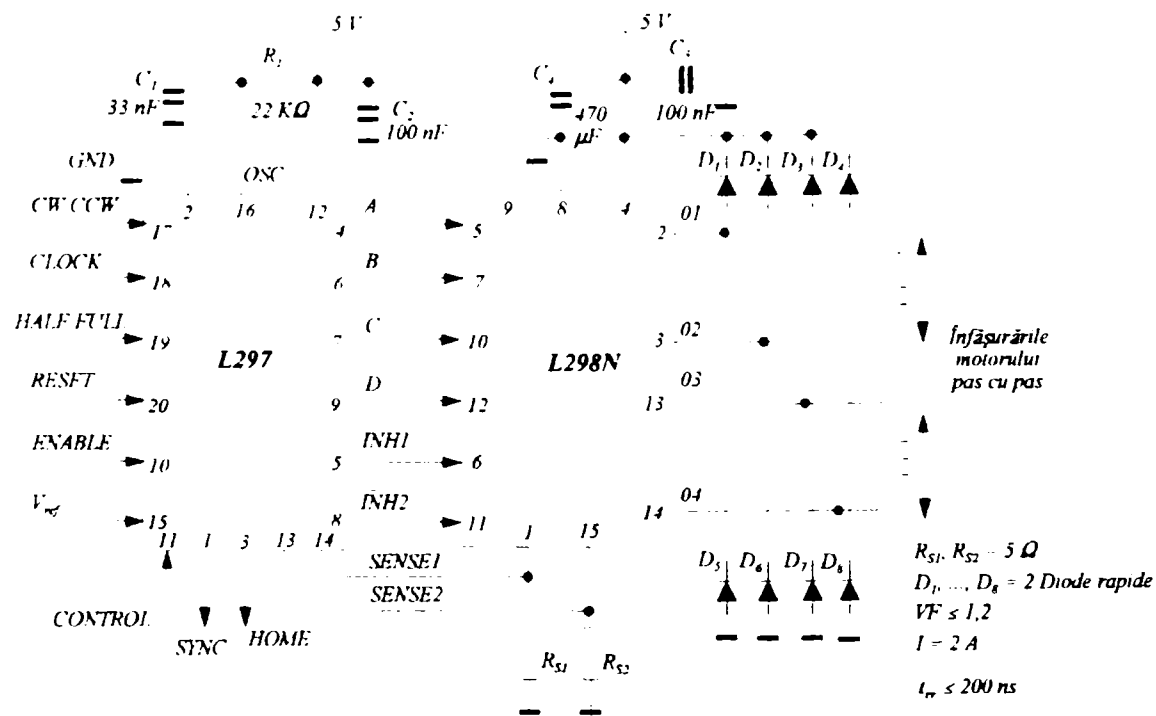


Fig. 2.34 Diagrama curentului optim de fază pe parcursul operației de poziționare

### 2.3.9 Comanda unui motor pas cu pas folosind circuitele L297 și L298N

Motoarele bipolare pot fi comandate folosind un circuit L297, un circuit de comandă în punte L298N sau L293E și câteva componente externe, așa cum se poate vedea în figura 2.35 [80], [81]. Aceste două chipuri realizează împreună o interfață completă între calculator și motorul pas cu pas. Folosind un L298N, această configurație comandă motoarele al căror curent prin înfășurători ajunge până la 2 A. Motoarele care au până la 1 A pe înfășurare necesită pentru comandă un L293E. Pentru curenți de până la 3,5 A se folosesc două circuite L298N cu ieșirile paralelizate.

Cea mai bună alegere pentru comanda unui motor unipolar este o matrice *Quad Darlington*. Dacă nu sunt necesare comutatoarele, atunci poate fi folosit circuitul L207B, dar se preferă circuitul ULN2075B. *Quad Darlington* are conexiuni externe emitoare care sunt conectate la rezistoarele de detecție (figura 2.36 [80]). Deoarece comutatorul folosește liniile de inhibare, sunt necesare patru porți și adiționale. De asemenea, sunt necesare și câteva diode de protecție.



Pentru toate aplicațiile care nu folosesc comutatoarele este foarte important ca intrările de detecție să fie legate la masă, iar  $V_{ref}$  să fie conectat fie la  $V_S$ , fie la orice potențial între  $V_S$  și masă. Frecvența de oscilare a comutatorului este determinată de rețeaua  $RC$  la pinul 16. Frecvența este aproximativ  $1/0,7 RC$ , iar  $R$  trebuie să fie mai mare de  $10 k\Omega$ .

În concluzie, implementarea interfeței electronice de comandă a motoarelor pas cu pas, bazată pe schema de referință a producătorului (figura 2.35), a condus la obținerea excitațiilor pentru fazele motorului la un preț de producție de aproximativ 15 USD pentru fiecare motor, față de soluția achiziționării unor astfel de interfețe de la terți, al căror preț curent pe piață este de aproximativ 100 USD pentru fiecare axă în parte. În plus, folosind componente fiabile și designul de referință al producătorului, s-a obținut aceeași calitate și fiabilitate finală, în condițiile unei disponibilități superioare și a unui răspuns mai apropiat la cerințele de proiectare.



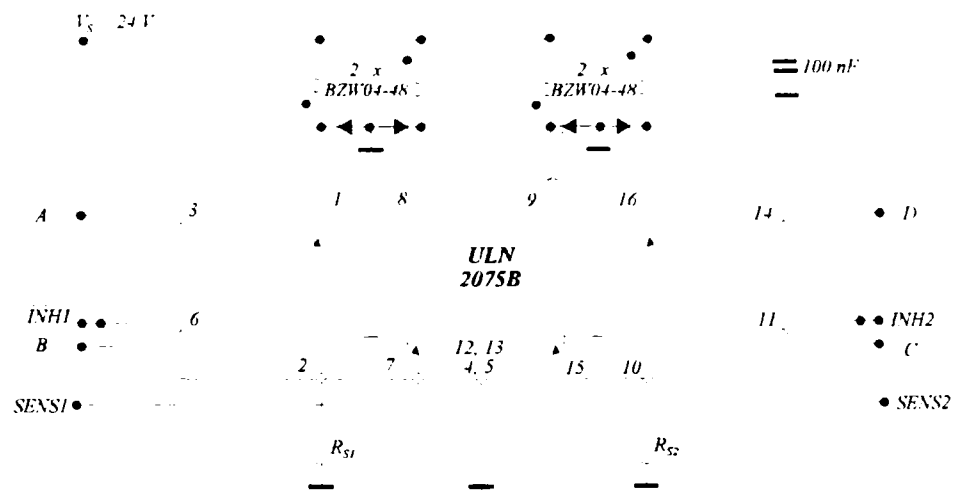


Fig. 2.36 Matrice Quad Darlington



## 3. PACHETUL SOFTWARE

### 3.1 Introducere

Pachetul software se constituie într-o componentă importantă a echipamentului *Comp-U-Craft*, deoarece la acest nivel se gestionează toate constrângerile, fie ele de echipament sau de execuție. El face legătura dintre reprezentările parametrice (modelate în componentele CAD) și cele cinematice (modelate, în vederea execuției, în componentele CAM). Pe lângă rolul foarte important de guvernare a funcționării componentelor mecanice și electronice ale mașinii, cu obținerea performanțelor ridicate ale preciziei și versatilității care au impus acest echipament pe cele mai concurențiale piețe ale Globului, partea de software trebuie să asigure posibilitatea operării echipamentului de către nespecialiști în domeniul calculatoarelor. Din acest motiv, o atenție deosebită a fost acordată proiectării interfețelor, pornindu-se, așa cum este firesc într-o economie de piață, de la necesitățile utilizatorului și nu de la concepțiile proiectanților. Conceptul s-a dovedit inspirat, judecând după rapiditatea cu care mașina s-a impus pe piață.

Astfel, activitatea de implementare a părții de software, coordonată de către autor, s-a desfășurat în lumina următoarelor concepte directe:

- sistemul de operare folosit ca suport va fi ales cel mai răspândit, pentru a asigura compatibilitate cu majoritatea utilizatorilor potențiali;
- interfețele vor fi proiectate astfel încât să permită migrarea facilă a utilizatorilor familiarizați cu programele CAD de largă răspândire către cele din suita *CD Nelson*;
- interfețele vor combina precizia ridicată a programelor neintuitive cu ușurința de utilizare a celor intuitive;

- interfețele vor permite utilizarea unităților de măsură, cu multipli și submultipli acolo unde este cazul, atât din sistemul internațional, cât și din cel imperial;
- la fel ca în demersul ingineresc de până acum, pentru obținerea unui parametru TTM minimal, în condițiile unei stabilități și a unei fiabilități ridicate, se va prefera implementarea unor algoritmi clasici, cunoscuți și verificați, când este posibil, în locul unor experimente teoretice inutile și irelevante pentru necesitățile utilizatorului, care să genereze potențial cheltuieli ridicate cu testarea sau remedierea.

Pentru ca echipamentul *Comp-U-Craft* prezentat să poată fi guvernat conform necesităților și cu precizia impusă de nivelul tehnologic actual a fost, evident, nevoie de o comandă computerizată. Pe lângă un calculator de uz general și interfața hardware prezentată în capitolul anterior, pentru îndeplinirea acestui deziderat este nevoie de un pachet de programe. S-a decis ca acest pachet de programe să asigure atât funcțiile de bază ale guvernării echipamentului (în esență, trasarea de segmente în spațiul tridimensional, cu constrângerile aferente privind vitezele și accelerațiile descompuse pe axele triortogonale), cât și integrarea acestor funcții în proiecte care să permită conceperea unor piese complexe, cum sunt implantele maxilo-faciale.

Pachetul software se numește *CD Nelson Commander Suite*, care este denumirea comercială a setului de programe necesar guvernării echipamentului *Comp-U-Craft*. Drepturile de autor sunt deținute în totalitate de *CD Nelson Manufacturing & Supply Co.* Acest pachet de programe este structurat în două secțiuni majore, una orientată pe CAM (*Computer Aided Manufacturing*) și una orientată pe CAD (*Computer Aided Design*). Componenta CAM este reprezentată de programul *CD Nelson Commander*, iar componenta CAD este reprezentată de programele *CD Nelson Assembler 2D*, *CD Nelson Draw*, *CD Nelson Phototrace*, *CD Nelson 3D Creator* și *CD Nelson 3D Shaper* [61].

*CD Nelson Commander* este componenta care se ocupă de guvernarea echipamentului în funcție de informația provenită din fișiere de comenzi, de la evenimente declanșate de utilizator, de la evenimente declanșate de echipament sau din calcule

proprii. La rândul său, această componentă este organizată pe trei module: interfață, modul intermediar de comandă și modul de comandă.

*CD Nelson Assembler 2D* este un program care, deși are ușoare facilități de editare (introducere de text sau creare de forme geometrice simple, bidimensionale), are ca scop asamblarea unor obiecte create în alte aplicații specializate. Pentru creare și editare de obiecte noi stă la dispoziție aplicația *CD Nelson Draw*, care înglobează, într-o implementare originală, funcțiile esențiale de desenare și modelare întâlnite în editoarele grafice vectoriale moderne.

*CD Nelson Phototrace* este un utilitar destinat vectorizării graficii raster. Și în cazul acestui program beneficiem de implementări originale ale funcțiilor prezente în aplicațiile consacrate. *CD Nelson 3D Creator* este un utilitar intenționat a fi foarte simplu de utilizat, având ca destinație obținerea unor obiecte tridimensionale pe baza adâncimii de culoare din grafica raster bidimensională. Deși servește aproximativ aceluiași scop, *CD Nelson 3D Shaper* se prezintă ca o aplicație evoluată cu capacități importante de editare a obiectelor tridimensionale, care se pot obține inclusiv plecând de la surse grafice bidimensionale în format raster.

Atunci când s-a inițiat evaluarea soluțiilor de guvernare a unui echipament cu comandă numerică pe minimum trei axe, formatul HPGL propus de *Hewlett-Packard* [86], [87] se apropia cel mai mult de necesitățile de comandă ale echipamentului *Comp-U-Craft*. Acesta are o structură simplă, fiind capabil să descrie comenzi de execuție bidimensională pentru segmente, cercuri și arce și să lege aceste entități de un set de stilouri. În faza de dezvoltare a echipamentului la acel moment părea atractivă asocierea unui stilou cu o anumită adâncime de lucru și cu o anumită viteză de prelucrare, dependentă de material și de scula folosită. Acest artificiu permitea folosirea unui format existent pentru reprezentări bidimensionale la comanda unui echipament cu execuție tridimensională, suficient pentru scopul propus atunci de folosire a echipamentului la activități de degroșare, decupare și gravură. Chiar și în acest caz, un minimum de cerințe impunea lucrul cu două entități: stilou (*pen*) și cap (*head*). Dacă stiloului i-au fost asociate

informațiile de adâncime și de viteză de lucru, capul poartă informații despre scula folosită. Problema era că HPGL nu punea la dispoziție încă o entitate în afară de stilou. Acest neajuns a fost înlocuit cu un alt artificiu, care constă în crearea unei tabele în care stilourile sunt grupate în intervale, iar fiecărui interval  $i$  se asociază o sculă. Astfel, unei scule  $i$  se pot asocia mai multe setări în ceea ce privește avansul în material și viteza de prelucrare, ceea ce corespunde într-un totu scenariilor reale de execuție.

Rațiunea cramponării de un format existent, dar nesatisfăcător în raport cu necesitățile de comandă ale echipamentului *Comp-U-Craft* rezidă în necesitatea de a folosi, la generarea fișierelor de comenzi, aplicații existente pe piață în acel moment, cu efecte benefice asupra parametrului TTM (*Time To Market*). Ulterior s-a creat posibilitatea de a dezvolta aplicații proprii care să permită scăderea costurilor și creșterea facilităților oferite.

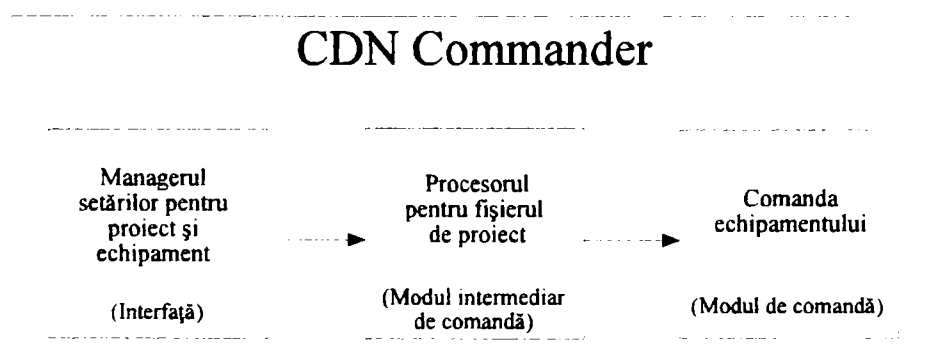
Experiența câștigată cu lucrul cu fișiere HPGL a demonstrat că, deși *Hewlett-Packard* oferă în formatul său suport pentru cercuri și arce de cerc, nici unul dintre autorii programelor care s-au impus pe piață nu fac uz de acest suport atunci când își exportă obiectele în acest format. Practic, singura primitivă folosită este segmentul, orice altă linie fiind obținută din concatenarea numărului necesar de astfel de elemente. De aceea, pe măsura dezvoltării pachetului software, s-a luat decizia de a folosi doar această primitivă la exportul din aplicațiile proprii de CAD. Specificul execuției comenzilor cu ajutorul motoarelor pas cu pas conduce, prin atomizare, la această unică primitivă.

Comanda echipamentului *Comp-U-Craft* (figura 3.1) se realizează în pași, adică pentru fiecare motor trebuie generate impulsurile corespunzătoare deplasării cu un anumit număr de pași, concomitent cu semnalizarea sensului acestei deplasări. A-i cere, însă, utilizatorului să gândească în pași (sau în pași pe secundă, în cazul vitezelor) se poate dovedi osarcină dezagreabilă, mai ales că pentru diverse destinații principale se pot construi echipamente cu rezoluții diferite. A apărut astfel necesitatea proiectării unui modul de interfață care „să converseze” cu utilizatorul folosind reprezentări și mărimi inteligibile pentru acesta (de exemplu, reprezentarea grafică a traseului urmat de sculă, dimensiuni date în țoli sau în milimetri și viteze exprimate în țoli pe minut sau în milimetri pe minut). Acest

modul se va ocupa de conversiile necesare reprezentărilor în pași sau pași pe secundă aferente echipamentului comandat și va livra aceste mărimi modulului intermediar de comandă.

Modulul intermediar de comandă preia valorile generate la nivelul modulului de interfață, ordonându-le după nivelul de prioritate, după care le livrează modulului de comandă al echipamentului *Comp-U-Craft*. De asemenea, acest modul transmite modulului de interfață, spre a-i fi prezentată utilizatorului, posibilitatea intervenției directe pentru deplasare pe fiecare dintre axe sau pentru stabilirea originii unui traseu de execuție, în funcție de prinderea semifabricatului pe platanul echipamentului.

Modulul de comandă este complet transparent pentru utilizator, dar este foarte important din punct de vedere al funcționării echipamentului *Comp-U-Craft* (fiind, practic, componenta cu complexitatea cea mai ridicată), deoarece aici se rezolvă toate problemele legate de temporizare pentru a se putea comanda echipamentul conform necesităților izvorâte din respectarea curbelor de variație a vitezei și din constrângerile sistemului de operare cu privire la accesul la resursele hardware ale calculatorului (în speță la portul paralel, pentru prima variantă a echipamentului, respectiv la portul USB, pentru cea de-a doua variantă constructivă a echipamentului).



**Fig. 3.1** Schema bloc a părții de CAM

Un mare neajuns al utilizării formatului standard industrial HPGL este faptul că, fiind gândit pentru grafică bidimensională, era imposibil de realizat deplasarea

capului portsculă simultan pe cele trei axe. Deplasarea simultană după axele  $x$  și  $y$  nu reprezenta o problemă, formatul fiind gândit în acest scop, dar asocierea stilourilor cu coordonata de adâncime  $z$  nu permitea deplasarea simultană și pe această axă. Mai precis, pentru poziționarea capului portsculă la un anumit punct din spațiul tridimensional accesibil echipamentului, se genera comanda de deplasare până la proiecția acestui punct în planul  $xOy$ , se selecta stiloul corespunzător (care avea asociată cota  $z$  necesară), după care se genera comanda de coborîre a stiloului până la cota indicată prin tabela de asociere (figura 3.2).

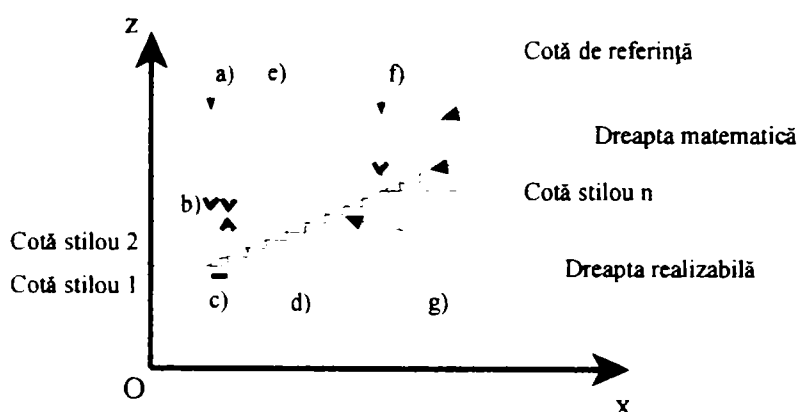


Fig. 3.2 Explicativă la adaptarea formatului HPGL pentru reprezentarea obiectelor 2,5 D

Semnificația notațiilor din figura 3.2 este:

- a) Se selectează stiloul 1;
- b) Coboară stiloul 1;
- c) Execută deplasare orizontală stiloul 1;
- d) Se retrage stiloul 1;
- e) Coboară stiloul 2;
- f) Se selectează stiloul  $n$ ;
- g) Coboară stiloul  $n$ .



Deși artificiile prezentate au permis utilizarea unui format standard (ceea ce, la rândul său, a permis utilizarea pentru partea de CAD a unor programe dezvoltate de către terți), limitările puternice în execuția unor piese atipice a determinat luarea în considerație a dezvoltării unui format propriu de reprezentare a curbelor în spațiul tridimensional. Acest lucru a devenit cu atât mai interesant cu cât activitatea susținută de dezvoltare a programelor proprii necesare pe partea de CAD a început să dea roade, astfel încât, în prezent, se poate oferi o suită completă de programe care să permită rezolvarea sarcinilor fără a face uz de software dezvoltat de către terți.

Un alt punct critic se referă la trasarea segmentelor, cunoscându-se punctul de origine și cel de destinație. Deși matematica abundă în soluții, parte dintre ele fiind prezentate anterior, particularitățile sistemelor de calcul reduc foarte mult posibilitățile de aplicare ale acestora prin metode specifice tehnicii de calcul. O primă limitare este legată de reprezentarea numerelor în calculator. Astfel, fie că sunt reprezentate în virgulă fixă sau în virgulă mobilă, apar numere situate într-un domeniu finit de valori în interiorul căruia există un număr finit de valori distincte reprezentabile. De aici decurg parametri specifici calculului automat, cum sunt precizia reprezentării și eroarea acesteia.

Având în vedere că aplicarea unor formule matematice în domeniul calculului automat implică o discretizare făcută cu o precizie limitată de posibilitățile calculatorului, de aici decurgând un volum de calcule care crește o dată cu creșterea preciziei, trebuie acordată o atenție deosebită alegerii juste a acestor algoritmi. Mai precis, ținând seama de faptul că atunci când s-a început dezvoltarea părții de CAM a echipamentului *Comp-U-Craft*, puterea de calcul a ordinatorului era cu două-trei ordine de mărime mai mică decât cea actuală, a fost necesară renunțarea la acei algoritmi care impuneau înmulțiri și, mai ales, împărțiri (operații deosebit de cronofage față de adunări și scăderi, în unitățile aritmetice și logice ale procesoarelor). În caz contrar, calculatorul nu ar fi putut genera semnalele de comandă pentru cele trei motoare pas cu pas corespunzătoare axelor ortogonale, astfel încât să poată fi urmărite curbele de deplasare conform parametrilor impuși de material, de sculă și de operație. Spre exemplu, implemen-

tarea ecuației drepte din geometria analitică ar necesita o pagină de cod și un număr mare de înmulțiri și de împărțiri.

După o trecere în revistă a soluțiilor numerice, un algoritm devenit clasic în ceea ce privește afișarea pe ecran a segmentelor de dreaptă, s-a impus în fața celorlalte, datorită simplității sale (se bazează doar pe adunări și scăderi), ceea ce permitea rularea cu o viteză suficient de ridicată pentru ca echipamentul să fie comandat de calculator în toate regimurile posibile. Acesta este algoritmul Bresenham [84], [85], prezentat *in extenso* în Anexa 3, unde poate fi observată și o comparație între cei doi algoritmi (prezentați didactic pentru elocvență). Pentru trasarea unui segment oblic, algoritmul returnează numărul de pași pe o axă (sau pe celelalte două axe, în cazul unui segment din spațiul tridimensional) în funcție de numărul de pași parcurși pe cealaltă axă.

Chiar dacă este relativ grosier față de structura electromecanică a echipamentului, algoritmul Bresenham repartizează optimal numărul de pași de pe o axă în raport cu numărul de pași de pe altă axă astfel încât să reducă la minimum efectul de „scară în trepte“ al unei linii oblice. În cazul afișării pe ecran, acest lucru nici măcar nu este un dezavantaj dat fiind specificul matriceal al acestui tip de afișare. În cazul echipamentului *Comp-U-Craft*, însă, „treptele“ care compun o linie oblică ar putea fi netezite până la dispariție printr-o comandă continuă. Din păcate, ținând seama de mai multe considerente, cum ar fi complexitatea constructivă, complexitatea programării, viteza de calcul, sarcina și, nu în ultimul rând, raportul performanță/preț, s-a decis utilizarea motoarelor pas cu pas, care, prin natura lor, au un comportament discret. Cu toate acestea, deplasarea unui motor pas cu pas dintr-o poziție curentă în una învecinată printr-un singur pas nu se poate face după o curbă de variație asemenea semnalului de comandă (dreptunghiular) din cauza maselor care trebuie puse în mișcare și a inerțiilor determinate de acestea atunci când sunt supuse unei anumite accelerații. Cu alte cuvinte, determinarea exactă a momentelor în care trebuie comandate cele două motoare pas cu pas pentru obținerea unei linii oblice plane are ca rezultat o netezire semnificativă a efectului de „scară în trepte“.

Algoritmul Bresenham este corespunzător din acest punct de vedere deoarece, în încercarea de a repartiza uniform numărul de pași al unei axe la numărul de pași

executați, corespunzător înclinației necesare, pe cealaltă axă, generează momentele de timp pentru comanda simultană a celor două axe amintite. Astfel, pentru cazul particular al unor drepte oblice față de una dintre axele de referință, aflate la unghiuri multiplu impar de  $45^\circ$ , linia rezultată nu va prezenta deloc efect de „scară în trepte”, dacă se aplică o comandă simultană a motoarelor de pe axele implicate. Este adevărat că la alte unghiuri de înclinare efectul există, deși este sensibil atenuat de capacitatea algoritmului Bresenham de a repartiza uniform numărul de pași al unei axe în funcție de numărul de pași care trebuie executat pe cealaltă axă (figura 3.3). Desigur că efectul cel mai defavorabil este obținut atunci când cele două numere sunt prime între ele, un caz particular fiind al dreptelor foarte apropiate de unghiurile multiplu de  $90^\circ$  (mai precis la care numărul de pași de pe o axă diferă printr-un singur pas de numărul de pași de pe cealaltă axă). Chiar și această situație poate fi îmbunătățită sensibil prin comanda motoarelor în modul „micropas” (*microstep*), în care tensiunea de comandă în loc de a avea formă rectangulară este aproximată numeric ca fiind o sinusoidă. Acest mod de comandă nu numai că „liniarizează” trecerea de la un pas la altul pe axa mai lentă, ci reduce sensibil zgomotul echipamentului prin atenuarea semnificativă a vibrației motoarelor în jurul punctului de sosire.

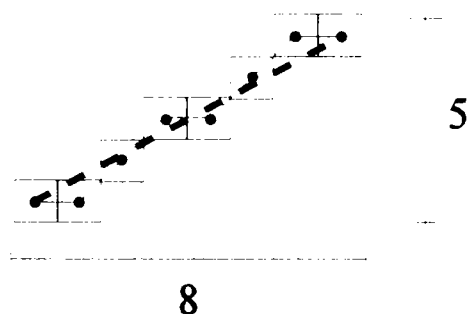


Fig. 3.3 Trasarea unei drepte oblice de aproximativ  $32^\circ$ , conform algoritmului Bresenham

Un alt aspect care trebuie luat în considerație este cel privitor la viteze și la accelerații. Dacă în ceea ce privește prelucrarea materialului interesează viteza periferică (adică viteza vârfului sculei în spațiul tridimensional), în ceea ce privește comanda interesează proiecțiile acestei viteze (și ale accelerațiilor aferente) pe cele trei axe ortogonale care descriu spațiul tridimensional. Mai precis, în funcție de tipul prelucrării (așchiere, gravură, electroeroziune, tăiere cu laser sau plasmă, fotoexpunere etc.), de tipul materialului prelucrat și de calitatea suprafețelor care se doresc obținute se impune o anumită viteză de avans a sculei prin material. Această viteză se calculează pe baza vectorilor imprimați de către cele trei axe carteziane. Pe de altă parte, comanda motoarelor de pe fiecare axă trebuie încadrată conform graficului prezentat în capitolul anterior, fiind necesar ca ea să se subordoneze constrângerilor de accelerație, viteză maximă și decelerație corespunzătoare motorului ales și sarcinii sale. Și în acest caz algoritmul Bresenham s-a dovedit o alegere inspirată, deoarece se poate identifica rapid axa cu cel mai mare număr de pași de executat pentru un anumit segment. Acest lucru permite reducerea verificărilor de complianță cu constrângerile la una singură, anume pe axa cu numărul maxim de pași. Evident că pe celelalte două axe corespunzătoare segmentului în discuție valorile limită nu vor fi depășite.

## **3.2 Partea de CAM**

### **3.2.1 CD Nelson Commander**

#### *3.2.1.1 Prezentare generală*

Scopul programului CD Nelson Commander este de a încărca fișiere PLT și de a comanda echipamentul de gravat să execute comenzile conținute în aceste fișiere ținând cont de parametrii și de setările utilizatorului. Schema bloc este dată în figura 3.1, important din punct de vedere al utilizatorului fiind modulul de interfață care este, în același timp, managerul setărilor proiectului și ale mașinii.

Cu alte cuvinte, pe lângă ferestrele necesare schimbului de informații cu utilizatorul, acest modul se ocupă și de conversia unităților de măsură familiare acestuia în unități de măsură cu care lucrează echipamentul *Comp-U-Craft*. Mai precis, în ceea ce privește distanțele, de exemplu, echipamentul lucrează în pași (ai motorului pas cu pas), iar în ceea ce privește vitezele, respectiv accelerațiile, în pași pe secundă și în pași pe secundă la pătrat. Acest mod de lucru ar fi incomod pentru utilizator, mai ales că pentru diverse destinații se pot construi mașini cu diverse rezoluții (pași pe unitatea de distanță). Utilizatorii preferă să folosească unități de distanță, de viteză, sau de accelerație consacrate (cu multiplii și submultiplii respectivi) din Sistemul Internațional sau din cel Imperial. Acest modul este împărțit din punct de vedere logic în trei blocuri: setările echipamentului, setările proiectului și operații.

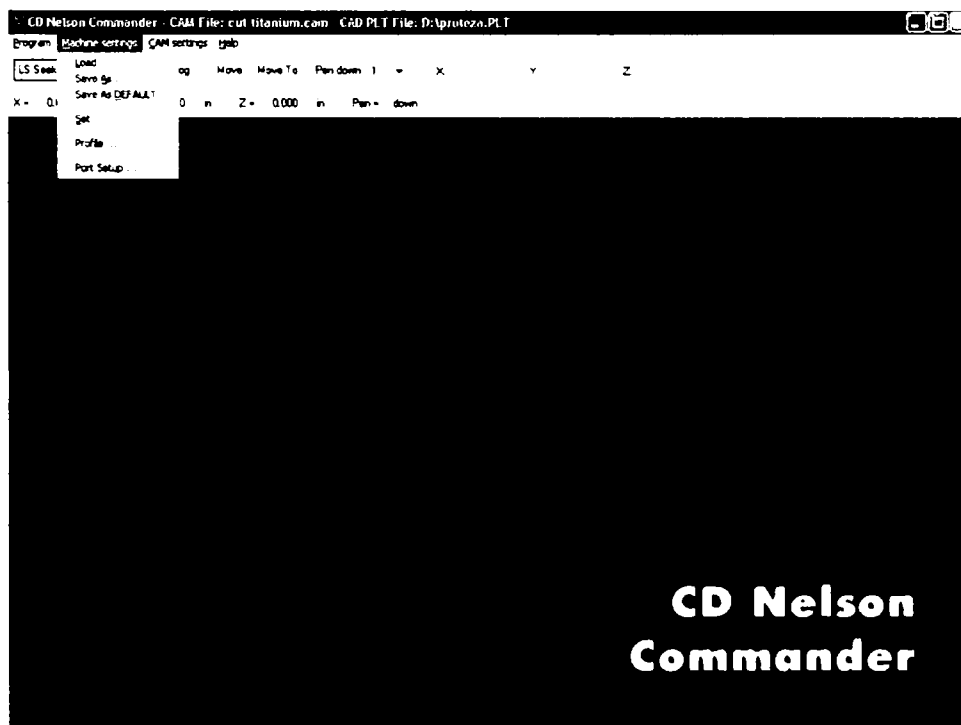


Fig. 3.4 Setările echipamentului

**Setările echipamentului** (figura 3.4) conțin setările pentru caracteristicile fizice ale echipamentului *Comp-U-Craft* care se comandă: numărul de pași care trebuie făcuți de un motor într-un singur sens pentru a parcurge o unitate de distanță (1 țol, 1 mm sau 1 cm), vitezele maxime de comandă, accelerație, lungimea axelor etc. În această categorie intră și selectarea porturilor paralele ale PC-ului sau portul USB la care este conectat echipamentul.

**Setările proiectului** (figura 3.5) conțin variabilele care depind de proiectul necesar a fi executat și nu neapărat de echipamentul *Comp-U-Craft* pe care se execută. Există, bineînțeles, și proiecte care nu pot fi executate pe o anumită variantă de echipament. Astfel, aici se pot configura:

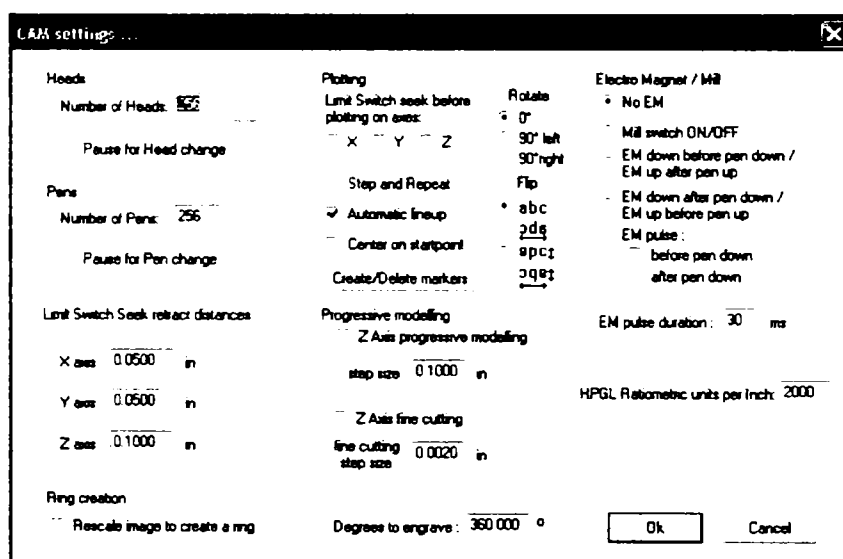


Fig. 3.5 Setările proiectului

- Numărul de vârfuri logice folosite (stilouri) și numărul de vârfuri fizice (capete) folosite. Pentru fiecare vârf logic se specifică vitezele de mișcare în material (când vârful este coborât), vitezele de coborâre și de urcare ale vârfului, adâncimea la care va fi coborât vârful, cât și numărul vârfului fizic asociat fiecărui stilou (figurile 3.6 și 3.7);

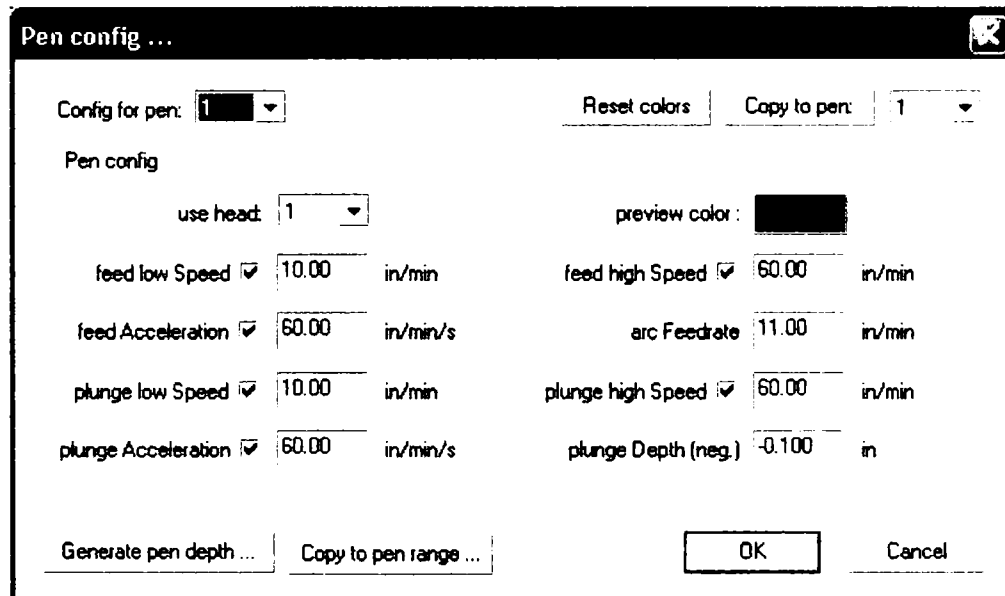


Fig. 3.6 Configurarea stilurilor

- Setările pentru senzorii de sfârșit de axă (figura 3.8). Aceste setări reflectă dorința utilizatorului de a se face la începutul execuției fiecărui fișier PLT o mișcare pe fiecare axă până la activarea acestor senzori, cât și distanțele pe care să se facă retragerea capului după activarea lor;

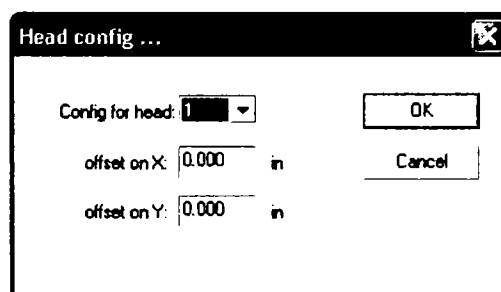


Fig. 3.7 Configurarea capetelor

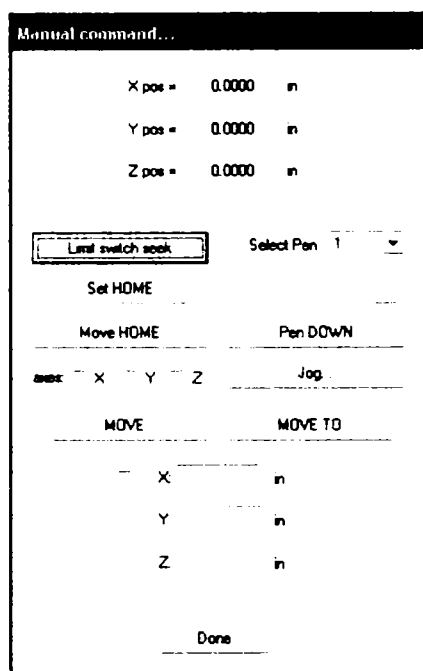


Fig. 3.8 Setările axelor

- Setările pentru activarea electromagnetului, în cazul în care se folosește un astfel de dispozitiv pentru a coborî sau pentru a ridica vârful ori pentru a porni sau a opri motorul frezei (figura 3.5);

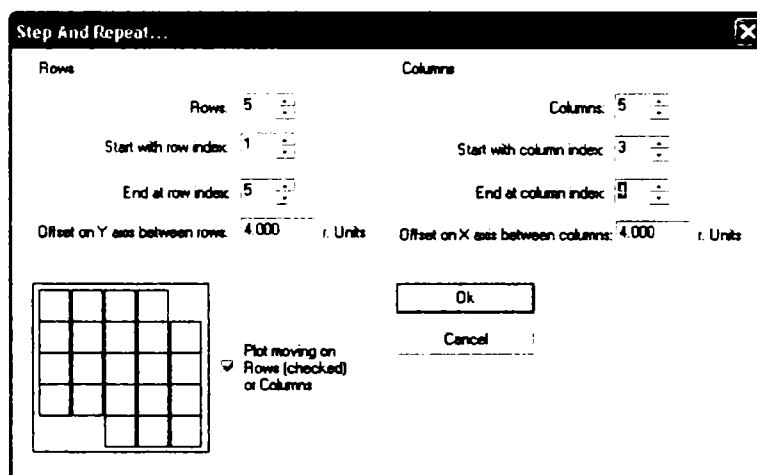


Fig. 3.9 Poziționarea materialului și generarea de copii multiple



- Poziționarea materialului pe masa de execuție. Se referă la centrări automate și la repetări (se pot face mai multe copii ale aceleași piese, poziționate pe o rețea ortogonală definită de utilizator) (figura 3.9);
- Crearea de referințe de poziție, în cazul în care produsul rezultat urmează a fi modificat printr-un alt proces care necesită poziționare exactă (figura 3.10);

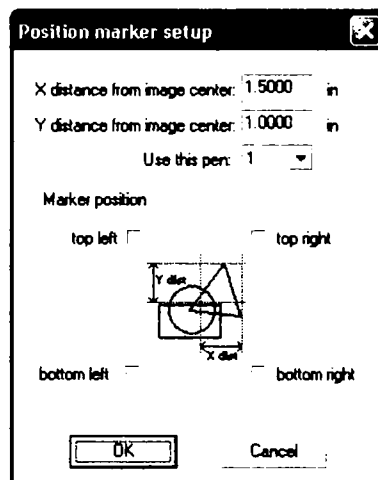


Fig. 3.10 Marcarea reperelor de execuție

- Rezoluția fișierului PLT (Figura 3.5).

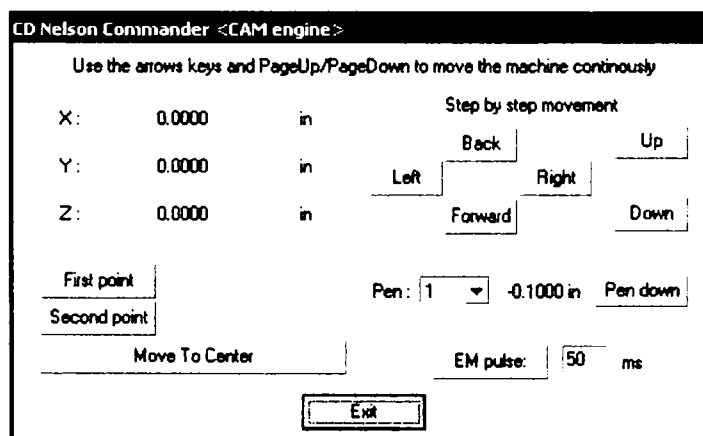


Fig. 3.11 Deplasarea manuală a sculei pe axe

Pe lângă executarea comenzilor dintr-un fișier, programul mai permite efectuarea următoarelor **operații**: comandarea manuală a echipamentului (figurile 3.8 și 3.11), scanarea unui obiect tridimensional folosind un palpator mecanic (figurile 3.12 și 3.13), estimarea timpului necesar execuției unui proiect, optimizarea acestui timp, în cazul în care este posibil, și afișarea unei previzualizări a proiectului de executat.

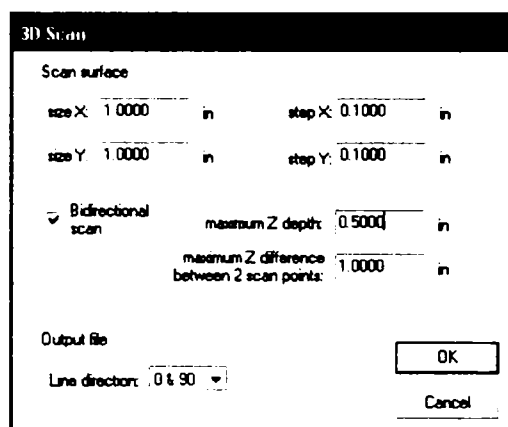


Fig. 3.12 Setările pentru scanare

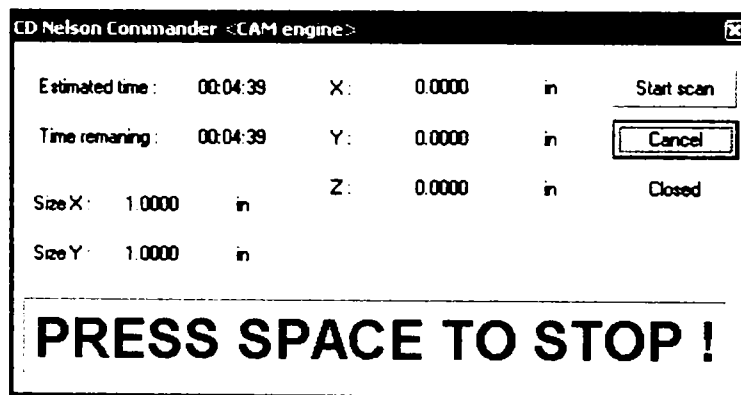


Fig. 3.13 Fereastra de scanare

Nu în ultimul rând trebuie menționat faptul că aplicația pune la dispoziția utilizatorului un program de conversie a unui mare număr de unități de măsură în și din diferite sisteme de unități, de exemplu între cel metric și cel imperial (figura 3.14).

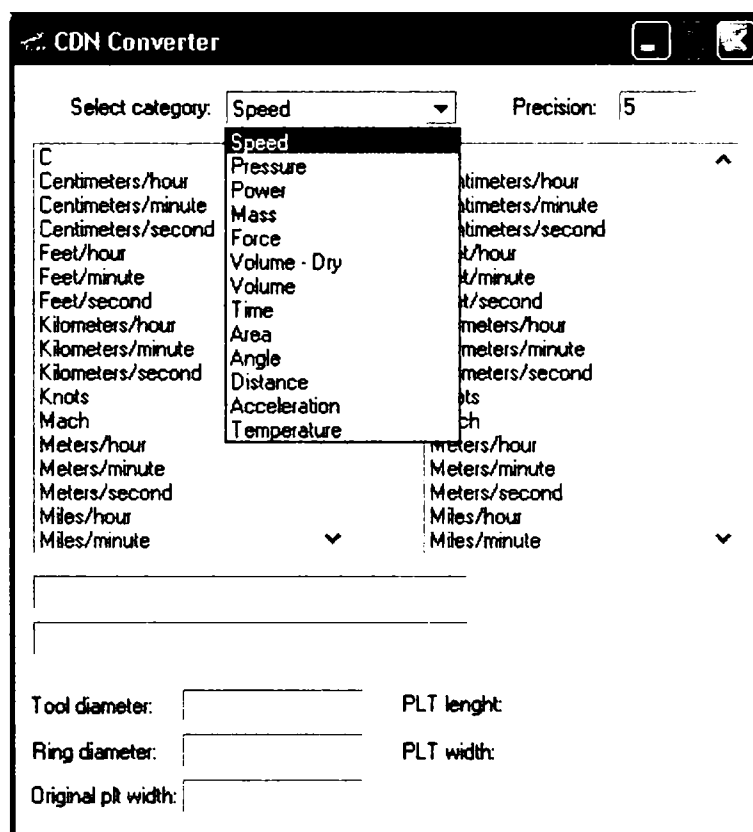


Fig. 3.14 Convertor de unități de măsură

De asemenea, utilizatorului i se oferă documentație electronică exhaustivă cu privire la funcționalitatea și operarea programului (figura 3.15).

### 3.2.1.2 Aspecte tehnice

Programul este format din două module de baza: *cdn\_comm.exe* și *cdnc\_pe.dll*. Modulul *cdnc\_pe.dll* (*CD Nelson Commander plotting engine*) conține rutinele de comandă a echipamentului *Comp-U-Craft* și un număr foarte mic de elemente de interfață grafică. Modulul este structurat pe două fire de execuție: unul dedicat comenzii echipamentului (numit firul prioritar) cu o prioritate maximă permisă de

sistem și unul pentru toate celelalte operații pe care le efectuează modulul (numit firul interfață). Modulul este lansat de *cdn\_comm.exe* imediat după lansarea acestuia. Imediat după încărcare și inițializare modulul intră în stare de așteptare.

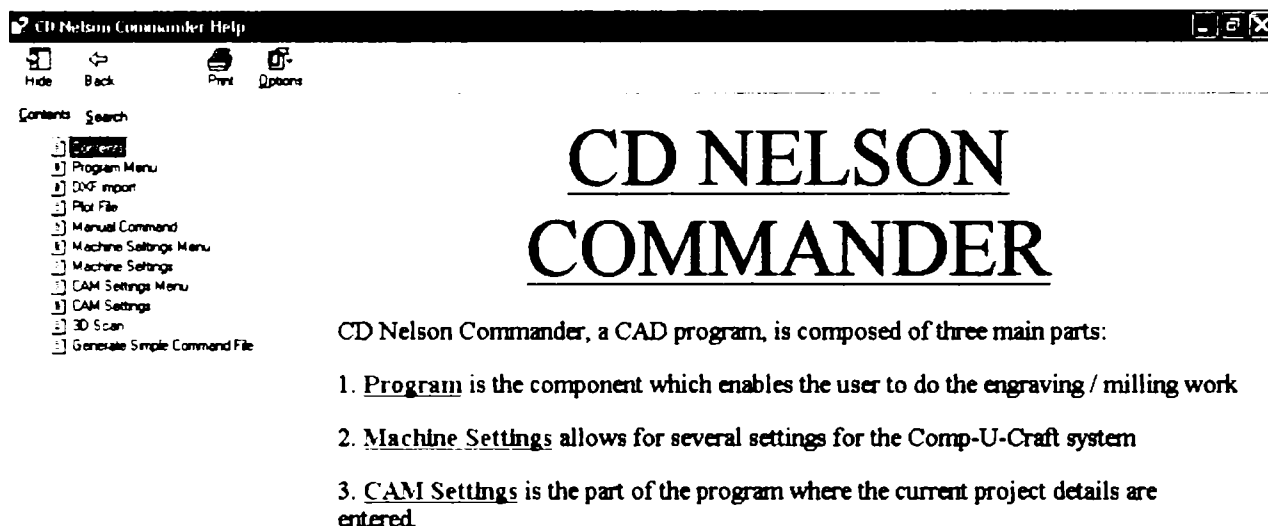


Fig. 3.15 Documentația electronică a programului *CD Nelson Commander*

Comunicația între cele două module se face prin mesaje și este inițiată numai de *cdn\_comm*. Majoritatea mesajelor transmise de *cdn\_comm* sunt urmate de intrarea acestuia în stare de așteptare până la primirea unui mesaj răspuns de la *cdnc\_pe*.

Principalele comenzi pe care le primește modulul *cdnc\_pe.dll* sunt următoarele:

- Execuția proiectului: afișează fereastra de pornire a execuției proiectului și, la comanda utilizatorului, încarcă fișierul de comenzi, estimează timpul necesar (dacă operația nu a fost făcută deja la cererea utilizatorului) și lansează în execuție firul prioritar. Mesajul de răspuns conține: operație anulată/oprită, operație suspendată sau operație terminată;
- Reluarea execuției, oprirea execuției: în cazul în care operația de executare a unui proiect a fost suspendată, se reia execuția;
- Mutare comandată manual (*jog*);
- Operație simplă: mută vârful cu un număr de pași pe o anumită direcție specificată;
- Scanare: scanează suprafața și depune rezultatul în locațiile de memorie specificate.

Aproximarea liniilor pentru mișcarea concomitentă pe două axe este făcută folosind algoritmul Bresenham, descris anterior și prezentat *in extenso* în Anexa 3.

Principalele îndatoriri ale modulului *cdn\_comm* sunt:

- Comunicarea cu utilizatorul pentru setarea diferiților parametri;
- Generarea fișierului de comenzi transmis modulului *cdnc\_pe* execuția proiectului. Această operație este desfășurată în doi pași: scanarea fișierului PLT selectat pentru determinarea valorilor minime și maxime de poziționare a vârfului pe durata proiectului și generarea fișierului de comenzi simple, transmis spre execuție modulului *cdnc\_pe*;
- Importarea fișierelor DXF;
- Exportarea fișierelor DXF cu conținutul rezultat în urma scanării;

## 3.3 Partea de CAD

### 3.3.1 *CD Nelson Assembler*

Prezentarea părții de CAM începe cu programul *CD Nelson Assembler 2D* (figura 3.16). Acesta a fost programul inaugural al suitei, având drept scop combinarea mai multor obiecte create în alte aplicații și exportate în format *.plt* într-unul singur, care să reprezinte sarcina de execuție a echipamentului *Comp-U-Craft*.

Nu se insistă asupra acestei aplicații deoarece, fiind prima, suferă de „bolile copilăriei“. Poziționarea relativă a obiectelor în spațiul de lucru nu se face cu instrumente de precizie, ci se bazează pe rezoluția interfeței om-mașină (ecran, maus). La vremea când a fost creat satisfăcea pretențiile utilizatorului sub aspectul simplității în utilizare și a timpului redus de lucru pentru obținerea unor proiecte mai complexe din obiecte simple, preexistente.

Pretențiile pieței sub aspectul preciziei fiind în continuă creștere, a fost necesară elaborarea unor noi componente ale suitei care să înglobeze, pe lângă instrumente precise de trasare și poziționare, capacități extinse de creare și de modificare a obiectelor bidimensionale și tridimensionale.

Este foarte probabil ca acest program să dispară din suită în următoarele luni, singura justificare a prezenței sale actuale fiind simplitatea în utilizare, care îi permite unui începător absolut să utilizeze echipamentul imediat după achiziționare și instalare.

## CDN Assembler

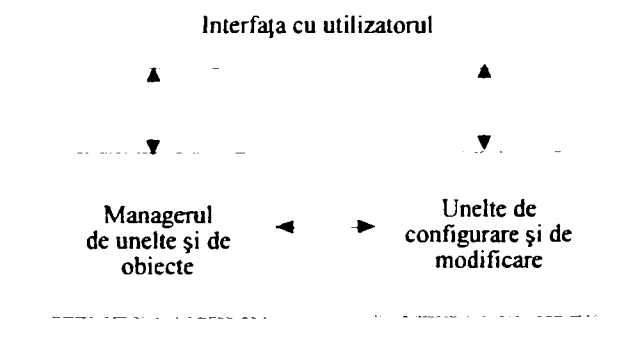


Fig. 3.16 Schema bloc a CDN Assembler

### 3.3.2 CD Nelson Draw

*CD Nelson Draw* este o aplicație, care deși este disponibilă comercial, se află încă în dezvoltare, în încercarea de a deveni mai performantă și mai ușor de folosit decât aplicațiile similare de pe piață. Două curente majore s-au impus pe piață, în domeniul graficii vectoriale. Unul este reprezentat de aplicația *Corel DRAW!* a companiei canadiene Corel Corp. Aici utilizatorul are de a face cu o interfață prietenoasă și ușor de folosit, în condițiile în care programul îi pune la dispoziție atât funcții simple, utile amatorilor, cât și funcții complexe, necesare celor inițiați. Marele dezavantaj e reprezentat de dificultatea sau chiar imposibilitatea specificării exacte a unor dimensiuni sau a unor coordonate de poziționare. La fel ca în *CD Nelson Assembler 2D*, precizia acestor elemente depinde de interfața om-mașină. Celălalt curent este reprezentat de programul *AutoCAD* al companiei americane Autodesk Inc. Acesta permite un control exact al dimensiunilor și al poziționării, având ca neajuns principal o interfață neintuitivă și greu de folosit de

către nespecialiști. Chiar și utilizarea funcțiilor implementate necesită o cunoaștere temeinică a desenului tehnic și al aparatului matematic de reprezentare.

## CDN Draw

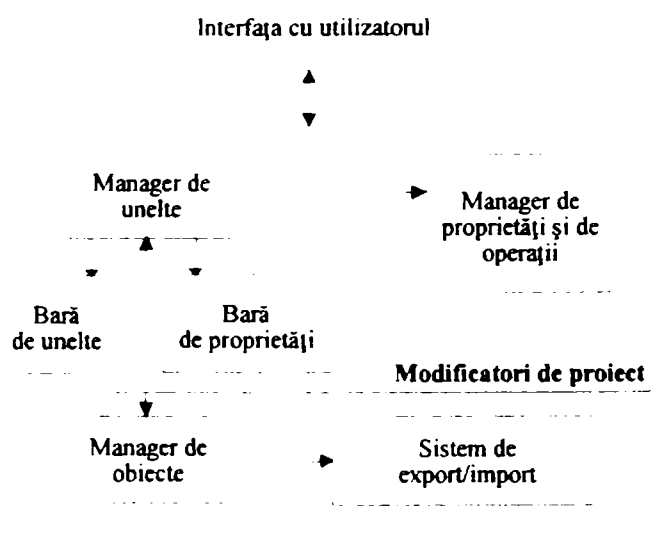


Fig. 3.17 Schema bloc a CDN Draw

*CD Nelson Draw*, a cărei schemă bloc se reflectă în figura 3.17, se dorește a fi o îmbinare a avantajelor celor două curente care s-au impus pe piață, combinând o interfață grafică prietenoasă cu complexitatea și precizia unei reprezentări tridimensionale exacte, independentă de precizia interfeței de comunicare dintre om și mașină. Evident, structura interfeței este ceea ce impusă de programul firmei canadiene, compunându-se din o bară de meniuri, o bară cu unelte și o bară cu proprietăți, aceasta din urmă modificându-și conținutul în funcție de capacitățile uneltei selectate la un moment dat (comparație între figurile 3.18 și 3.19). În afara barei de proprietăți, mai există o pagină cu caracteristici, la fel ca în *Corel DRAW!*, al cărei conținut se modifică în funcție de obiectul selectat (comparație între figurile 3.18 și 3.19) și care pune la dispoziția utilizatorului o paletă de operații aplicabile obiectelor (duplicare, intersecție, decupare, sudură, extrudare ș.a.m.d.).

*CD Nelson Draw*, având ca scop generarea obiectelor de executat cu *CD Nelson Commander*, are ca principală funcție de export reprezentarea în format HPGL



(.plt). Din acest motiv, încă din faza de proiectare, lucrul este orientat pe stilouri. Unui stilou  $i$  se asociază informații despre culoarea liniei, grosimea acesteia, precum și adâncimea sa. Acest lucru extinde capacitățile bidimensionale ale proiectării și reprezentării la un format pseudotridimensional, numit 2,5 D, în care nu există facilități de vizualizare sau de rotire în spațiu, dar se pot asocia informații de adâncime (axa Z) unui anumit număr de stilouri, după cum este descris la începutul acestui capitol.

În concluzie, *CD Nelson Draw* este un program în strânsă legătură cu capacitățile echipamentului *Comp-U-Craft*, cu comandă numerică pe trei axe. Cu alte cuvinte, un astfel de echipament poate deplasa o sculă în plan orizontal și o poate coborî sau ridica în plan vertical. Acest echipament nu poate roti piesa și nici nu poate modifica înclinarea sculei față de platanul său, aceste facilități neregăsindu-se nici în program. Deși un astfel de echipament poate executa o mare varietate de piese care conțin informație de adâncime și care apar ca tridimensionale, nu orice obiect 3D poate fi executat. Un contraexemplu poate fi dat de găurile înclinate sau de surplombe. Astfel, limitările programului asigură utilizatorul că nu va proiecta un obiect nerealizabil pe echipamentul cu trei axe.

*CD Nelson Draw* are implementate până în acest moment următoarele unelte: text, elipsă, dreptunghi, poligon regulat închis, unelte de modificare și de poziționare, precum și de import sau export al obiectelor (figura 3.18).

O atenție deosebită a fost acordată uneltelor de poziționare, fiind posibilă specificarea exactă, matematică, a coordonatelor. La fel ca programul firmei canadiene, *CD Nelson Draw* lucrează cu obiecte compuse din lanțuri legate, fiecare lanț având în componență segmente de dreaptă și curbe Bézier de ordinul al treilea, legate între ele (figura 3.19).

Dacă totalitatea lanțurilor unui obiect formează o curbă închisă, atunci se activează și funcția de umplere a respectivului obiect. Ca diferență notabilă față de produsele similare de pe piață, trebuie menționat faptul că, în cazul obiectelor compuse din minimum două lanțuri închise care se suprapun parțial, umplerea se poate face și pe întreaga suprafață a obiectului, nu doar alternativ, pe suprafețele din afara zonei

de intersecție. Programul face optimal acest lucru fără a reprezenta redundant umplerea sau contururile, indiferent dacă s-au aplicat funcții de sudură, de intersecție sau de decupare între lanțuri.

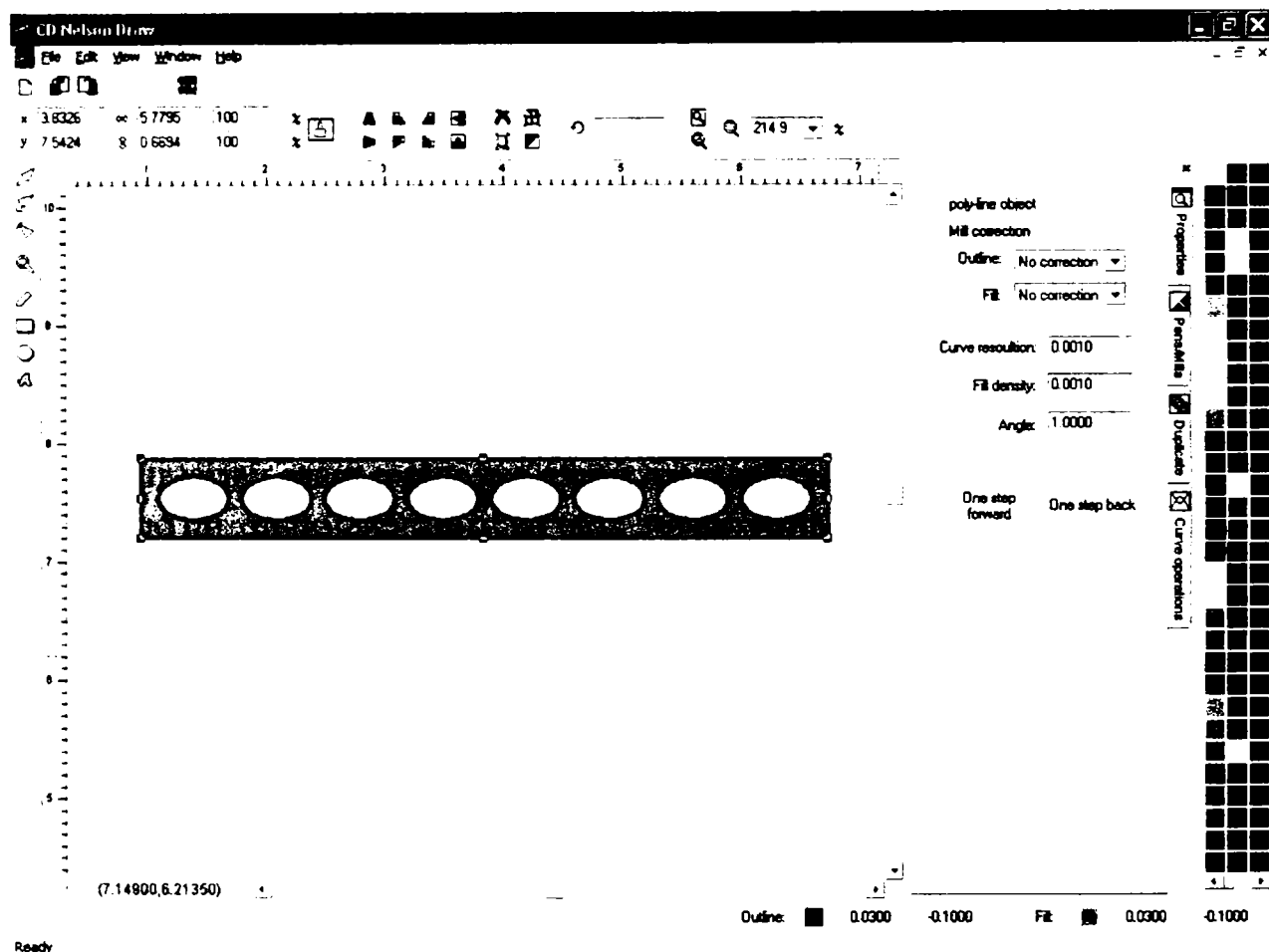


Fig. 3.18 Pregătirea pentru execuție a protezei LM 406 S din catalogul „Aesculap”, în CD Nelson Draw

Gruparea obiectelor, spre deosebire de combinarea descrisă anterior, care creează obiecte noi din cele existente, permite aplicarea simultană a unor operații comune tuturor obiectelor din grup. Pe lângă aceasta, obiectul rezultat în urma grupării păstrează toate caracteristicile obiectelor componente, fiind posibilă degruparea lor chiar în urma aplicării unor modificări. Între obiectele din grup se stabilesc relații de reciprocitate, de asemenea conservate în obiectul rezultat, chiar și în

urma modificărilor. Spre deosebire, încercarea de a sparge în părți componente un obiect rezultat prin combinarea unor obiecte existente va genera o sumă de obiecte alcătuite din lanțurile care aparțineau obiectului compus. Între acestea nu vor exista relațiile de interdependență din cadrul obiectelor componente de dinaintea combinării. De exemplu, prin combinarea literei O cu o altă curbă va rezulta un nou obiect. După spargerea sa în părți componente, litera O nu va mai fi restaurată, ci va fi compusă din două elipse de mărimi diferite, suprapuse, între care nu există o relație de reciprocitate, cum ar fi normal în cazul unui obiect care reprezintă această literă.

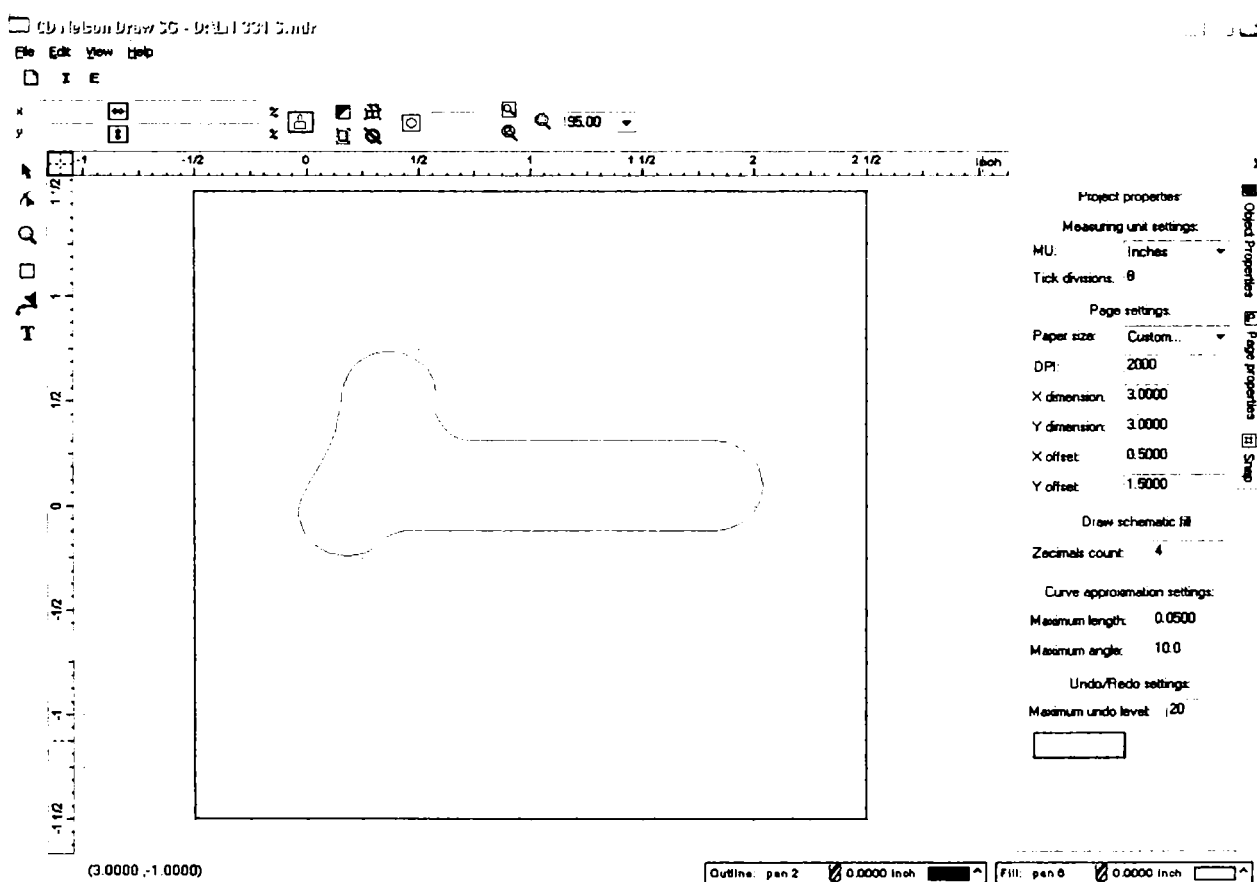


Fig. 3.19 Pregătirea pentru execuție a protezei LN 331 S, conform catalogului „Aesculap”

Unealta de text acceptă doar caractere reprezentate vectorial (*True Type*), acestea fiind văzute ca obiecte asupra cărora se pot aplica toate operațiile disponibile. Literele A, B, D, O etc. sunt exemple de obiecte compuse din lanțuri care se suprapun, unde umplerea trebuie făcută în mod clasic (adică fără umplerea suprafețelor de intersecție).

Unealta de desen liber (*Freehand Tool*) este, de asemenea, vectorială, creând lanțuri compuse din segmente deformabile Bézier. Unealta pune la dispoziție facilitatea legării acestora fie prin racord, fie prin unghiuri specificate.

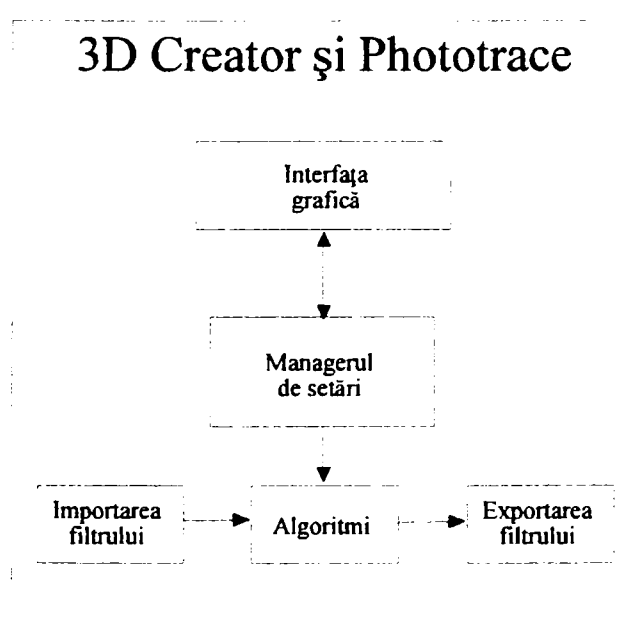
În încheiere, trebuie menționat faptul că uneltele puse la dispoziția utilizatorului sunt implementate sub forma unor biblioteci dinamice de legături (*Dynamic Link Libraries*). Această structurare permite dezvoltarea și includerea facilă a unor noi unelte, dacă necesitățile utilizatorilor impun acest lucru.

### 3.3.3 CD Nelson Phototrace

*CD Nelson Phototrace* este o aplicație care permite vectorizarea formatelor grafice raster, schema bloc fiind prezentată în figura 3.20. Prin modul său de construcție, echipamentul *Comp-U-Craft* poate urmări cu ușurință formate vectoriale, care pot fi considerate „native“, dar nu poate reprezenta intrinsec obiecte raster. Reprezentarea unor obiecte existente în natură se poate face prin diverse forme de captură (scanare, fotografie digitală etc.) care generează exclusiv imagini raster. De aceea, vectorizarea acestor imagini a fost o preocupare importantă a producătorilor de software pentru CAD, implementările fiind, însă, puține și cu rezultate care aproximează doar grosier imaginea raster supusă vectorizării. Realizarea implementării a fost ghidată după aplicația din suita firmei canadiene Corel Corp., care este de referință, reușindu-se obținerea unor rezultate similare. Vectorizarea se face prin fascicule de linii, prin detecție de contururi sau prin puncte.

Implementarea vectorizării prin fascicule de linii se face prin două metode selectabile de către utilizator. O primă metodă presupune un caroiaj de linii paralele, aflate la un unghi specificat față de axa de referință (orizontală) și la o

distanță minimă, de asemenea specificată. Atunci când algoritmul începe să traseze aceste linii, el cercetează mai întâi nivelul de gri (dat fiind specificul echipamentului, este aberant a se lucra altfel decât monocrom) al zonei parcurse. În funcție de intensitatea acestui nivel se alege distanța dintre două linii paralele succesive ca multiplu a distanței minime specificate. Lungimea segmentelor este corespunzătoare zonei de intersecție a dreptei suport cu suprafața având același nivel de gri.



**Fig. 3.20** Schema bloc a programelor *CDN Creator* și *CDN Phototrace*

A doua metodă presupune hașurarea după mai multe direcții, în funcție de intensitatea nivelului de gri dintr-o anumită zonă de imagine. Unghiul dintre aceste direcții poate fi specificat de utilizator, la fel ca și distanța dintre linii. Și aici lungimea segmentelor este dată de intersecția dintre dreapta suport și zona cu o anumită intensitate a nivelului de gri. Astfel, zonele mai întunecate vor beneficia de o hașurare pe mai multe direcții față de zonele mai luminoase.

Detecția de contururi se bazează pe explorarea imaginii raster și pe studiul funcției de luminozitate, calculându-se derivata acesteia. La depășirea unei valori de prag specificate se consideră că a fost atinsă o muchie, la sfârșitul explorării realizându-se interpolarea punctelor astfel detectate pentru generarea conturului. Vor rezulta multe curbe închise reprezentând marginile zonelor de o anumită luminozitate, desenul rezultat fiind asemănător cu al izohipselor de pe hărțile bidimensionale la care informația de relief este redată prin culoare.

Vectorizarea prin puncte va avea ca rezultat o matrice care, spre deosebire de formatul raster supus vectorizării, conține informații despre dimensiunea reală a imaginii, prin aceasta calculându-se rezoluția redării în puncte pe țol. Acest mod de vectorizare a fost generat de necesitatea reprezentării cu ajutorul unor periferice care nu pot cuantifica luminozitatea sau cromaticitatea unui pixel component al imaginii raster inițiale. Pe astfel de dispozitive (de exemplu, imprimante laser) luminozitatea unui punct inițial se aproximează printr-o submatrice de puncte. În cazul unei submatrice de  $8 \times 8$  puncte se pot obține, prin integrarea efectului obținut prin observarea de la distanță, 64 de nuanțe de gri. Evident că acest procedeu înrăutățește rezoluția reală, de 8 ori pentru exemplul prezentat mai sus. De aceea, imaginile raster par a avea o calitate mai bună când sunt afișate pe ecranul unui monitor (aproximativ 72 dpi pentru un monitor CRT de 19" cu o rezoluție de  $1024 \times 768$  de pixeli) decât imprimate de o imprimantă laser cu o rezoluție de 600 dpi. Vectorizarea prin puncte este implementată, la fel ca în cazul altor programe comerciale, prin trei metode: metoda culorii celei mai apropiate (*Nearest Color*), metoda difuziei ordonate (*Ordered Dithering*) și metoda Floyd-Steinberg [88], [89], [90].

Metoda culorii celei mai apropiate analizează luminozitatea fiecărui pixel din imaginea de intrare comparând-o cu o valoare de prag. Dacă valoarea este depășită va fi afișat un pixel în poziția corespunzătoare a imaginii de ieșire, iar în caz contrar acesta nu va fi afișat. Dacă între rezoluția imaginii de intrare și rezoluția specificată pentru imaginea de ieșire intervin diferențe, atunci înaintea aplicării acestui algoritm se interpune o operație de reeșantionare a imaginii inițiale. Algoritmul va genera întotdeauna la ieșire un pixel exprimat pe un bit în locul unui pixel exprimat pe mai mulți biți, din imaginea inițială. Algoritmul este simplu, iar

rezultatele sale sunt modeste, o comparație plastică fiind cea dintre o pictură executată în ulei și o grafică executată în tuș (de exemplu, prin xilogravură).

Metoda difuziei ordonate analizează luminozitatea și cromaticitatea unui pixel sau a unui grup de pixeli din imaginea sursă, înlocuindu-l cu o submatrice de pixeli în imaginea destinație. Pentru fiecare nivel de luminanță se stabilește nivelul cel mai apropiat din domeniul reprezentabil la ieșire. Fiecărei valori reprezentabile la ieșire îi corespunde un anumit șablon de pixeli din submatricea de ieșire. De exemplu, în cazul luminozității maxime nici un pixel din submatricea de ieșire nu este setat, în cazul luminozității minime toți pixelii sunt setați, iar în cazul unei luminozități de 50% submatricea de ieșire va avea aspectul unei table de șah. Această metodă oferă rezultate mult mai asemănătoare cu imaginea inițială decât în cazul metodei precedente. Neajunsul constă în faptul că, pentru o anumită luminozitate, șablonul submatricei este întotdeauna același. În cazul unor zone mai întinse având aceeași luminanță efectul cumulat al acestor șabloane identice creează structuri repetitive supărătoare, cu efect de interferență. Acestea devin cu atât mai vizibile cu cât imaginea este privită mai de aproape, când efectul integrării în ochiul uman a nivelului energetic al submatricei scade simțitor. Tot ca o comparație plastică, zone întinse de aceeași culoare dau impresia unui covor artizanal țesut cu motive geometrice regulate. Și în cazul acestei metode, dacă apare o neconcordanță între rezoluția de intrare și cea de ieșire înainte de aplicarea algoritmului, se va proceda la reșantionarea corespunzătoare a imaginii de intrare.

Neajunsul menționat mai sus este, practic, eliminat în metoda Floyd-Steinberg, prezentă în toate programele de renume destinate prelucrării imaginilor raster, cum ar fi: *Adobe Photoshop*, *Corel Photopaint*, *JASC Paint Shop Pro* etc. În principiu, și aici analiza se face la nivel de submatrice atribuindu-se valori de 0 sau 1 pixelilor de ieșire în funcție de rezultatul comparării cu o valoare de prag. Diferența constă în faptul că, eroarea aproximării este memorată și distribuită pixelilor din vecinătate, astfel încât să fie menținut echilibrul energetic global al submatricei analizate. Această distribuție nu se face aleator, ci conform unei matrice de distribuție specificată în algoritmul Floyd-Steinberg. Prin acest procedeu, structurile repetitive supărătoare menționate la metoda anterioară nu apar decât în cazuri

extrem de rare și niciodată pe întreaga suprafață a unei zone de luminozitate constantă. De asemenea, se îmbunătățește reprezentarea conturilor, ceea ce era un alt neajuns al metodei precedente. Elementul original al implementării noastre față de cea larg răspândită se referă la asocierea pixelilor din matricea rezultată cu un număr de stilouri (scule), ceea ce face ca rezultatul vectorizării să fie adaptat intim la capacitățile echipamentului și nu doar la un periferic de uz general, cum ar fi o imprimantă matriceală (fie ea cu impact, cu jet de cerneală, cu transfer termic sau laser).

### 3.3.4 CD Nelson 3D Creator

*CD Nelson 3D Creator*, cu o schemă bloc identică cu cea a aplicației *CD Nelson Phototrace* (figura 3.20), este o aplicație originală care folosește, de asemenea, la vectorizarea imaginilor raster oferind ca facilitate suplimentară posibilitatea adăugării informațiilor de adâncime (axa Z) pentru obiectele imaginii rezultate. Adăugarea informației de adâncime se face automat, pe baza luminozității pixelilor din imaginea raster, fiind posibilă obținerea unor bazoreliefuri din imagini pur bidimensionale.

Inițial se stabilește culoarea de fundal care va deveni cota de referință a bazoreliefului. Programul face apoi o repartizare a celorlalte nuanțe pe un număr prestabilit de niveluri pe axa Z, între două limite impuse, asociind aceste niveluri stilourilor corespunzătoare. La dispoziția utilizatorului nu stă, însă, și posibilitatea de asociere manuală a acestor niveluri cu scopul corectării unor erori care pot apărea în urma executării procedurii automate. Vectorizarea se face prin metoda fasciculului de linii paralele aflate la unghiuri de  $0^\circ$  sau de  $90^\circ$  față de orizontală. Spre deosebire de metoda descrisă anterior, acestor linii li se adaugă informația de adâncime, după cum s-a arătat mai sus. Astfel, pot fi obținute, din desene bidimensionale ușor de desenat sau de capturat, bazoreliefuri care pot reprezenta medalioane, ștanțe, sigilii ș.a.m.d. Practic, *CD Nelson 3D Creator* este un filtru simplu, care execută automat vectorizarea 2,5 D, pe baza unui set restrâns de parametri, fără posibilitatea unui control manual. Acest lucru limitează în oarecare măsură paleta aplicațiilor, dar acest neajuns este compensat de simplitatea



deosebită a utilizării, un începător absolut putând să creeze primele modele imediat ce a intrat în posesia echipamentului.

### 3.3.5 CD Nelson 3D Shaper

CD Nelson 3D Shaper extinde funcțiile lui CD Nelson 3D Creator, în sensul că, pe lângă vectorizare, oferă și facilități de editare. Schema bloc este prezentată în figura 3.21. Comparând această schemă bloc cu cea a programului CD Nelson 3D Creator, rezultă că și această aplicație este gândită global ca un filtru, în timp ce local permite modificarea parametrilor de filtrare, a obiectelor importate sau rezultate, precum și previzualizarea rezultatului înaintea exportului propriu-zis.

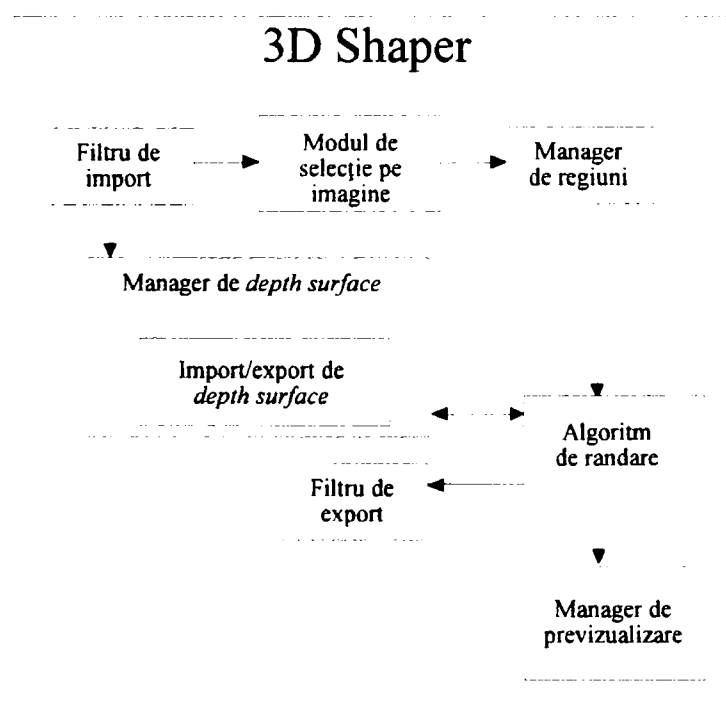


Fig. 3.21 Schema bloc a CDN 3D Shaper

Și în acest program se poate încărca o imagine raster careia, în urma vectorizării, să i se adauge informație de adâncime (figura 3.22).

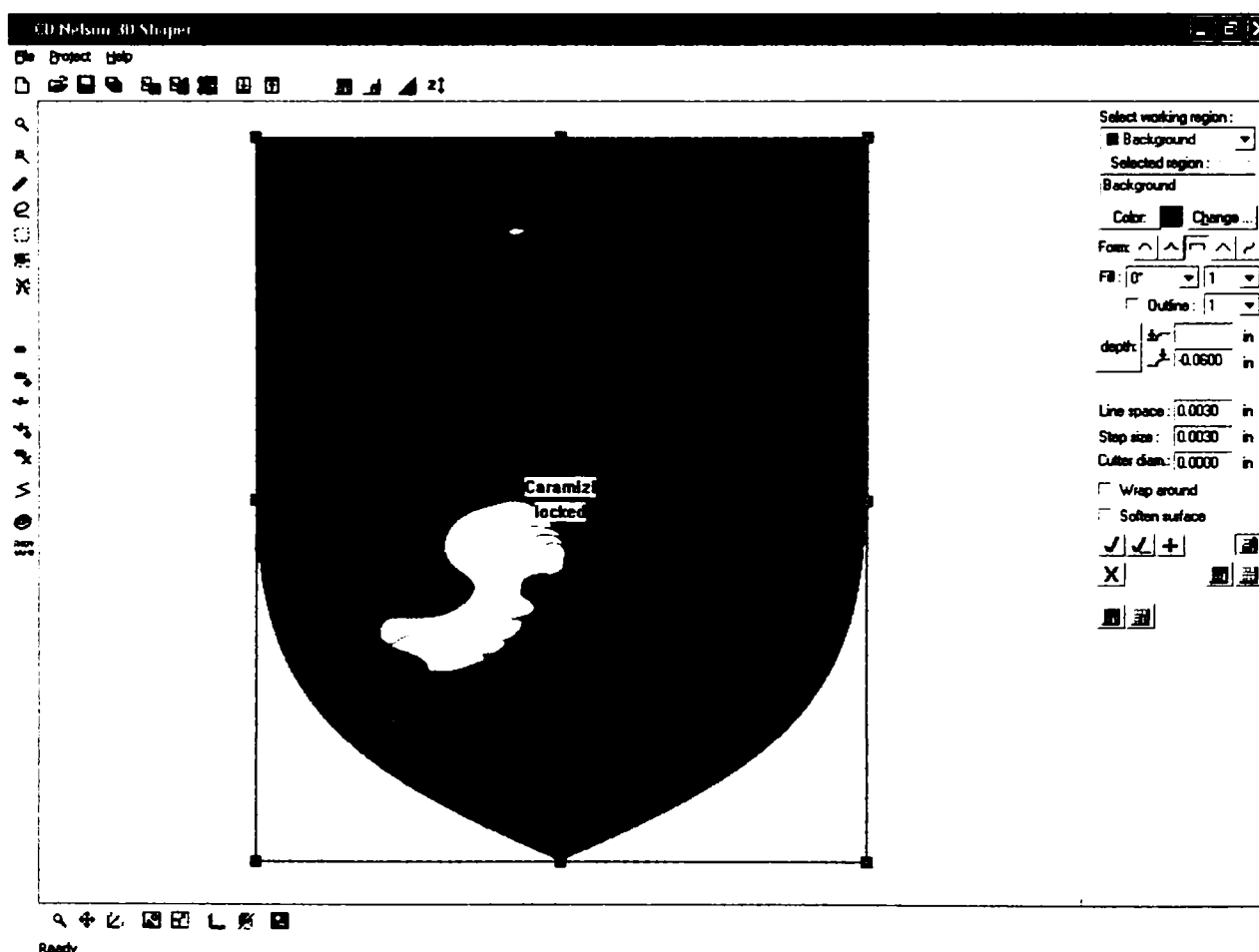


Fig. 3.22 Imagine raster 2D importată în *CD Nelson 3D Shaper*

Filtrele existente în programul precedent sunt disponibile și aici, configurarea parametrilor fiind mai precisă. Un număr de unelte puternice de editare stau la

dispoziția utilizatorului, permițând selecții rectangulare, poligonale (regulate), libere (după curbe Bézier) sau bazate pe detecția conturului. Cu ajutorul acestor selecții imaginea dată poate fi împărțită în zone, configurarea filtrului de vectorizare putând fi făcută separat pentru fiecare zonă (figura 3.23).

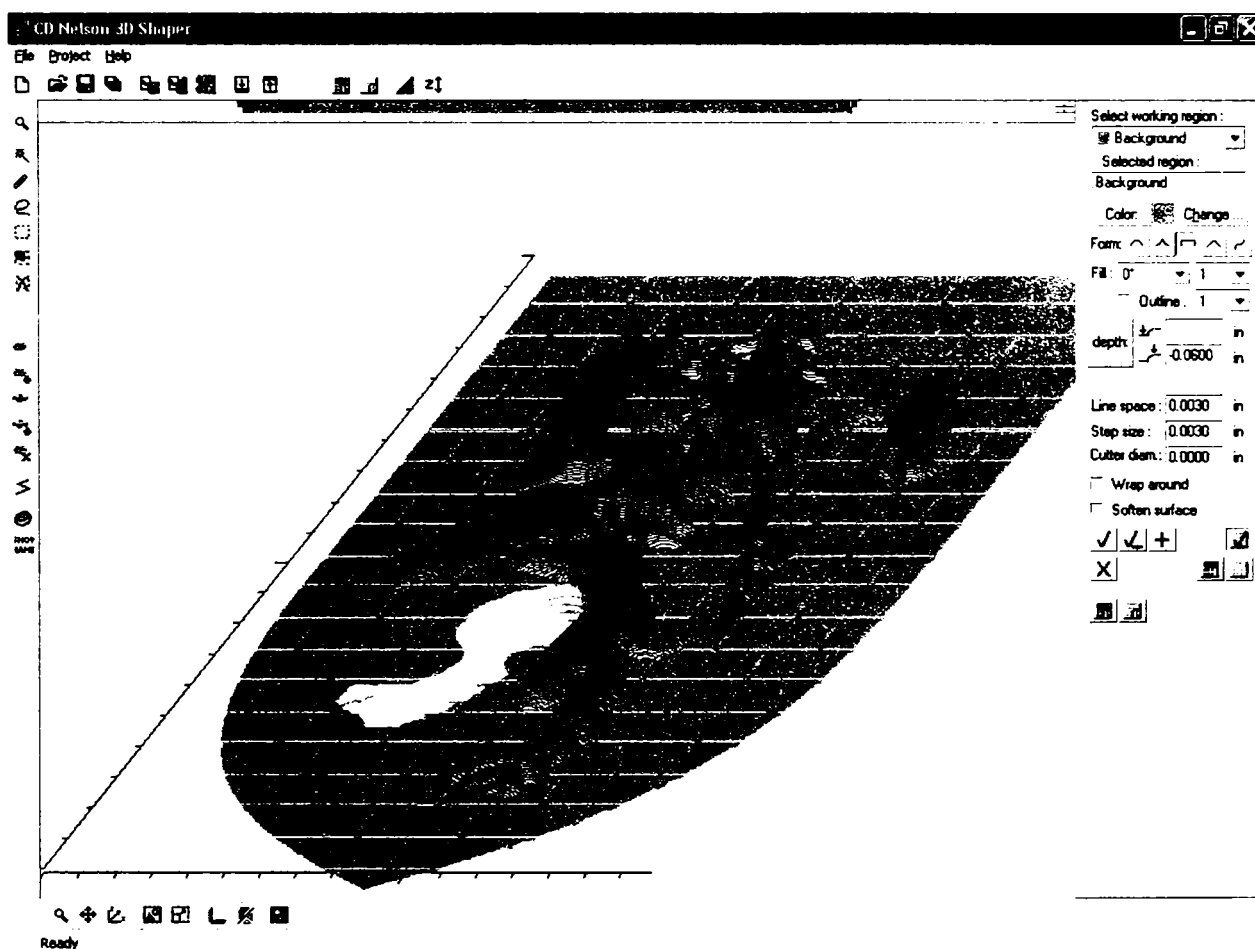


Fig. 3.23 Ilustrarea posibilității de lucru cu regiuni în *CD Nelson 3D Shaper*

Acest program permite modificarea sau corectarea manuală a rezultatului vectorizării. Corecția nu se face direct, prin interfață, ci indirect, prin intermediul unei „suprafețe de adâncime“ (*Depth Surface*). Această entitate poate fi salvată într-un fișier și reprezintă o „mască“ de adâncime pentru regiunea a căreia i se aplică. Practic, suprafața de adâncime este o formă a cărei informație de adâncime poate fi însumată echiponderal sau ponderal cu cea obținută din imaginea inițială

prin aplicarea filtrului asupra regiunii respective. Chiar dacă inițial acest lucru poate părea greoi, el are două avantaje majore. În primul rând, permite un control exact, prin forma aleasă pentru suprafața de adâncime, a corecției obținute. Dacă acest lucru s-ar face direct prin interfața om-mașină precizia ar fi puternic influențată de rezoluția acesteia, precum și de perspectiva și magnitudinea sub care este privit obiectul (regiunea) supus corecției. În al doilea rând, posibilitatea salvării suprafețelor de adâncime în fișiere separate va conduce, după un timp oarecare de folosință pe sarcini concrete, la crearea unor biblioteci de astfel de suprafețe, care vor accelera dramatic lucrul cu acest program, în condițiile conservării preciziei de prelucrare.

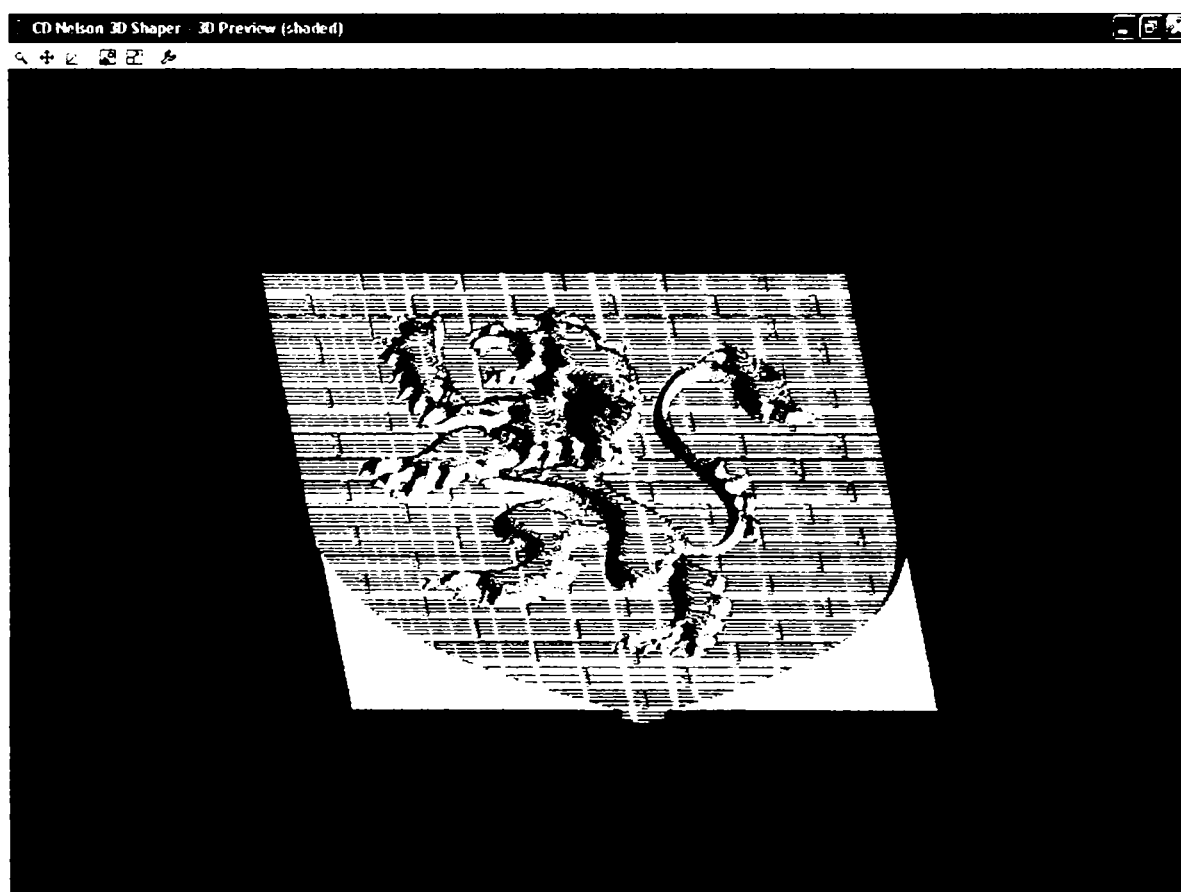


Fig. 3.24 Previzualizarea rezultatului final în *CD Nelson 3D Shaper*

De exemplu, unul dintre accesoriile necesare tratamentului fracturilor oaselor lungi se prezintă sub forma unor reglete de lungime variabilă, având practicate la intervale egale găuri alungite pentru fixarea pe os cu ajutorul șuruburilor autofiletante (figura 3.18). Regleta (LM 406 S sau LM 309 S din catalogul „Aesculap”) are o curbura obținută prin „mularea“ pe un cilindru cu generatoarea paralelă cu axa sa longitudinală. Această formă este necesară unui contact mai bun cu osul lung (după o suprafață, nu după o linie), care să ofere o imobilizare mai bună a acestuia, până la vindecare.

O altă facilitate importantă, de asemenea originală, se referă la faptul că programul poate calcula traseele unei scule date, ținând cont de grosimea acesteia și afișând grafic rezultatul. Astfel, se poate simula execuția unui anumit proiect, cu o anumită sculă, într-un anumit tip de material de o formă inițială dată. Se pot studia, astfel, cu costuri minime, degroșările necesare și forma suprafeței rezultate, precum și forma finală a obiectului și calitatea suprafețelor obținute (figura 3.24).

Este, de asemenea, notabil faptul că programul poate genera automat atât forma pozitivă a proiectului, cât și forma sa negativă, ceea ce este deosebit de util în proiectarea unor scule de injecție, de modelare sau de ștanțare, precum și a electrozilor pentru prelucrarea prin electroeroziune.



## 4. Fixarea fracturilor cranio-maxilo-faciale cu implante metalice

Răniile maxilo-faciale pot să implice scheletul facial, dinții și țesutul moale existent. Există numeroase sisteme de clasificare și, majoritatea, se concentrează pe caracterizarea modelului fracturii faciale [74]. Fracturile închise și simple pot fi tratate prin metode conservative, cea mai simplă dintre ele fiind fixarea intermaxilară pentru câteva săptămâni. Pentru următoarele cazuri este indicată fixarea internă stabilă funcțional [53], [73]:

- fracturi multiple sau sfărâmate ale mandibulei și maxilarului;
- fracturi totale ale feței (*panfaciale*);
- fracturi puternic deschise;
- fracturi de dizlocare ale zonei medii a feței, etc.

Tratamentul fracturilor urmărește recuperarea completă și rapidă a funcțiilor scheletului, consolidarea zonei afectate într-o formă cât mai apropiată de cea anatomică. O fractură intra-articulară impune o reconstrucție precisă a suprafeței articulare pentru a asigura buna funcționare după recuperare. Orice neconcordanță a suprafețelor articulate generează apariția unor tensiuni foarte ridicate inducând, astfel, efecte post traumatice neplăcute [50], [64], [66].

Scopul general al tratamentului constă în fixarea anatomică timpurie a fragmentelor fracturate, menținerea poziției după fixare și garantarea uniunii lor în poziția dorită. Imobilizarea completă a fracturii impune ca fixarea să se facă direct pe locul fracturii. Dispozitivele de fixare trebuie să se comporte în mod corespunzător la sarcinile care apar datorită cerințelor unei situații specifice în funcționarea zilnică. Pentru selectarea corectă a implantului este necesară estimarea mărimii și a variației forțelor de încărcare pentru fiecare caz particular [55], [67], [71].

Există situații în care, după o fractură, osul rămâne capabil să rezolve sarcinile de compresie, iar implantul trebuie să înlocuiască doar lipsa de continuitate a țesutului osos și să asigure nedeformarea acestuia. Această împărțire a sarcinilor

Între os și implant permite ca dimensiunile implantului să fie mult mai reduse decât în cazul în care ar prelua în întregime solicitările mecanice. În cazul unui defect al osului și în situația unor zone fărâmițate placa pentru implant este supusă la deformări care, de asemenea, trebuie evitate [9], [36].

## 4.1 Materiale folosite în implantologie

În cazul fixării unei fracturi, materialul pentru implant trebuie să fie rezistent și ductil, adaptabil la suprafața osului și biocompatibil. Tabelul 4.1 prezintă clasele de biomateriale folosite pentru implantări [1], [19], [52], [70].

**Tabelul 4.1** Clase de biomateriale

Aliaje feroase	Fier (Fe)
	Oțel (Fe + C)
	Oțel inoxidabil (Fe + C + Cr (+ Ni))
Aliaje cobalt-crom	Aliaje Co-Cr-Mo turnate (Vitallium)
	Aliaje Co-Cr-Mo forjabile
	Aliaje Co-Cr-W-Ni forjabile
	Aliaje Co-Cr-Ni-Mo forjabile
	Aliaje Co-Ni-Cr-Mo-W-Fe forjabile
Titan și aliaje de titan	Titan comercial pur
	Ti6A14V
Materiale polimerice biodegradabile	Acid polilactic (polilactidă) (PLA)



Acid poliglicolic (poliglicolidă) (PGA)
---

Pentru ca aceste materiale să poată fi folosite cu succes, trebuie să prezinte proprietăți fizice care să le permită să realizeze funcția pentru care au fost implantate și să fie biocompatibile [33], [35], [83]. Aceste materiale de implant sunt biocompatibile dacă ele nu afectează în mod negativ mediul fiziologic și dacă mediul, la rândul lui, nu are efecte distructive asupra materialului [43], [82].

Dintre cele mai utilizate materiale metalice pentru implant se pot menționa oțelurile inoxidabile și aliajele de titan. Autorul tezei s-a oprit asupra oțelului inoxidabil datorită probabilității de prelucrare pe utilajul conceput, care nu impune pentru aceste materiale scule speciale. S-au făcut teste și pe aliaje de titan cu puritate de 99,9%, dar uzura sculelor a fost deosebit de pronunțată și nu se justifică pe acest utilaj.

S-au studiat diferite tipuri de oțel inoxidabil care conțin, în principal, fier (minimum 62,5%), crom (în medie 17,6%), nichel (maximum 14,5%), molibden (în medie 2,8%) și alte componente în cantități foarte mici [53], cea mai cunoscută variantă fiind oțelul 316L. Acesta a fost dezvoltat în anii '50 prin reducerea conținutului de C de la 0,08% la 0,03%, care i-a permis o mai bună rezistență la coroziune [1], [19]. Se sintetizează în Tabelul 4.2 câteva tipuri de oțeluri inoxidabile recunoscute în literatura de specialitate [19], dintre care s-a ales pentru studiul de caz oțelul 316L.

**Tabelul 4.2** Oțeluri inoxidabile utilizate ca biomateriale

	Fe	Cr	Ni	C	Mo	Observații
--	----	----	----	---	----	------------

Austenitice	301	73	16–18	6–8	0,15		— conțin Ni pentru stabilizarea structurii
	302	71	17–19	8–10	0,15		— ductilitate și deformabilitate excelente
	316	64	16–18	10–14	0,08	2–3	— rezistență mare
	316L	64	16–18	10–14	0,03	2–3	— foarte scumpe
Feritice	405	85	12–14		0,08		— rezistență la coroziune și duritate bună
							— ductilitate medie
Martensitice	410	86	11,5–13,5		0,15		— sunt mai ieftine

Oțelurile menționate la categoriile feritice și martensitice, deși mai ieftine, nu sunt atât de răspândite din cauza deformabilității mai accentuate decât a celor austenitice, în speță, oțelul ales de autorul tezei.

## 4.2 Elemente de fixare

Tipurile elementelor de fixare folosite pentru oasele scheletului facial, dar și pentru oasele lungi la fracturile de extindere redusă, se pot grupa în:

- plăcuțe de diferite forme, alese în funcție de morfologia osului. Forma plăcilor pentru aplicațiile specifice craniului și zonei medii a feței corespunde plăcilor de adaptare [2], [56], [72]: X, Y, dublu-Y, H, T, L (curbate la stânga sau la dreapta, folosite pentru marginea orbitei) și drepte (figurile 4.1 și 4.2) [53].



Fig. 4.1 Plăci de adaptare drepte

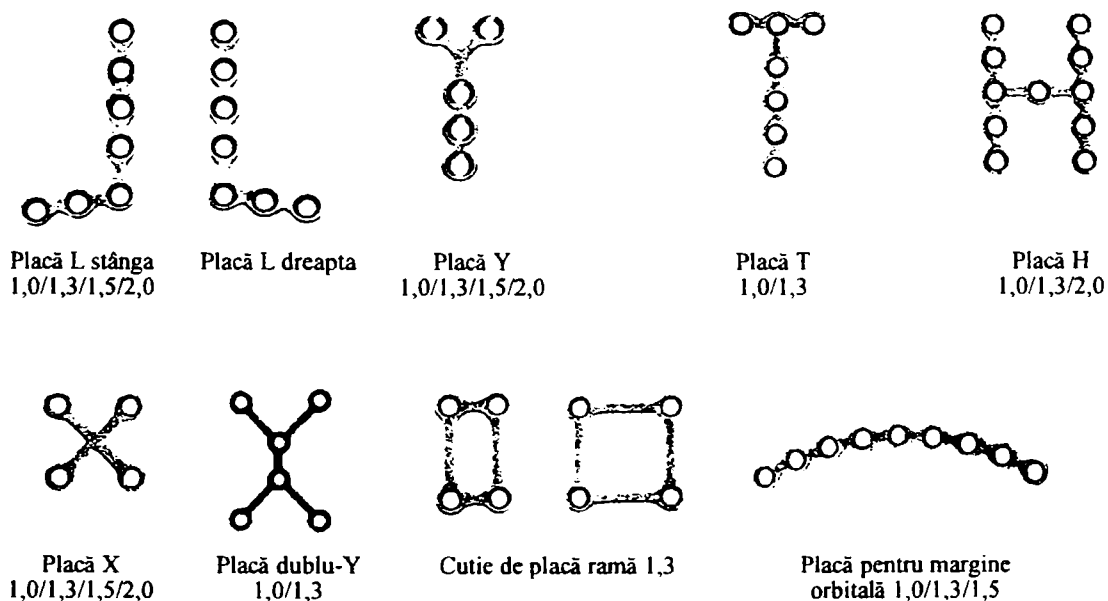


Fig. 4.2 Plăci de adaptare de diferite forme

Figura 4.3 [53] prezintă configurații speciale de plăci (plăci pentru fundul orbitei [51], pentru acoperirea găurilor, ecrane, plăci zigomatice pentru compresie dinamică) [38].

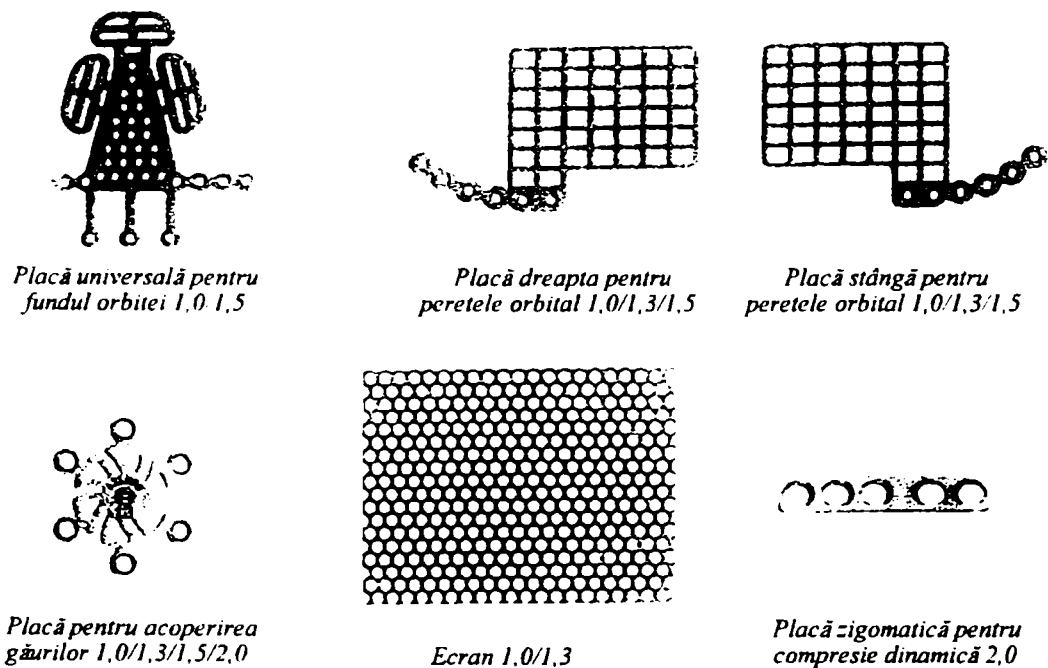


Fig. 4.3 Configurații speciale de plăci

Plăcile pentru fracturile mandibulare sau pentru reconstrucția defectelor variază în grosime între 1,0 mm (sistemul 2.0) și 3,0 mm (sistemul THORP) [11], [14], [41] (figura 4.4 [53]).

Alte plăci speciale au creștături la margini, care permit îndoirea pe cele trei axe, inclusiv rotirea de-a lungul marginii și răsucirea (figura 4.5 [53]). Designul lor este asemănător cu cel al plăcilor de reconstrucție, numai că sunt mai puțin rezistente și au o grosime de 2,0 mm [44], [63].

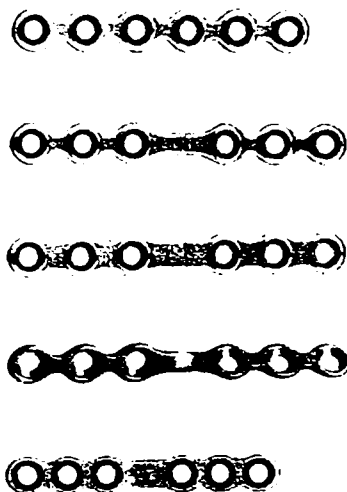


Fig. 4.4 Plăci mandibulare 2.0

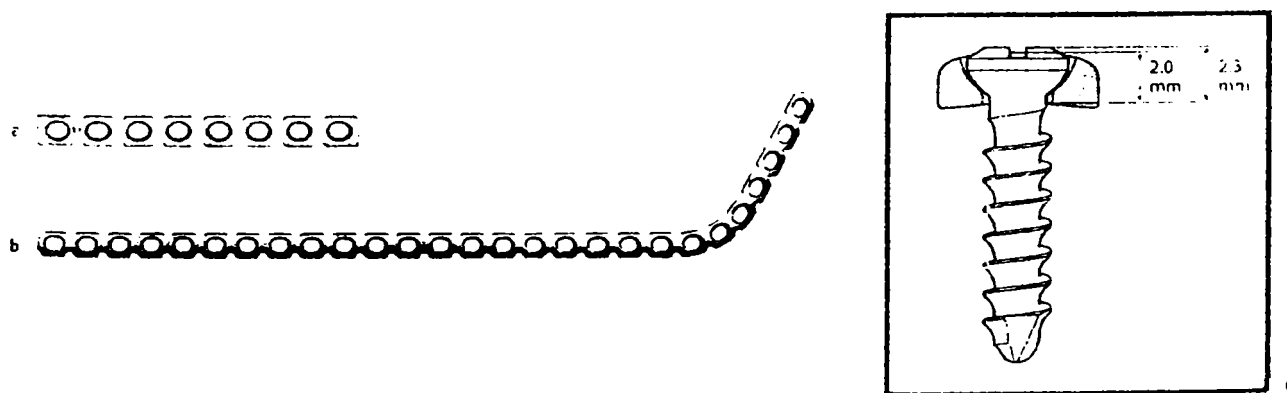


Fig. 4.5 Plăci pentru fracturi universale pentru șuruburi de 2,4: drepte a), preîndoite b) și profil placă/șurub c)

Plăcile de reconstrucție pentru șuruburile de 2,7 sunt ușor mai rezistente decât cele de 2,4. Grosimea unei astfel de plăci este

de 3,1 mm și este disponibilă atât din titan, cât și din oțel inoxidabil (figura 4.6 [53]).

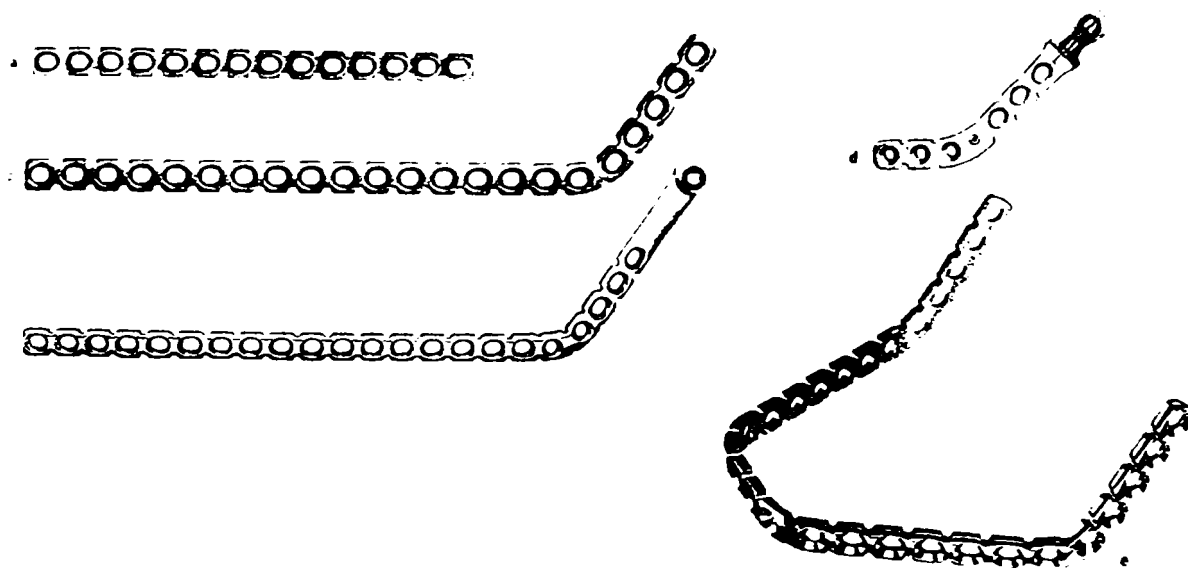


Fig. 4.6. Plăci de reconstrucție 2,7: dreaptă a), îndoită b), c) și d) și pentru înlocuirea totală a mandibului e)

- șuruburi speciale de fixare în os, a căror geometrie depinde de tipul de os fracturat. Dimensiunea șuruburilor folosite în zona craniană și în zona medie a feței variază între 1,0 și 2,0 mm. Toate aceste șuruburi au vârfuri cu caneluri pentru autofiletare, capetele șuruburilor au canelură în formă de cruce, iar pasul șuruburilor mici este mai mic decât al celor mai mari (figura 4.7) [53].

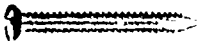

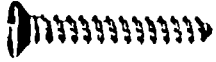

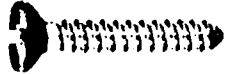



Șurub	Filet ( $\phi$ în mm)	Miez ( $\phi$ în mm)	Pas ( $\phi$ în mm)	Cap ( $\phi$ în mm)	Forma capului
					
Șurub standard	1,0	0,7	0,25	1,6	
Șurub de urgență	1,2	0,9	0,25	1,6	
					
Șurub standard	1,3	0,9	0,5	2,4	
Șurub de urgență	1,27	1,1	0,6	1,6	
					
Șurub standard	1,5	1,1	0,5	3,0	
Șurub de urgență	2,0	1,4	0,6	3,5	
					
Șurub standard	2,0	1,4	0,6	3,5	
Șurub de urgență	2,4	1,7	1,0	3,5	

Fig. 4.7 Șuruburi cranio-maxilo-faciale

Dimensiunea șuruburilor pentru mandibulă variază între 2,0 mm și 4,0 mm. Pasul șurubului de 2,0 mm pentru mandibulă este de 1,0 mm, spre deosebire de pasul șurubului cu aceeași dimensiune folosit pentru zona medie a feței care are pasul de 0,6 mm. Șuruburile de 2,0 mm și cele de 2,4 mm au canelura capului în formă de cruce, șurubul de 2,7 mm are canelura hexagonală, iar

șurubul de tip THORP are o configurație specială pentru aplicarea șurubului de blocare (figura 4.8) [53].



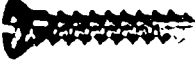





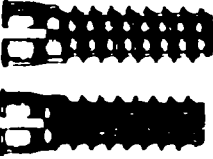
Șurub	Filet ( $\phi$ în mm)	Miez ( $\phi$ în mm)	Pas ( $\phi$ în mm)	Cap ( $\phi$ în mm)	Forma capului
					
Șurub standard	2,0	1,4	1,0	3,5	
Șurub de urgență	2,4	1,7	1,0	3,5	
					
Șurub standard	2,4	1,7	1,0	4,0	
Șurub de urgență	2,7	1,9	1,0	4,0	
					
Șurub UniLOCK 2,4	2,4	1,7	1,0	4,0	
Șurub UniLOCK 3,0	3,0	2,4	1,0	4,0	
Șurub de urgență	Nu există				
					
Șurub standard	2,07	1,9	1,0	5,0	
Șurub de urgență	3,2	2,1	1,25	5,0	
					
Șurub THORP	4,0	3,0	1,25	4,5	
Șurub de urgență	Nu există				

Fig. 4.8 Șuruburi mandibulare



Figura 4.2 prezintă un model de fixare a unei fracturi folosind plăci și șuruburi. Geometria specială a unei găuri a plăcii (figurile 4.9.a–c)) [53] coroborată cu plasarea excentrică a șurubului (figura 4.9.d)) [53] permite compresia interfragmentară pe direcție axială pe măsură ce șurubul este introdus în os (figura 4.9.e, f)) [53]. Gaura pentru șurub este o secțiune dintr-un cilindru înclinat și unul orizontal care permite mișcarea în jos și orizontală a semisferei, care reprezintă partea inferioară a capului șurubului (figura 4.9.c)) [53].

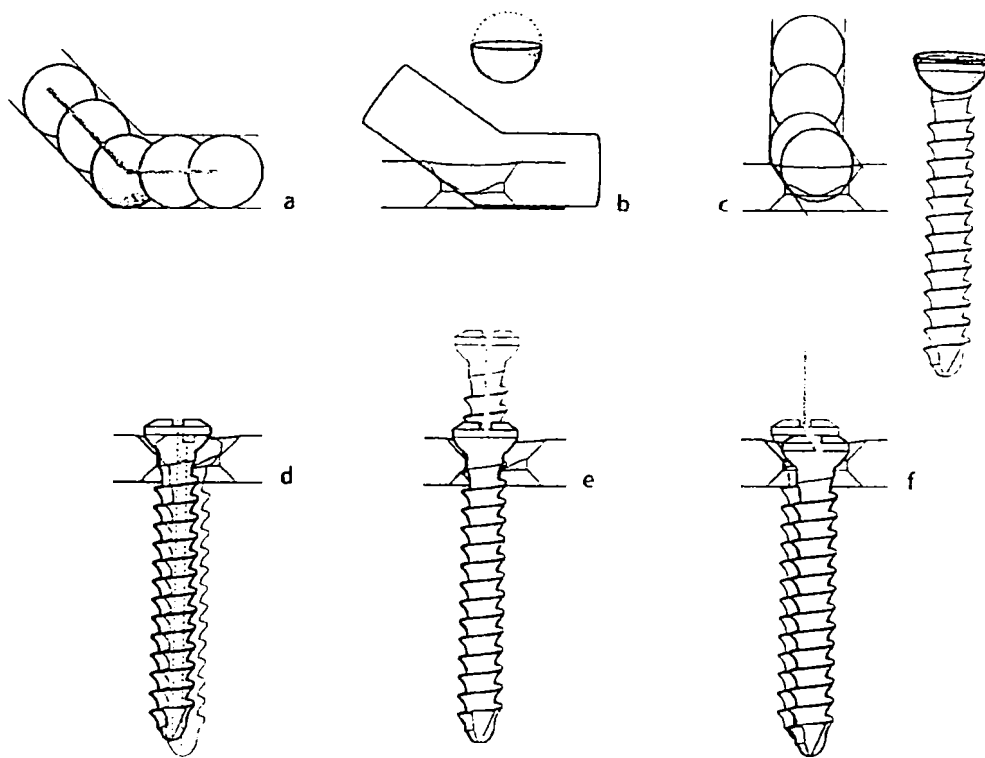


Fig. 4.9 Compresia fragmentelor fracturii cu plăci și șuruburi

Plasarea corectă și precisă a șuruburilor este unul dintre pașii cei mai importanți în fixarea plăcii, și, deci, în fixarea fracturilor. Trebuie foarte bine înțeles faptul

că stabilitatea și fixarea depind de rigiditatea plăcii, dar, în mult mai mare măsură, depind de capacitatea de menținere a șuruburilor.

### **4.3 Studiu de caz**

Așa cum s-a mai arătat, versatilitatea echipamentului *Comp-U-Craft* permite realizarea unui mare număr de piese și de operații. Pentru a părăsi planul general și a face o introspecție concretă în modul de utilizare al acestei mașini, se va prezenta modul de realizare a unei proteze asemănătoare modelului de referință LN 331 S din catalogul „Aesculap”. Acest parcurs va fi prezentat în detaliu, de la concepție și până la realizarea fizică, cu observația că se vor folosi exclusiv resursele hardware și software ale echipamentului în discuție.

Proiectul începe cu realizarea desenului piesei în aplicația *CD Nelson Draw*. Analizând conturul piesei, se observă cu ușurință că se compune din câteva elemente simple: drepte, arce și cercuri. Se trece la trasarea acestora în cadrul unui proiect nou. Înlănțuirea obiectelor (segmente și arce) într-o curbă complexă se face deosebit de ușor față de alte programe existente pe piață, datorită modului predictiv de desenare. Imaginea obiectului proiectat este prezentată în figura 4.10.

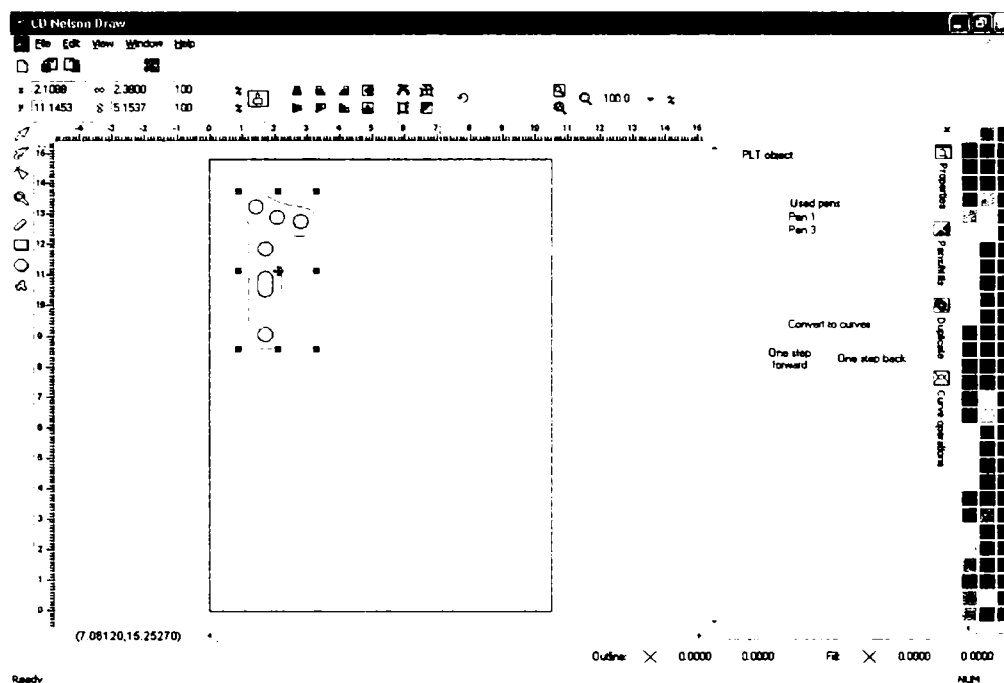


Fig. 4.10 Desenul protezei LN 331 S

În acest moment avem desenul piesei finale, cu cotele dorite. În vederea execuției ulterioare trebuie să se țină seama de faptul că nu există scule ideale (de grosime nulă). În consecință, proiectul va trebui să țină seama de diametrul frezei utilizate pentru așchiere pentru a se obține, în final, o piesă cu cotele din desen. În acest scop se selectează conturul exterior, se apelează meniul derulant *Edit*, se selectează *Cutter Compensation*, iar în fereastra care se deschide se specifică diametrul frezei, precum și poziția (interioară sau exterioară) față de conturul selectat. Procedura se repetă pentru găuri, după o selecție multiplă, cu deosebirea că se va specifica poziția interioară a frezei față de conturul găurilor. În figura 4.11 se poate observa atât forma finală a piesei, cât și forma piesei care ține cont de grosimea sculei așchietoare.

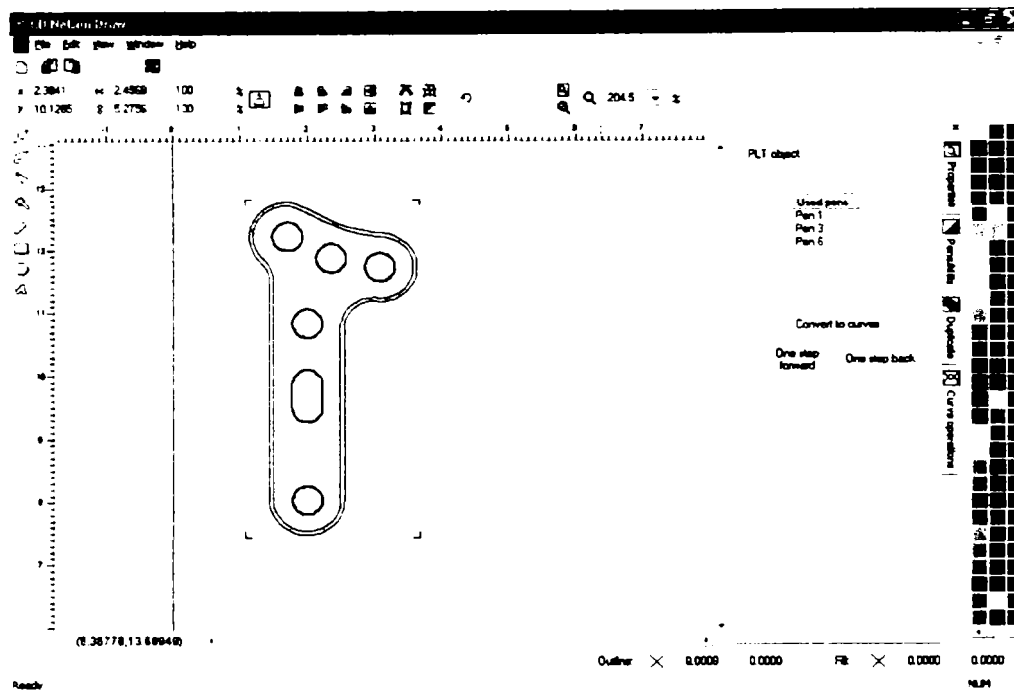


Fig. 4.11 Imaginea piesei finale însoțită de corecția de sculă

Acum partea de CAD a proiectului este încheiată, deoarece piesa se execută din tablă de oțel inoxidabil de uz chirurgical, cu grosimea de 0,8 mm, folosind o freză cilindrică, dintr-o singură trecere. În cazul protezelor din tablă groasă (2÷5 mm) de titan (care are duritate ridicată), decuparea piesei ar fi fost făcută din mai multe treceri. Acestea sunt necesare din cauza faptului că avansul sculei în materialele dure trebuie să fie semnificativ mai mic, în caz contrar căldura degajată modificând proprietățile sculei și provocând ruperea ei. În figura 4.12 este dată fotografia aceleiași piese, executată parțial din tablă de titan de 3 mm grosime, în care scula (freză cilindrică Widia de 2 mm diametru) s-a rupt la începutul celei de-a treia treceri.

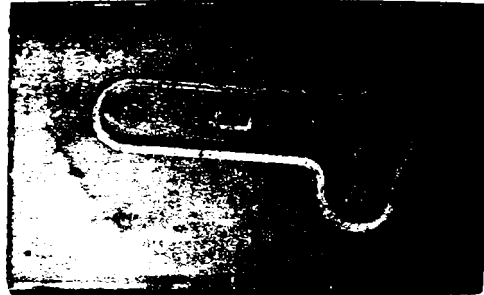


Fig. 4.12 Executarea protezei LN 331 S din tablă de titan

În ipoteza în care se dorește obținerea unor contururi teșite, una dintre treceri trebuie executată cu o freză conică sau tronconică, cu specificarea unor corecții separate de sculă și de adâncime, pentru a se obține teșitura dorită. De regulă, aceasta este prima dintre treceri, pentru că, după decuparea finală, prinderea piesei ar putea ridica probleme.

O dată proiectul terminat este necesară exportarea sa către partea de CAM a echipamentului *Comp-U-Craft*, mai precis către aplicația *CD Nelson Commander*. Pentru a automatiza această operație, în *CD Nelson Draw* este prezent butonul *CDN COM* care, prin activare, va exporta proiectul în format HPGL, va invoca aplicația *CD Nelson Commander* (care nu poate exista decât într-o singură instanță pe un calculator) și va deschide în aceasta fișierul HPGL proaspăt salvat, după cum se observă din figura 4.13.

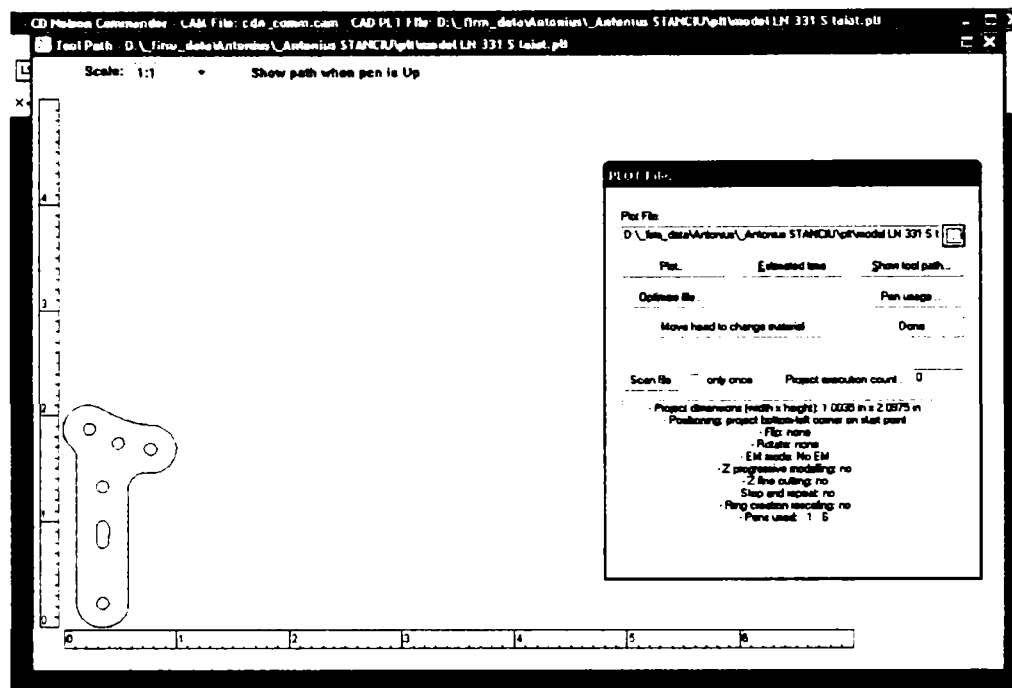


Fig. 4.13 Proiectul CAD importat în aplicația CAM

Înainte de a porni la execuția proiectului trebuie făcute toate setările necesare. Acestea se împart în două mari categorii: setări ale proiectului și setări ale mașinii. În categoria setărilor mașinii se află acele setări care trebuie făcute, de regulă, o singură dată, ele fiind dependente de echipament și independente de proiect. Astfel, aici se reglează rezoluția echipamentului (dependentă de tipul motoarelor pas cu pas utilizate și de tipul șurubului conducător aferent, exprimată în pași pe unitatea de distanță), viteza inițială maximă, viteza maximă de palier, precum și accelerația maximă.

Trebuie menționat că aceste valori sunt valori limită absolute aferente situației în care echipamentul nu are sarcină utilă. Cu alte cuvinte, este vorba de situația în care scula este deplasată „în aer“, nu prin material. Fereastra de dialog în care se specifică aceste valori este reprezentată în figura 4.14.

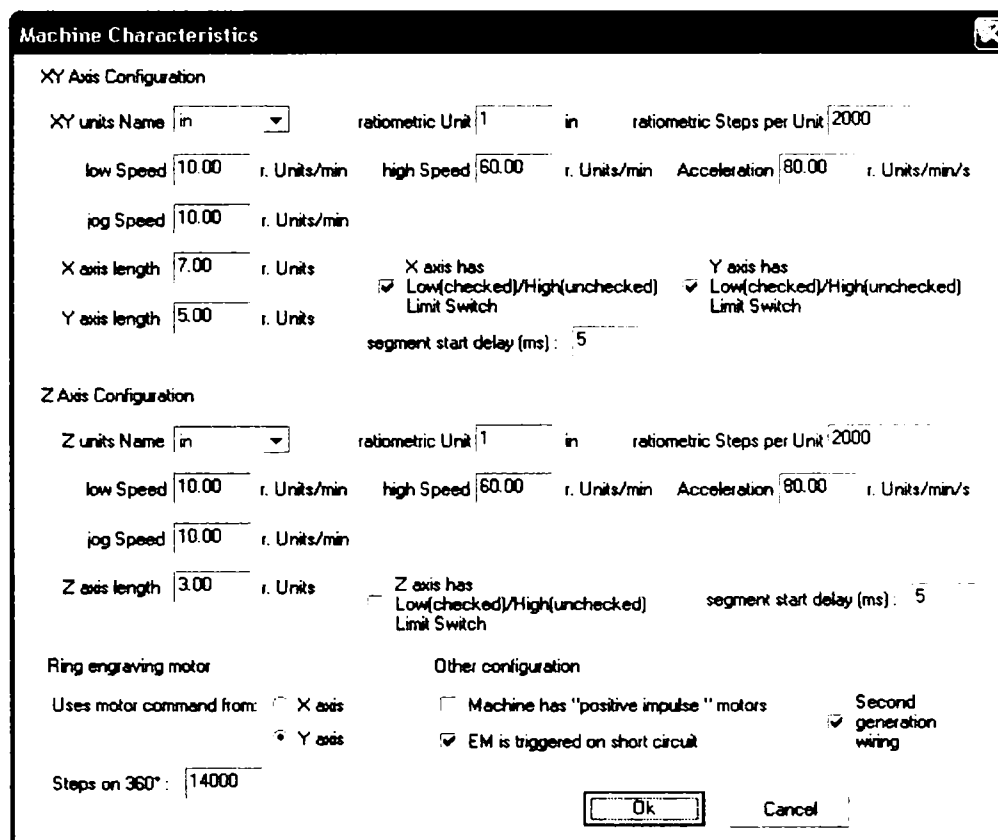


Fig. 4.14 Setările echipamentului

Setările proiectului concretizează activitatea de realizare a piesei prin specificarea valorilor în situația în care echipamentul *Comp-U-Craft* are sarcină utilă (adică atunci când scula trece prin material), conform figurii 4.15.

Astfel, pe lângă valorile corespunzătoare (în această situație) ale vitezei inițiale, accelerației maxime și vitezei de palier aferente fiecărui stilou în parte, mai trebuie specificați un număr de parametri, cum ar fi: asocierea dintre stilouri și scule, amplasarea reperelor de poziționare și centrare, amplasarea proiectului față de poziția de repaus a sculei, pasul dintre trecerile multiple, specificarea pasului uneltei de finisare, specificarea modului de comandă a motorului sculei și

specificarea numărului de repetiții (iar în caz afirmativ și a amplasării lor) a proiectului.

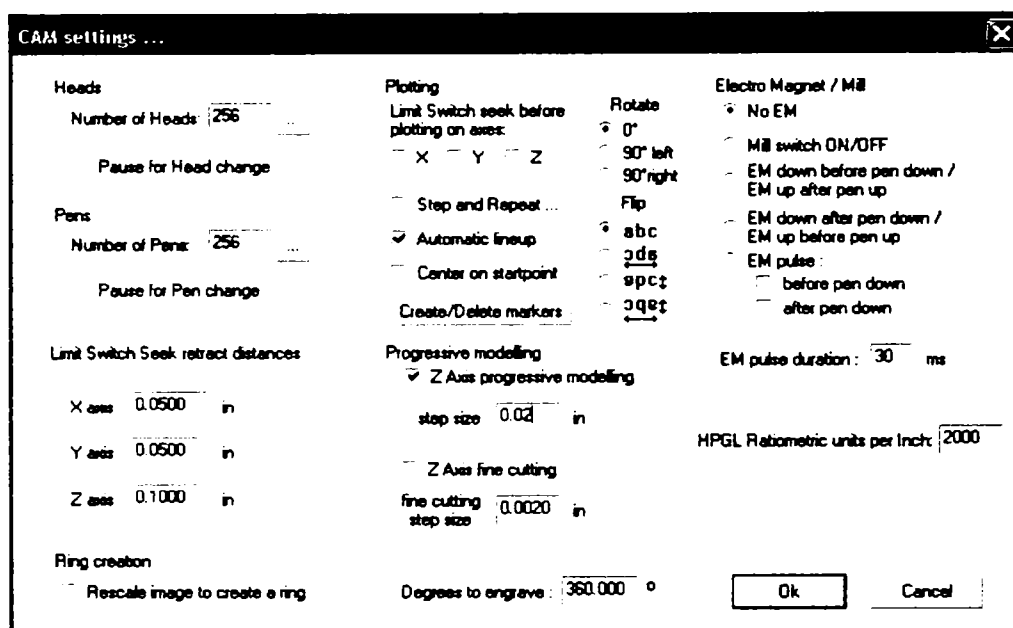


Fig. 4.15 Setările proiectului

De menționat că asocierea dintre stilouri și scule nu este biunivocă, unei scule putându-i-se asocia un număr oarecare de stilouri. Stilourile au specificate, pe lângă parametrii deja menționați, informații de adâncime, precum și referitoare la culoarea de afișare în fereastra de previzualizare. De asemenea, valorile vitezelor și accelerațiilor sunt diferite, fiind specificate separat pentru axele X și Y și separat pentru axa Z, toate acestea reflectându-se în figura 4.16.

În cazul piesei executate din tablă subțire de oțel inoxidabil s-a folosit un singur stilou asociat unei singure scule, mai precis o freză Widia de 1 mm, acționată de un motor electric de frezare alimentat la 220 V și 50 Hz, cu puterea nominală de 600 W, având o turație fixă de 30.000 de rotații pe minut. Viteza inițială și viteza de palier au fost setate la aceeași valoare (redușă) de 0,5 țoli pe minut, accelerația rezultată fiind, evident, nulă. Cu aceste valori a fost necesară protecția suplimentară a sculei și a piesei împotriva modificărilor termice cu ajutorul unei pelicule de ulei special pentru operații de așchiere, de tip ButterCut, SUA.



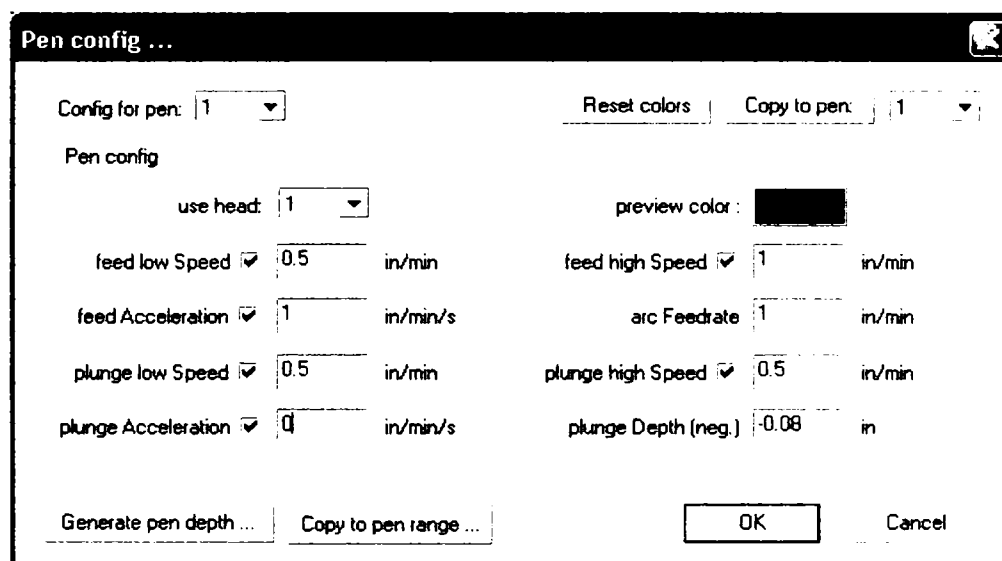


Fig. 4.16 Setările stilourilor aferente unei scule

Pe lângă aceste setări a fost aleasă ca poziție de repaus a sculei colțul din stânga jos. Numărul de piese executate a fost de șase, alegându-se o înșiruire liniară, corespunzătoare materialului brut avut la dispoziție (sub formă de platbandă). Durata de execuție a unui proiect a rezultat de circa 26 de minute, pentru un contur total de 225 mm.

#### 4.4 Analiza numerică a stării de tensiune și de deformare la plăcuțe de fixare LN 331 S

Dintre multiplele variante a căror justificare, din punct de vedere al intervențiilor chirurgicale, poate fi fundamentată doar de către medicii chirurghi s-a ales o plăcuță multifuncțională, care s-a dovedit eficientă atât la fracturile feței și ale mandibulei, unde se impune păstrarea planeității și o rezistență ridicată, cât și la fracturile de boltă craniană, unde este necesar să se muleze după forma craniului și unde

criteriul rezistenței mecanice nu contează (deoarece în partea superioară a craniului nu există o musculatură care să dezvolte forțe de mărimi similare cu cele care pun în mișcare mandibula, cu cele care acționează accidental la mișcări anormale ale acesteia sau care acționează asupra scheletului facial fix în timpul schimbării de mimică a feței).

Astfel, într-un prim scenariu, a fost modelată plăcuța de implantare tip LN 331 S din oțel inoxidabil, amplasată pe o calotă semisferică din os, având formă similară cu calota craniană. Calota este fracturată în urma unei lovituri accidentale după o linie neregulată, dar fractura este redusă și fixată cu ajutorul plăcuței și a patru șuruburi cu filet special, pentru os (figura 4.17).



*Fig. 4.17 Calotă craniană fracturată, cu placă de fixare*

Analiza numerică s-a făcut cu Metoda Elementelor Finite (MEF), utilizând aplicația profesională ANSYS [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118]. Aplicația generează, în acest scop, rețeaua cu elemente finite triunghiulare, modelul cu plăcuța pe calotă conținând un număr de noduri și de elemente care

rezultă automat în funcție de dimensiunile calotei și ale plăcuței implantate (figura 4.18).

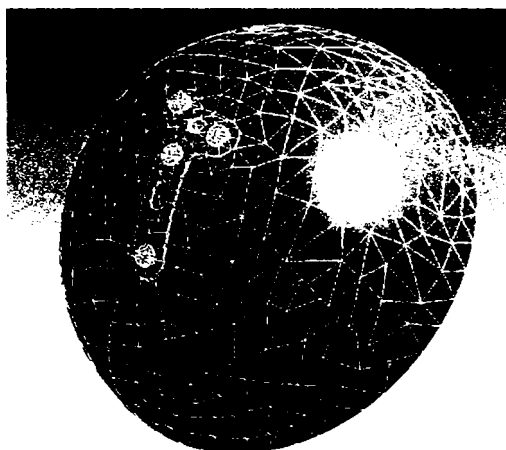


Fig. 4.18 Discretizarea structurii mecanice din figura 4.17

Rezultatele discretizării ansamblului din figura 4.17 sunt prezentate și în Tabelul 4.3, în care sunt descrise, pe lângă numărul de noduri și de elemente finite corespunzătoare fiecărei părți, și masele porțiunii de schelet, plăcuței și șuruburilor.

Tabelul 4.3 Rezultatele discretizării ansamblului din figura 4.17

Denumire	Material	Dimensiuni [mm]	Masa [kg]	Noduri	Elemente
Craniu	os	54,68; 59,47; 78,11	0,752	1094	485
Plăcuță	oțel inoxidabil	53,07; 8,73; 26,23	$4,15 \times 10^{-3}$	1017	422
Șurub 1	oțel inoxidabil	8,44; 7,01; 8,44	$9,01 \times 10^{-4}$	1235	669
Șurub 2	oțel inoxidabil	6,0; 7,01; 6,0	$9,01 \times 10^{-4}$	1235	669
Șurub 3	oțel inoxidabil	6,0; 7,01; 6,0	$9,01 \times 10^{-4}$	1235	669
Șurub 4	oțel inoxidabil	6,0; 7,01; 6,0	$9,01 \times 10^{-4}$	1235	669

Studiul comportării mecanice a plăcuței de implantare se face fără încărcare cu forțe exterioare, singurele forțe fiind cele care apar în șuruburile de prindere (figura 4.19). Mai trebuie menționat faptul că zona de contact între plăcuță și scheletul cranian este considerată naturală, fără întrepătrunderi între materialul osos și materialul implantului. Aceasta permite studiul comportării mecanice separate a osului și a plăcuței, singurele legături mecanice acceptate fiind cele reale, prin șuruburile de fixare.

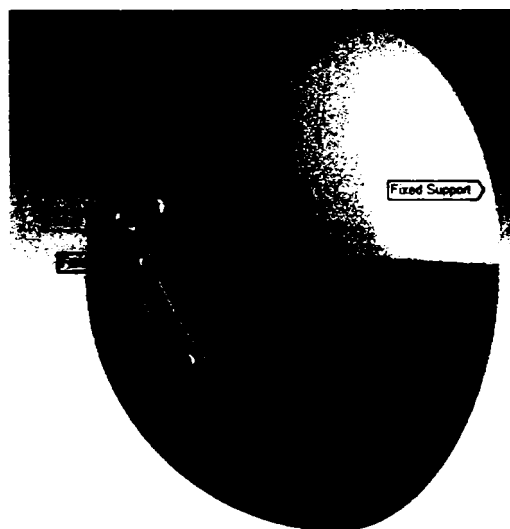


Fig. 4.19 Încărcarea cu forțele de prindere în șuruburi

Mărimile forțelor de strângere a șuruburilor sunt prezentate în Tabelul 4.4.

Tabelul 4.4 Încărcările ansamblului

Denumire	Mărimea forței de strângere	Proiecțiile forței pe axe în coordonate intrinseci
Forța 1	10,0 N	$[4,44 \times 10^{-15} \text{ N x}, 10,0 \text{ N y}, -1,13 \times 10^{-15} \text{ N z}]$
Forța 2	10,0 N	$[0,0 \text{ N x}, 10,0 \text{ N y}, 1,22 \times 10^{-15} \text{ N z}]$
Forța 3	10,0 N	$[0,0 \text{ N x}, 10,0 \text{ N y}, 1,22 \times 10^{-15} \text{ N z}]$
Forța 4	10,0 N	$[0,0 \text{ N x}, 10,0 \text{ N y}, 1,22 \times 10^{-15} \text{ N z}]$

Pentru a se obține distribuția de tensiuni și deformări pe ansamblul mecanic format din calota osoasă implantată cu plăcuța LN 331 S din oțel inoxidabil biocompatibil este necesar să se precizeze caracteristicile fizice și proprietățile mecanice ale materialelor celor două componente din sistem. Pentru materialul plăcuței și șuruburilor, proprietățile fizice sunt date în Tabelul 4.5.

**Tabelul 4.5** *Proprietăți fizice ale oțelului inoxidabil*

Denumire	Valoare
Modul de elasticitate	193.000,0 MPa
Coeficient lui Poisson	0,31
Densitate	$7,75 \times 10^{-6}$ kg/mm <sup>3</sup>
Coeficient de dilatare termică	$1,36 \times 10^{-5}$ 1/°C
Conductivitate termică	0,02 W/mm·°C
Căldură specifică	480,0 J/kg·°C

Caracteristicile mecanice ale aceluiași material sunt prezentate în Tabelul 4.6.

**Tabelul 4.6** *Caracteristici mecanice ale oțelului inoxidabil*

Denumire	Valoare
$\sigma_{\text{curgere}}$	207,0 MPa
$\sigma_{\text{rupere}}$	586,0 MPa

Ambele tipuri de caracteristici prezentate în Tabelele 4.5 și 4.6 se consideră invariante cu timpul. Pentru osul din care este realizată calota, proprietățile fizice, respectiv caracteristicile mecanice, sunt date în Tabelele 4.7 și 4.8. Prezumția de mai sus este valabilă și pentru caracteristicile osului.

**Tabelul 4.7** *Proprietăți fizice ale osului*

Denumire	Valoare
Modul de elasticitate	8.000,0 MPa
Coeficient lui Poisson	0,3
Densitate	$3,0 \times 10^{-4}$ kg/mm <sup>3</sup>
Coeficient de dilatare termică	0,0 1/°C
Căldură specifică	0,0 J/kg·°C

**Tabelul 4.8** *Caracteristici mecanice ale osului*

Denumire	Valoare
$\sigma_{\text{curgere}}$	100,0 MPa
$\sigma_{\text{rupere}}$	135,0 MPa

Din analiza datelor prezentate în Tabelele 4.5, 4.6, 4.7 și 4.8 se observă că există diferențe semnificative ale proprietăților fizice și ale caracteristicilor mecanice între cele două materiale, motiv pentru care, în numeroase situații, se încearcă realizarea implantelor din materiale plastice sau compozite cu proprietăți similare osului uman. Faptul că oțelul inoxidabil utilizat pentru realizarea plăcuței LN 331 S și a șuruburilor de fixare are proprietăți mecanice mult superioare celor ale osului implantat nu deranjează, însă, comportarea mecanică a structurii, deoarece cea mai importantă caracteristică a elementelor de fixare (implantele și șuruburile) care se ia în considerație este biocompatibilitatea. Materialul utilizat asigură această biocompatibilitate și faptul că el prezintă caracteristici mecanice cu valori superioare celor ale osului reprezintă un aspect pozitiv.

Rezultatele prelucrărilor sunt centralizate în Tabelul 4.9, fiind indicate valorile tensiunilor și ale deformărilor ilustrate în figurile 4.20, 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 și 4.25.

Tabelul 4.9 Rezultatele prelucrărilor

Denumire	Valoare minimă	Valoare maximă	Nivel de periculozitate	Figura
Tensiune echivalentă	$1,11 \times 10^{-4}$ MPa	3,5 MPa	nu	figura 4.20
Tensiune normală	-2,4 MPa	1,34 MPa	nu	figura 4.21
Tensiune de forfecare	-0,64 MPa	0,64 MPa	nu	figura 4.22
Deformație totală	0,0 mm	$2,27 \times 10^{-3}$ mm	nu	figura 4.23
Deformație după direcția X	$-3,35 \times 10^{-4}$ mm	$4,48 \times 10^{-4}$ mm	nu	figura 4.24
Deformație după direcția Y	$-9,34 \times 10^{-6}$ mm	$2,26 \times 10^{-3}$ mm	nu	figura 4.25

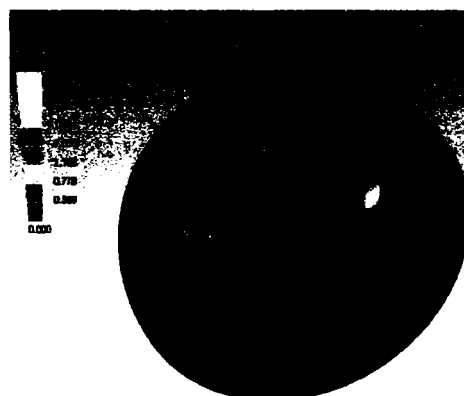


Fig. 4.20 Tensiune echivalentă



Fig. 4.21 Tensiune normală

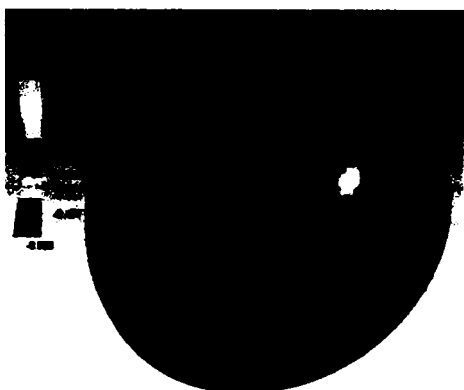


Fig. 4.22 Tensiune de forfecare

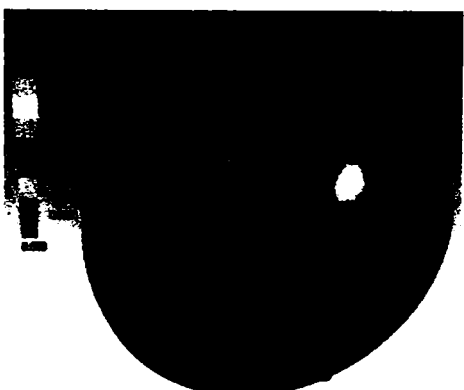


Fig. 4.23 Deformație totală



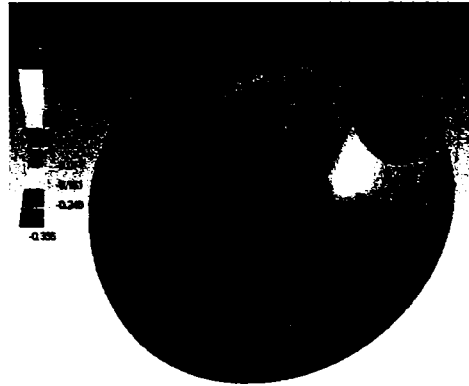


Fig. 4.24 Deformație după axa X

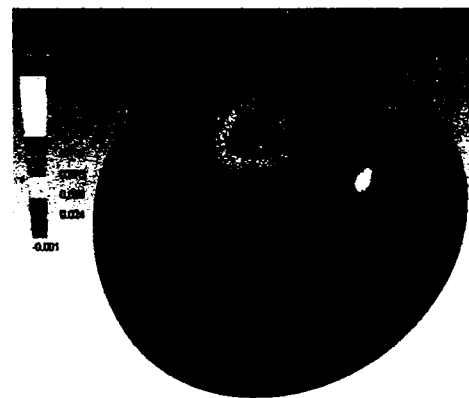


Fig. 4.25 Deformație după axa Y

Deși reprezentarea corectă este cea ilustrată prin figurile din Tabelul 4.9, uneori, o reprezentare mai convenabilă care cuprinde aceleași valori, rezultă prin separarea plăcuței din ansamblul mecanic. Spre exemplu, la solicitarea la forfecare, distribuția tensiunilor rezultă mai clar prin reprezentarea separat a plăcuței, valorile fiind aceleași ca și cele înregistrate pentru ansamblu (figura 4.26)



Fig. 4.26 Tensiune de forfecare pentru plăcuță

Similar se poate face și pentru studiul deformărilor, izolându-se plăcuța din ansamblu. Spre exemplu, deformarea plăcuței pe direcția Y este mai clar prezentată în figura 4.27.



Fig. 4.27 Deformație pe direcția Y pentru plăcuță

În cazul în care plăcuțele pentru implantare sunt utilizate pentru fixarea fragmentelor osoase pe porțiuni plane ale scheletului facial, starea de tensiune și de deformare este, evident, diferită în comparație cu situația prezentată la fixarea unei fracturi a calotei, unde plăcuța este inițial deformată după forma capului. Se poate exemplifica plăcuța de aceeași formă inițială, utilizată pentru fixarea a două fragmente obținute prin fracturarea mandibulei. Asupra plăcuței acționează ansamblul muscular pterigoid-maseter, care dezvoltă forțe de 500 N în planul plăcii (figura 4.28).



Fig. 4.28 Încărcarea plăcuței

Într-un astfel de caz, plăcuța fiind discretizată după cum se prezintă în figura 4.29, rezultă distribuția de tensiuni din figura 4.30 și deformațiile din figura 4.31.

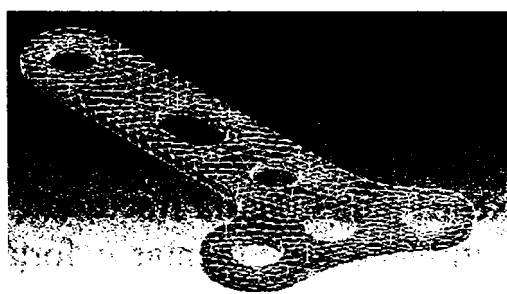


Fig. 4.29 Discretizarea plăcuței



Fig. 4.30 Tensiunile din plăcuță



Fig. 4.31 Deformațiile plăcuței

Se observă că valorile maxime ale tensiunilor echivalente din intervalul 139÷156 Mpa sunt inferioare celor înregistrate la cazul fixării calotei sferice, situație care se datorează modului diferit de fixare, precum și pretensionării plăcuței determinată de forma calotei, pretensionare inexistentă la osul cu suprafața de fixare plană.

La aceeași plăcuță care fixează o mandibulă fracturată, suprafața de fixare fiind plană și asupra plăcuței acționând suplimentar o forță de 424,264 N datorită ocluziei (figura 4.32), rezultă o distribuție a tensiunilor prezentată în figura 4.33 și o distribuție a deformațiilor prezentată în figura 4.34, semnificativ diferite față de cazul precedent.



Fig. 4.32 Încărcarea suplimentară a plăcuței



Fig. 4.33 Tensiunile din plăcuță



Fig. 4.34 Deformațiile plăcuței

Este, astfel, evident că același tip de plăcuță, pe același tip de os, este solicitată diferit și se deformează diferit, în funcție de tipul de solicitare externă aplicată. Analiza efectivă a evidențiat faptul că se pot folosi plăcuțe tipizate cu aceleași caracteristici mecanice, aceeași formă și din același material, pe fracturi plasate diferit pe oase ale scheletului cranian și solicitate mecanic diferit. Rezultatele fixării fragmentelor osoase sunt corespunzătoare din punct de vedere mecanic în toate cazurile studiate, fapt care susține tehnica utilizării plăcuțelor tipizate în diferite intervenții chirurgicale reparatorii a structurii osoase. Aceleași tipuri de plăcuțe se pot folosi și pentru fixarea fragmentelor de oase lungi rezultate în urma fracturărilor, deși acestea au cu totul altă structură și alte proprietăți mecanice comparativ cu oasele capului. Astfel, oasele lungi au structura și proprietăți similare cu oasele capului doar pe exterior, interiorul având o structură spongioasă, cu proprietăți mecanice mult inferioare. Plăcuța analizată poate fi utilizată la fixarea unor fracturi pe astfel de oase, pentru ilustrare prezentându-se cazul unei fracturi de femur fixată prin plăcuța prinsă în patru șuruburi (figura 4.35).

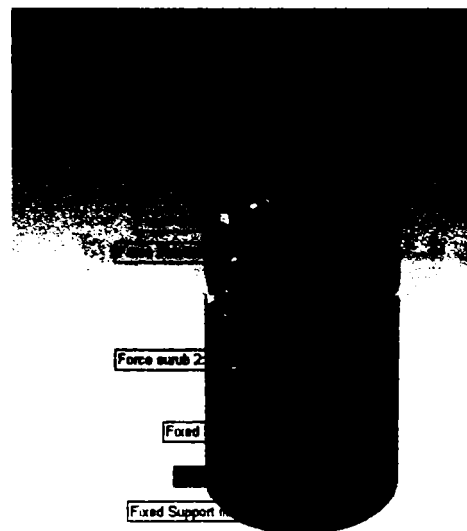


Fig. 4.35 Încărcarea ansamblului

Încărcarea plăcuței este realizată atât prin forțe din șuruburile de fixare, cât și prin greutatea corpului, exprimată printr-o forță distribuită, și un tursor care încarcă plăcuța longitudinal pe suprafață (Tabelul 4.10).

Tabelul 4.10 Încărcările ansamblului

Denumire	Mărimea forței de strângere	Proiecțiile forței pe axe în coordonate intrinseci
Forța 1	10,0 N	$[3,66 \times 10^{-15} \text{ N } x, -1,16 \times 10^{-15} \text{ N } y, -10,0 \text{ N } z]$
Forța 2	10,0 N	$[1,55 \times 10^{-15} \text{ N } x, -1,38 \times 10^{-15} \text{ N } y, -10,0 \text{ N } z]$
Forța 3	10,0 N	$[3,05 \times 10^{-15} \text{ N } x, 2,82 \times 10^{-16} \text{ N } y, -10,0 \text{ N } z]$
Forța 4	10,0 N	$[-2,33 \times 10^{-15} \text{ N } x, 1,53 \times 10^{-15} \text{ N } y, -10,0 \text{ N } z]$

Valorile tensiunilor și deformațiilor înregistrate în plăcuță în acest caz sunt prezentate în Tabelul 4.11.

Tabelul 4.11 Rezultatele prelucrărilor

Denumire	Valoare minimă	Valoare maximă	Nivel de periculozitate	Figura
Tensiune echivalentă	$1,49 \times 10^{-2} \text{ MPa}$	5.316,3 MPa	nu	figura 4.36
Tensiune normală	-594,21 MPa	1454,8 MPa	nu	figura 4.37
Tensiune de forfecare	-690,09 MPa	607,15 MPa	nu	figura 4.38
Deformație totală	0,0 mm	5,35 mm	nu	figura 4.39
Deformație după direcția X	-0,12 mm	0,85 mm	nu	figura 4.40
Deformație după direcția Y	-3,76 mm	0,03 mm	nu	figura 4.41



Fig. 4.36 Tensiune echivalentă

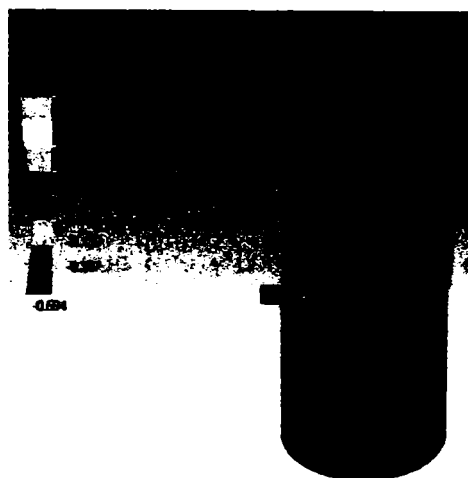


Fig. 4.37 Tensiune normală



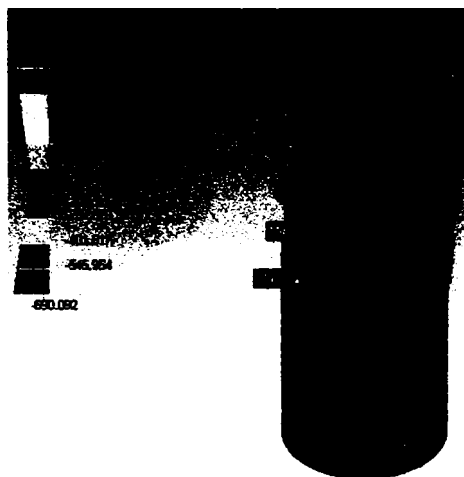


Fig. 4.38 Tensiune de forfecare



Fig. 4.39 Deformație totală

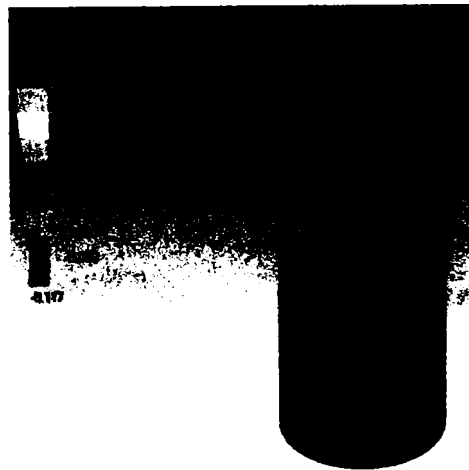


Fig. 4.40 Deformație după axa X

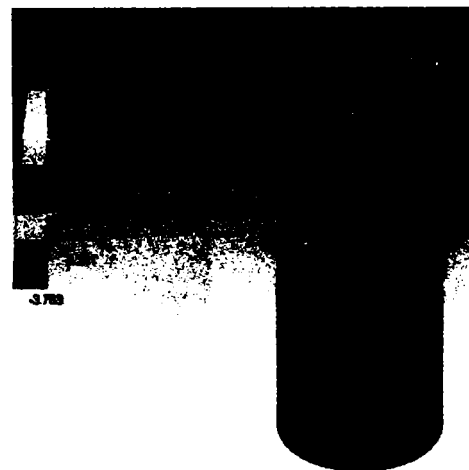


Fig. 4.41 Deformație după axa Y

Din analiza figurilor care prezintă deformațiile înregistrate de ansamblul os-plăcuță fixată, se observă că la anumite tipuri de deformare nivelul atins în plăcuța de fixare este similar cu nivelul atins în osul fixat, situat în partea inferioară a fracturii. Este cazul deformațiilor înregistrate de-a lungul axei Y a plăcuței, care corespund compresiunii ansamblului os-plăcuță. Figura 4.41 relevă

deformații de compresiune maxime similare pentru partea menționată a osului fracturat și plăcuță, deși foarte mici ca valoare. Plăcuța nu se deformează mai mult decât osul, ceea ce este esențial la o solicitare pe verticală a femurului fracturat.

Tot o deformație de compresiune se produce în femurul fracturat, în partea opusă aplicării plăcuței. Aceasta se datorează deformării plăcuței pe direcție orizontală datorită încovoierii acesteia pe direcția de acțiune a forței. Solicitarea de compresiune a plăcuței este mult redusă față de cea determinată în osul fracturat, în porțiunea situată deasupra liniei de fractură. Acest efect poate fi combătut prin fixarea osului lung fracturat cu două plăcuțe identice, atașate pe fețe opuse și care, prin acțiune complementară, reduc nivelul solicitărilor și deformațiilor din osul fracturat.

În toate situațiile prezentate, procesul de osteosinteză va avea loc cu atât mai rapid cu cât solicitarea mecanică a osului, în zona fracturii, este mai redusă. În general, o astfel de analiză numerică este indicată pe tipuri distincte de fracturi, în cazul în care se folosesc aceleași tipuri de implante sau chiar implante diferite. Studii efectuate până în prezent [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [48], [62], [65] în echipe mixte medici-ingineri, au scos în evidență importanța acestor tipuri de analize ca etape premergătoare unor intervenții chirurgicale reparatorii. Analizele de acest tip nu sunt cronofage, necesită sisteme de calcul cu dotare la performanțe actuale și, deci, pot fi realizate în timp util, înaintea oricărei intervenții chirurgicale, chiar de urgență.

Studii de acest tip, efectuate și în cadrul prezentei teze de doctorat, au fost și sunt utilizate în cadrul Laboratorului de Orteze, Proteze și Implante chirurgicale faciale și ortopedice, din cadrul Universității „Politehnica“ din Timișoara, pentru operații premergătoare procesului de omologare (aflat în curs de derulare) pentru o trusă de implante tipizate.



## 5. Concluzii. Contribuții originale

După o activitate de cercetare-dezvoltare de aproape zece ani a rezultat *Comp-U-Craft*, un echipament multifuncțional capabil de a scana și de a realiza obiecte tridimensionale. Deși poate fi dezvoltat în continuare, pe mai multe planuri, în acest moment echipamentul se prezintă ca un produs matur, gata de utilizarea comercială, acceptat și validat de piețele a cinci continente. O decadă este o perioadă destul de mare în dezvoltarea unui produs, timp în care apar schimbări semnificative pe piață. Astfel, deși s-a pornit la drum cu ideea realizării unui mic dispozitiv destinat industriei de prelucrare a bijuteriilor, pe parcursul anilor studiile de piață au sugerat și alte direcții, cum ar fi realizarea și testarea plăcilor de cablaj imprimat echipate cu circuite integrate, sau realizarea unor proteze medicale, adaptate necesităților particulare ale fiecărui pacient. Uneori istoria se repetă, chiar dacă pe alte piețe, ceea ce poate deschide calea reluării unor intenții mai vechi. De exemplu, statisticile estimează că în România, în acest moment, piața bijuteriilor înregistrează o cifră de afaceri, din producția internă, de peste 50 de milioane de dolari anual, cererea fiind mai mare decât oferta. Valoarea intrinsecă a aurului și a altor materiale sau pietre prețioase nu depășește o treime din această cifră de afaceri, restul fiind reprezentat de manoperă. La aceste valori se adaugă importurile oficiale și cele neoficiale, din diferite țări, estimându-se că valoarea reală a tranzacțiilor cu bijuterii este dublă.

Aplicația la care se referă teza abordează un domeniu practic inexistent în România. În prezent, toate tipurile de implante chirurgicale se importă de la firme europene sau americane. De aceea, s-a inițiat o cercetare aplicativă, în acest domeniu, care a putut fi concretizată în cadrul Bazei de Cercetare cu Utilizatori Multipli „Centrul de Modelare a Protezării și a Intervențiilor Chirurgicale asupra Scheletului Uman” — CMPICSU. În cadrul acestui centru se lucrează în echipe mixte (ingineri, informaticieni, chirurghi), ajungându-se ca în prezent să fie realizată sub formă de prototip o trusă de implantare facială, exemplul indicat în teză fiind unul dintre componentele sale.

Din cauza atâtor aplicații posibile și a duratei mari a proiectului, chiar și omogenizarea materialelor, scrise de-a lungul acestor ani, într-o teză de doctorat merită a

descrie echipamentul prezentat, s-a dovedit a fi o sarcină dificilă, dusă la bun sfârșit numai prin clarviziunea și experiența conducătorilor acestei teze. Prin deschiderile actuale ale țării noastre pe plan internațional, medicina românească a avut șansa de a avansa rapid și de a se alinia la nivel mondial. Frâna acestui proces era și este constituită de nealinierea la tehnologia din domeniu, deși, chiar și aici, s-au făcut salturi uriașe, în ceea ce privește dotarea tehnică modernă a mai multor clinici și spitale, prin eforturi comune ale forurilor internaționale și ale autorităților române, mai rămâne, totuși, un drum lung de parcurs până la alinierea întregului sistem sanitar la nivelul generalizat deja în Uniunea Europeană. Echipamentul, în ansamblul său, poate realiza orice tip de implant din tablă de oțel inoxidabil biocompatibil sau de titan, de grosime de maximum 3 mm, ceea ce constituie, în fapt, obiectivele a două granturi finanțate prin Planul Național de Cercetare-Dezvoltare, programele BIOTECH și INFRAS, demersul acestei teze de doctorat fiind orientat în această direcție [120], [121].

Sistematizând materialul referitor la echipament și la aplicațiile sale în domeniul implantologiei, a rezultat teza, structurată pe cele patru capitole prezentate anterior. Pe lângă introducerea care le precede, apare și o motivație, lămuritoare cu privire la participarea celor care și-au adus contribuția ca această teză să depășească stadiul unui concept teoretic și să devină o realizare inginerescă competitivă tehnologic pe plan mondial. După prezentele concluzii urmează o bibliografie cuprinzătoare și un număr de cinci anexe, care completează conținutul tezei.

Capitolul 1, cu titlul „Prezentarea generală a echipamentului *Comp-U-Craft*, prezintă partea mecanică a echipamentului, atât din punct de vedere teoretic, cât și din punct de vedere aplicativ. Autorul aduce, în cadrul acestui capitol, următoarele contribuții:

- O sinteză originală a unei bibliografii extensive asupra cinematicii punctului material, cu rolul de a sistematiza cunoștințele necesare proiectării, atât a părții mecanice a mașinii, cât și a algoritmilor de comandă implementați în software-ul care însoțește acest echipament. De asemenea, sinteza precizează importanța analizei cinematische

pentru realizarea contururilor complexe ale produselor executate cu echipamentul *Comp-U-Craft*;

- O sinteză bibliografică asupra mișcării compuse a rigidului, cu rol deosebit în înțelegerea funcționării ansamblurilor formate din mai multe corpuri, ceea ce a stat la baza proiectării judicioase a mecanismelor de acționare ale echipamentului *Comp-U-Craft*, mecanisme compuse din motor pas cu pas, cuplaj, șurub conducător, piuliță conducătoare, suport culisant și glisieră de culisare. Aceste mecanisme, ale căror piese execută fie mișcări de rotație (rotorul motorului, cuplajul, șurubul conducător), fie mișcări de translație (piulița conducătoare, suportul culisant), având ca referințe elemente fixe (statorul motorului, glisierele și suportul lor), sunt orientate triortogonal, astfel încât, prin compunere la nivel superior, să poată descrie orice curbă în spațiu;
- Descrierea modului în care cunoștințele acumulate pe parcursul studiului bibliografic au fost aplicate la realizarea echipamentului versatil *Comp-U-Craft*. Datorită acestui suport teoretic, *Comp-U-Craft* poate executa orice traiectorie în spațiul tridimensional discret acoperit de gabaritul său, cu o rezoluție superioară și fără pierderi datorate jocurilor sau frecărilor. Viteza de execuție poate varia între limite largi, ceea ce face din *Comp-U-Craft* un echipament potrivit unui număr foarte mare de aplicații, dovedindu-și, din acest punct de vedere, superioritatea față de foarte puținele produse concurente, existente pe piață, pe plan mondial;
- Un studiu metalografic macroscopic și microstructural, care pune în evidență modificările superficiale, apărute la nivelul suprafeței prelucrate cu ajutorul echipamentului *Comp-U-Craft*. Concluziile care se desprind din acest studiu confirmă alegerile corecte, făcute pe parcursul studiului teoretic și al proiectării echipamentului.

În ierarhia proiectării, partea mecanică a echipamentului reprezintă avalul, capacitățile acesteia fiind constrângeri pentru părțile de hardware și de software. Astfel, aici se determină rezoluția reală și precizia fizică a echipamentului și nu la nivelul software-ului, de exemplu, unde acești parametri au, mai degrabă, relevanță teoretică. Tot la acest nivel, datorită maselor supuse mișcărilor de rotație și de translație, atât în plan orizontal, cât și în plan vertical, apar forțe și cupluri statice și dinamice rezistente, care trebuie cunoscute cu precizie, fiind limitative pentru valorile programabile la nivel software. Astfel, pe baza prezentării teoretice sintetizate în acest capitol din bibliografia studiată, s-a putut realiza o proiectare judicioasă atât din punct de vedere mecanic, cât și din punct de vedere hardware și software. Proiectarea mecanică a permis, pe lângă reducerea consumurilor specifice, obținerea unui echipament compact, robust, care ocupă un volum mic și o suprafață mică de sprijin, în raport cu dimensiunea pieselor studiate, lucru rar întâlnit la echipamente similare din producția mondială. De asemenea, tot pe baza sintezei teoretice făcute, au fost dimensionați exact parametrii îndepliniți de interfața electronică pentru comanda motoarelor, iar algoritmi implementați în program au devenit foarte eficienți, în ultimii cinci ani viteza de lucru a echipamentului mărindu-se, astfel, de peste trei ori.

Paragraful 1.1, intitulat „Metode de studiu în cinematica punctului material“, sintetizează, din bibliografia studiată, câteva metode de studiu în cinematica punctului material. Din cauza particularităților constructive ale echipamentului, s-a acordat o atenție deosebită studiului mișcării în coordonate carteziane. Acesta este necesar, în special, datorită faptului că motoarele pas cu pas compun mișcarea sculei în spațiu, limitările în acest caz fiind date de material, tipul sculei și natura prelucrării precum și datorită faptului că elementele componente ortogonale ale mișcării sculei trebuie cunoscute atât pentru compunerea acestei mișcări, cât și pentru a se verifica încadrarea în regimurile suportate de tipul motoarelor pas cu pas folosite. Paragraful continuă cu studiul mișcării în coordonate intrinseci, în coordonate polare plane, precum și în coordonate cilindrice, care, la unele tipuri de profile, sunt mai simplu de aplicat decât coordonatele carteziane. Pentru a se putea crește performanța de execuție a echipamentului, au fost studiate, tot în acest paragraf, câteva mișcări curbilinii uzuale, cum ar fi: mișcarea circulară și mișcarea



pe elice (utilă la execuția filetelor șuruburilor), mișcări care apar cel mai frecvent în componența profilelor spațiale executate de scula prelucrătoare.

Paragraful 1.2, „Mișcarea compusă a rigidului“, este dedicat unui studiu esențial pentru proiectarea mecanismelor mobile ale echipamentului, compuse din repere supuse mișcărilor de rotație (rotoarele motoarelor pas cu pas, cuplajele și șuruburile conducătoare) și de translație (piulițele conducătoare și suporturile solidare cu acestea, care se deplasează pe glisiere). Astfel, în acest paragraf, se face determinarea vitezelor relative dintre corpurile în mișcare și distribuția acestora, precum și a accelerațiilor, având în vedere modul de funcționare al mecanismelor sus amintite. Și aici, ca și în paragraful precedent, pentru creșterea performanței, s-a urmărit studiul unor mișcări relative particulare ale rigidelor, conform principiului enunțat în legea lui Amdahl și anume că pentru creșterea performanței trebuie accelerată execuția cazului cel mai des întâlnit. În acest sens, în cadrul acestui paragraf s-a studiat distribuția de viteze în cazul compunerilor de mișcări instantanee și al compunerilor de translații.

Paragraful 1.3, intitulat „Proiectarea echipamentului *Comp-U-Craft*“ este integral original, descriind modul de proiectare al echipamentului și conceptele constructive care au stat la baza realizării sale. Astfel, s-au urmărit și s-au realizat următoarele deziderate:

- a) echipamentul trebuie să aibă un gabarit redus, destinația sa fiind producerea cu ușurință a unui mare număr de tipuri de piese, dintr-o varietate de materiale, dar cu cadențe reduse de fabricație, segmentul vizat fiind cel al prototipurilor, unicatelor sau al seriilor mici;
- b) gabaritul pieselor prelucrate este necesar să fie cât mai mare posibil în raport cu cel al echipamentului;
- c) mașina trebuie să beneficieze de o comandă simplă și de precizie ridicată cu dezvoltarea unor cupluri, respectiv, forțe suficient de mari, atât pentru deplasare, cât și pentru menținerea poziției.

Aceste deziderate au fost atinse prin adoptarea unor soluții constructive inovatoare ca: deplasarea întregii mese de lucru pe axa Y și montarea pe suportul axei X a întregului mecanism de acționare pe axa Z, împreună cu suportul port-sculă. Dezavantajul abordării acestei soluții rezidă în asimetria construcției, ceea ce conduce la limitări diferite a acționărilor pe cele trei axe. Acest lucru a fost compensat prin software, unde caracteristicile echipamentului pot fi specificate independent pe fiecare dintre axe. În ceea ce privește comanda, motoarele pas cu pas s-au impus, avantajele fiind semnificativ mai multe decât dezavantajele. Față de servomotoarele de curent continuu, motoarele pas cu pas oferă cupluri ridicate nu numai în toate regimurile de turație, ci și în cele staționare. Prin respectarea precauțiilor legate de accelerație, viteză maximă și decelerație, este permisă comanda în buclă deschisă, ceea ce simplifică circuitele și programele de acționare. Dezavantajele sunt legate de zgomotul mare și de existența unor frecvențe de rezonanță care pot conduce la pierderea de pași, dar acestea pot fi limitate prin alegerea unor moduri de comandă în concordanță cu scopul propus, cum ar fi comanda în mod semipas (*half step*) sau cu formă sinusoidală de undă.

Un alt deziderat important urmărit în proiectarea echipamentului a fost versatilitatea. Astfel, suportul port-sculă permite montarea unui număr mare de dispozitive și de scule, cum ar fi: palpator electromecanic pentru scanare tridimensională, freză, vârf de gravare cu pretensionare, electrozi pentru electroeroziune, scule de debitare cu plasmă etc. Scanarea electromecanică este interesantă datorită faptului că permite copierea cu rezoluție satisfăcătoare a unor obiecte existente prin citirea matriceală a coordonatei de înălțime (axa Z) dintr-un câmp dat. Forma virtuală a obiectului scanat este obținută prin interpolarea coordonatelor citite prin palpate. În funcție de material și de vârful folosit, se poate regla valoarea pretensionării sculei de gravare pentru a se putea obține în material impresia dorită. Probabil că cea mai importantă sculă este freza, de turație mare și reglabilă, cu prindere standardizată pentru o mare varietate de scule de frezare (cilindrice, conice, tronconice sau sferice) din oțel, Widia sau diamantate. Pentru a crește viteza de prelucrare în cazul unor contururi interioare complexe se poate apela la execuția, tot cu ajutorul echipamentului, a pozitivului sub forma unui electrod de cupru, iar apoi, la executarea conturului interior complex, prin electroeroziune, cu electrodul montat în suportul port-sculă. Această metodă permite, în cazul pieselor relativ

subțiri, prelucrarea multiplă prin suprapunere. În concluzie, realizarea inovatoare a acestui echipament multifuncțional, folosind cât mai multe repere de fabricație curentă, de dimensiuni scăzute, acționată de motoare pas cu pas de ultimă generație, mici ca volum, dar care pot fi folosite până la turații de 6000 de rpm, oferind cupluri constante și ridicate, precum și cu capabilitatea adaptării unui mare număr de scule de execuție, a condus la obținerea unei versatilități ridicate, oferind astfel posibilitatea implementării unor funcționalități deosebit de utile și ușor de folosit în programele care însoțesc produsul.

Studiul metalografic, efectuat asupra a cinci eșantioane ale modelului de implant chirurgical metalic LN 331 S (conform catalogului „Aesculap”), atât din punct de vedere macroscopic, cât și din punct de vedere microstructural, a pus în evidență influența pe care cinematica vârfului sculei așchietoare (rezultată din compunerea mișcărilor comandate pe cele trei axe de acționare), în conjuncție cu viteza de așchiere, o are asupra stratului superficial al suprafeței prelucrate. Concluziile au fost favorabile estimărilor făcute analitic, confirmându-le.

Capitolul 2, intitulat „Considerații asupra părții de hardware”, se ocupă de nivelul ierarhic următor, adică de cel al dispozitivelor hardware necesare comenzii echipamentului. Autorul aduce, în cadrul acestui capitol, următoarele contribuții:

- O sinteză originală a elementelor teoretice necesare proiectării judicioase a entității hardware a echipamentului *Comp-U-Craft*, fiind prezentate, pe de o parte, structura și funcționarea interfeței USB (o interfață modernă și flexibilă, introdusă recent în construcția calculatoarelor personale), iar pe de altă parte circuitele integrate necesare proiectării (microcontrolerul și circuitele de interfață și de comandă a motoarelor pas cu pas);
- Demersul proiectării, de asemenea original, împreună cu justificările deciziilor tehnice luate. Au fost prezentate fie scheme bloc, fie scheme de detaliu, în funcție de permisiunea *CD Nelson Manufacturing & Supply Co.*, pentru a evidenția caracterul original și inovator al soluțiilor adoptate.

În principiu, comanda se face cu ajutorul unui calculator personal (PC) de uz general. Acesta, prin porturile sale, poate genera semnale digitale, insuficiente energetic pentru comanda directă a motoarelor echipamentului. Caracterul acestor semnale este, în general, asincron, astfel încât s-au conturat două categorii de probleme care au necesitat rezolvare: comunicația dintre echipament și PC, respectiv, interfațarea dintre semnalele digitale și cele necesitate de motoare.

Paragraful 2.1, având titlul „Specificații inițiale“, face o trecere în revistă a acestor probleme care necesită rezolvare, justificând alegerea soluțiilor urmate. Referitor la problemele de comunicație, s-a preferat inițial soluția utilizării portului paralel pentru comunicația cu calculatorul. Această soluție a fost atractivă datorită faptului că nu necesita construirea unui adaptor special, numărul de semnale oferite fiind acoperitor pentru comanda motoarelor echipamentului. Astfel, interfața electronică a fost gândită de așa manieră încât, pentru comanda fiecărui motor, să fie emisă de către PC doar două semnale: unul care să comande execuția câte unui pas, iar al doilea să determine sensul în care se execută respectivul pas. Problema principală a acestei soluții este caracterul asincron al funcționării portului paralel, în strânsă legătură cu modul de funcționare al calculatoarelor moderne guvernate de sistemele de operare actuale. Acestea din urmă sunt *multi-tasking* și *multithreading*, răspunzând astfel multor cerințe ale utilizatorilor.

Din păcate, în cazul particular al aplicației de față, acest lucru este potrivit scopului urmărit, deoarece împiedică plasarea semnalelor de comandă pe liniile portului paralel, la momentele de timp determinate de necesitățile de comandă ale motoarelor. Sistemul de operare DOS, care, prin lansarea unei aplicații, îi permite acesteia să aibă controlul exclusiv al procesorului, a fost o soluție uzată moral, chiar și cu zece ani în urmă când au început cercetările legate de proiectarea acestui echipament. Cu toate că primul *driver* scris a fost un program DOS, sistemul de operare ales a fost Windows, al Corporației Microsoft. Deși implementează un *multitasking* care nu este preemptiv, fiind, deci, nepotrivit scopurilor aplicației în discuție, a fost ales din rațiuni comerciale, din cauza răspândirii sale covârșitoare și al nivelului de cunoaștere de către utilizatorii nespecialiști în domeniul calculului.

Un alt aspect care a favorizat alegerea acestui sistem de operare a fost faptul că pentru această platformă existau și există un mare număr de aplicații de CAD, provenite de la terți. Cum proiectarea părții de software a început, evident, cu partea de CAM, desigur că acest aspect a avut o importanță deosebită pentru că permitea reducerea semnificativă a timpului până la prezența pe piață (TTM — *Time To Market*), cu influențe benefice privitor la reducerea investițiilor și la recuperarea acestora din vânzări. Ca atare, s-au căutat soluții de „sincronizare“ a transmisiei nativ asincrone a portului paralel pentru a depăși această problemă.

Soluția a venit tocmai din exploatarea mecanismului rudimentar de *multitasking* al sistemului de operare Windows. Nefiind preemptiv, acesta predă controlul unei aplicații și se așteaptă ca ea să-l returneze sistemului de operare după un interval rezonabil de timp. Din analiza formatului HPGL, folosit la reprezentarea curbelor pe care se deplasează scula, s-a observat că acestea sunt compuse din segmente, uneori chiar și de un singur pas. În consecință, soluția identificată a fost de execuție a rutinei de trasare a unui segment la nivelul de prioritate (*Ring 0*) al nucleului sistemului de operare, iar predarea controlului către acesta să se facă doar la sfârșitul execuției respectivului segment. Această soluție a rezolvat problema sincronizării, dar generează, în cazul segmentelor lungi, un efect neplăcut de „înghețare“ a funcționării calculatorului, deoarece până la sfârșitul execuției acestora nici măcar mouse-ul nu poate fi deplasat pe ecran.

Soluția nu este foarte elegantă, reprezentând, mai degrabă, o ocolire a problemelor decât o rezolvare a lor. De fapt, rezolvarea sincronizării unui flux de date printr-un port asincron se face cel mai bine prin folosirea unui tampon, în cazul de față alegându-se soluția unui tampon „inteligent“, adică dotat cu un microcontroler care să gestioneze atât comunicația asincronă cu calculatorul, cât și cea sincronă cu interfața electronică a motoarelor pas cu pas. Fiind o soluție de dată recentă, portul ales pentru comunicația cu calculatorul a fost USB, versiunea 1.0, pentru că, pe de o parte, satisface cu prisosință lățimea de bandă solicitată de echipament, fiind prezent pe toate calculatoarele fabricate în ultimii ani, iar pe de altă parte aduce alte avantaje semnificative, cum ar fi posibilitatea conectării, prin *hub*-uri adecvate, a până la 127 de echipamente la un singur sistem de calcul, reducerea

costurilor de conectare prin folosirea unor cabluri subțiri, ieftine, cu conectori simpli, precum și posibilitatea alimentării tamponului cu energie electrică din calculator. Printre avantaje se numără și faptul că nu trebuie acordată atenție controlului erorilor de comunicare, acest lucru fiind complet transparent pentru programatori prin înglobarea respectivelor facilități la nivelul hardware-ului și al sistemului de operare. Trebuie spus, însă, ca o curiozitate, că deși această soluție este mult mai elegantă și oferă o rezolvare reală a problemei de comunicație, piața preferă totuși soluția conectării la portul paralel, din rațiuni de preț și de simplitate, din punct de vedere al operării echipamentului nefiind nici o diferență pentru utilizator.

Paragraful 2.2, intitulat „Comunicația dintre sistemul de calcul și echipamentul *Comp-U-Craft*“, se ocupă de descrierea modului de proiectare a tamponului, plecând de la specificarea semnalelor care trebuie să ajungă la interfața electronică a motoarelor pas cu pas. Se pun, astfel, bazele unui protocol de comunicație, precum și a unei structuri bloc pe care să se bazeze implementarea schemei. Microcontrolerul folosit, AN2131 Q, dispune de memorie fixă, nevolatilă, precum și de memorie de lucru, dar i s-a atașat și o memorie externă de lucru. În loc ca programul care guvernează funcționarea tamponului să fie locat în memoria fixă, s-a preferat înscrierea acolo a unui încărcător care să asigure încărcarea sa din PC. Prin această soluție, numită în lucrare *software uploading*, se asigură posibilitatea unor îmbunătățiri ulterioare, prin metode software, la îndemâna utilizatorului, fără trimiterea tamponului la producător, în scopul reinscripționării memoriei fixe.

Alegerea microcontrolerului AN 2131 Q s-a dovedit inspirată și din alte puncte de vedere. Nucleul acestuia este compatibil cu modelul 8051 de la Intel, care este foarte cunoscut și pentru care există multe unelte de dezvoltare. I 8051 este un model depășit în raport cu cerințele actuale, așa că Cypress a adus multe îmbunătățiri acestui nucleu. În primul rând, creșterea frecvenței de lucru la 24 de MHz a adus acest microcontroler în zona aplicațiilor actuale, iar încapsularea într-o capsulă modernă cu 80 de pini a permis renunțarea la multiplexarea magistralelor de adrese și de date și adăugarea unei interfețe seriale în plus, a unui temporizator (al treilea) pe 16 biți, precum și a opt întreruperi adiționale. În al doilea rând, Cypress a ușurat mult proiectarea interconectării prin încorporarea funcțiilor de

comunicație pe portul USB 1.0. Nu în ultimul rând trebuie menționat consumul redus datorat alimentării la 3,3 V.

Tamponul construit în jurul microcontrolerului AN 2131 Q comunică cu sistemul de calcul pe magistrala USB. Imediat după inițializare intră în funcțiune procesul de *software uploading*, care asigură încărcarea, în memoria RAM a tamponului, a programului care va governa atât transferurile de date cu PC-ul, cât și cu interfața electronică a motoarelor pas cu pas. Microcontrolerul primește de la calculator blocuri de informații reprezentând direcție și număr de pași pentru fiecare dintre motoare, precum și informații referitoare la regimurile de lucru ale acestora (viteză inițială, viteză maximă, pantă de accelerare). Comunicația cu sistemul de calcul se desfășoară asincron față de cea cu motoarele pas cu pas, realizându-se la momentele de timp în care PC-ul este dispus să o facă (oricum, standardul USB nu permite nici unui periferic să inițieze o comunicație, acesta neavând altă soluție decât să aștepte să fie interogată dacă dorește acest lucru). După transferul unui bloc de date, microcontrolerul le analizează, trimițând pe liniile portului B semnalele de comandă (direcție și pas) ale motoarelor, la momentele de timp impuse de regimul de funcționare al acestora. Aceste momente de timp sunt determinate prin programarea corespunzătoare a temporizatoarelor interne, pe baza informațiilor privitoare la regimul de lucru, primite de la PC.

Pe lângă avantajele deja amintite ale comunicării prin portul USB, se remarcă încă unul, foarte important din punct de vedere al fiabilității și disponibilității, cel al detecției și corecției erorilor. Acest mecanism se bazează pe verificarea ciclică a redundanței (CRC) și pe un protocol bazat pe pachete ACK sau NAK de confirmare, respectiv de infirmare, a recepției corecte a unui pachet de date utile. Prin CRC sunt detectate pachetele utile afectate de erori, corecția acestora făcându-se prin retransmitere. În cazul în care erorile afectează chiar pachetele de confirmare, se poate ajunge la retransmiterea unui pachet util care a fost recepționat corect la un moment anterior de timp. În aceste cazuri de retransmisie multiplă este alternată setarea cu resetarea unui bit dedicat între transmisiile succesive, receptorul având, astfel, posibilitatea de a detecta și de a elimina copiile pachetelor utile care au ajuns deja, în bune condiții, la destinație. Interesant pentru

programator este faptul că acest proces este complet transparent pentru el, fiind integrat în hardware (ceea ce asigură o viteză ridicată de procesare) și monitorizat de sistemul de operare. Programatorul va primi doar pachetele utile, corecte, fiind necesar a se concentra exclusiv asupra aplicației proprii.

Paragraful 2.3, intitulat „Interfațarea dintre dispozitivul digital și motoarele pas cu pas”, tratează, pe de o parte, tipurile de motoare pas cu pas oferite actualmente de industrie și necesitățile lor de comandă, iar pe de altă parte modul de realizare a interfeței electronice pentru a răspunde acestor necesități. Astfel, sunt trecute în revistă, din punct de vedere constructiv, motoarele pas cu pas având înfășurările configurate pentru comanda unipolară, precum și cele având înfășurările pentru comandă bipolară. Aceste configurații sunt prezentate în conjuncție cu schema de principiu a etajului final de excitare a înfășurărilor. O dată cunoscute soluțiile constructive sunt prezentate modurile de excitare, însoțite de ilustrații ale formelor de undă raportate la momentele discrete de timp în care se aplică. În acest sens, sunt amintite excitările: într-o singură fază, în două faze, în jumătate de pas și în micropas, fiind prezentate avantajele și dezavantajele fiecăreia pentru o mai facilă alegere în cazul unei aplicații concrete. Paragraful continuă cu o analiză comparativă a motoarelor unipolare față de cele bipolare, însoțite de diagrame constructive și funcționale, precum și de diagrame comparative de variație a parametrilor. Având în vedere că se lucrează cu sarcini inductive, este prezentată și o scurtă analiză a comenzii în curent constant față de cea în tensiune constantă (mai comod de implementat). Mai departe sunt prezentate posibile îmbunătățiri ale circuitelor unipolare, urmate de o prezentare mai detaliată a avantajelor și dezavantajelor comenzii de tip jumătate de pas, deoarece acest regim de lucru este implementat în funcționarea echipamentului *Comp-U-Craft*, deoarece permite dublarea rezoluției fără modificări hardware sau mecanice. Sunt prezentate comparativ caracteristicile cuplu/frecvență pentru comanda în jumătate de pas, față de comanda cu pas întreg. Deoarece avantajul dublării rezoluției este contrabalansat de variația de cuplu care apare din cauza faptului că la momente succesive de timp alternează excitarea pe o fază, respectiv pe două faze, este prezentată și soluția excitării cu creștere de curent pe faza care este unic excitată la un moment dat. Paragraful trece, apoi, la un domeniu mai sensibil, care înglobează cunoștințele prezentate anterior, anume cel al generării electronice a semnalelor necesare



excitației înfășurărilor motoarelor, pe baza semnalelor digitale sincrone, de direcție și de pas, emise de microcontroler. După prezentarea cronogramelor necesare comenzilor dorite, precum și a metodelor de măsurare indirectă a momentelor rezistente, sunt prezentate circuitele integrate pe baza cărora a fost proiectată interfața electronică. Paragraful se încheie cu descrierea schemei care asigură excitarea motoarelor pas cu pas ale echipamentului *Comp-U-Craft*.

Capitolul 3, eminent original, intitulat „Pachetul software”, prezintă programele suitei software, necesare atât conducerii echipamentului mecano-electric, cât și designului proiectelor de executat. Autorul își aduce aici următoarele contribuții:

- Analiza problemelor cinematice care au necesitat rezolvare software și selecția algoritmilor implementați de programatori;
- Analiza și stabilirea interfeței cu utilizatorul a programelor dezvoltate, de unde decurge și modul de operare a echipamentului;
- Coordonarea și supervizarea dezvoltării software.

Capitolul debutează cu paragraful 3.1, „Introducere”, care prezintă componentele pachetului de programe dezvoltat până în prezent, precum și destinațiile acestora. În acest paragraf se face o evaluare atât a necesităților de comandă a echipamentului *Comp-U-Craft*, la nivelul superior al aplicațiilor, cât și a funcționalității implementate ca urmare a scopurilor urmărite și ale reacțiilor pieței. De asemenea, tot aici sunt prezentate posibilele soluții de rezolvare a problemelor sau de implementare a elementelor funcționale, justificându-se alegerile făcute. Înainte de a se încheia, paragraful prezintă structura pachetului de software și relațiile de interdependență dintre componente.

Paragraful 3.2 se intitulează „Partea de CAM” și prezintă componenta *CD Nelson Commander*, care acoperă acest domeniu. De-a lungul anilor, această componentă a evoluat de la un simplu driver, până la o aplicație puternică, independentă (între anumite limite) față de puterea de calcul a PC-ului pe care rulează și de versiunea de Windows folosită, care gestionează generarea semnalelor de comandă pentru

motoarele echipamentului *Comp-U-Craft*, în funcție de cerințele proiectului de executat și de constrângerile în vigoare. Aceste constrângeri se împart în două mari categorii, descrise detaliat și bogat ilustrate cu capturi de ecran. O primă categorie este dată de limitările mașinii, în ceea ce privește rezoluția și regimurile de funcționare ale motoarelor pas cu pas. Echipamentul *Comp-U-Craft*, deși prezent pe piață într-o variantă de bază, poate fi construit și în variante dedicate necesităților unor anumiți utilizatori sau ale unor domenii specifice de utilizare. Din această cauză, pe unele exemplare ale echipamentului *Comp-U-Craft* apar motoare cu caracteristici diferite de rezoluție, cuplu, moment de inerție, viteză maximă, pantă de accelerare și de frânare etc. Acestea sunt valori limită absolute care nu pot fi alterate prin proiect, fiind grupate separat, ca setări de echipament.

Setările proiectului grupează acele variabile care stochează parametrii regimului de funcționare a motoarelor în concordanță cu materialul folosit, tipul sculei utilizate și operațiunea executată. Tot aici sunt implementate câteva funcții ajutătoare, cum ar fi poziționarea obiectului de executat pe materialul brut, executarea unui anumit număr de copii și amplasarea lor pe materialul brut, precum și crearea și marcarea referințelor de poziție pentru prelucrări care necesită prinderi multiple. Tot aici există și un modul pentru deplasare manuală, precum și unul destinat setărilor specifice scanării tridimensionale cu ajutorul palpatorului electromecanic. Având în vedere că echipamentul *Comp-U-Craft* se vinde în foarte multe țări de pe cinci continente, *CD Nelson Commander* prezintă și un modul convertor al unităților de măsură între sistemul metric și cel imperial.

Paragraful 3.3, intitulat „Partea de CAD“, prezintă pachetul de programe necesar creării sau modificării proiectelor care se doresc executate. Aceste programe, dintre care unele simple ca interfață și funcționalitate, dar ușor de utilizat chiar și de către cei fără cunoștințe de specialitate, iar altele complexe și cu interfețe elaborate, destinate utilizatorilor pretențioși, care doresc să facă uz de întregul potențial al echipamentului *Comp-U-Craft*, se constituie într-o alternativă viabilă la programele de modelare virtuală bidimensională și tridimensională, existente pe piață. Efortul de a crea o astfel de alternativă este justificat, pe de o parte, de dorința de a oferi clienților o suită unitară de aplicații destinate exploatării *Comp-U-Craft* și, pe de altă parte, de a reuni în această suită facilitățile cele mai

populare existente în aplicațiile dezvoltate de către terți. În acest sens, sunt trecute în revistă, însoțite de scheme bloc și de capturi reprezentative de ecran, aplicațiile de CAD. Prezentarea începe cu *CD Nelson Assembler*, programul inaugural al suitei, care permite combinarea într-un singur proiect a mai multor obiecte create în alte aplicații și exportarea acestuia în format .plt, „digerabil“ de către *CD Nelson Commander*. Urmează *CD Nelson Draw*, aplicație complexă aflată încă în dezvoltare, destinată creării de noi proiecte, având la dispoziție o interfață prietenoasă (ca cea impusă pe piață de *Corel DRAW!*) și o mare precizie a trasării și a poziționării (ca cea prezentă în *AutoCAD*). Sunt prezentate, pe larg și însoțite de capturi de ecran, facilitățile aplicației și modul de lucru. *CD Nelson Phototrace* permite vectorizarea unor imagini raster existente (în scopul reprezentării lor prin gravură, de exemplu), iar *CD Nelson 3D Creator* adaugă la aceste facilități posibilitatea introducerii informației de adâncime obiectelor vectorizate din imagini raster pur bidimensionale. Spre deosebire de acesta din urmă (care face acest lucru automat, pe baza informației de culoare din formatul raster original), *CD Nelson 3D Shaper* este mult mai complex, permițând intervenția utilizatorului în acest proces. Capturile de ecran sunt concludente, la fel ca și descrierea detaliată a facilităților implementate.

Capitolul 4, intitulat „Fixarea fracturilor cranio-maxilo-faciale cu implante metalice“, este esențial în justificarea direcțiilor de cercetare ale tezei. Aici, autorul își aduce următoarele contribuții:

- O sinteză originală despre materialele folosite în implantologie, cu studii comparative, astfel încât să reiasă cu claritate domeniul cel mai potrivit de utilizare pentru fiecare categorie. Studiul este făcut din mai multe puncte de vedere, vizate fiind caracteristicile fizico-chimice, capacitatea de prelucrare și comportamentul biocompatibil;
- O sinteză originală asupra metodelor de implantare cranio-maxilo-faciale cu plăcuțe, ca metodă terapeutică pentru fracturile craniului sau mandibulei. Scopul sintezei este de a jalona cu precizie obiectul studiului, cu ajutorul literaturii de specialitate și a referințelor biblio-

grafice recente, și de a permite orientarea tehnică inginerescă într-un domeniu medical, pentru a înlesni colaborarea celor două categorii de specialiști într-o cercetare multidisciplinară;

- Un studiu de caz, complet original, prezentat la finele capitolului, care validează demersul tezei prin prezentarea detaliată a modului de realizare a unei proteze chirurgicale cranio-maxilo-faciale;
- O analiză numerică, prin metoda elementelor finite, a stărilor de tensiune și de deformare a implantului chirurgical realizat în cadrul studiului de caz.

Paragraful 4.1, intitulat „Materiale folosite în implantologie“, prezintă pe larg materialele folosite la confecționarea implantelor, clasificate pe clase de biomateriale. Aceste materiale sunt analizate din punct de vedere al caracteristicilor fizico-chimice, mecanice și de biocompatibilitate. Analiza este făcută comparativ, prezentându-se domeniile de utilizare cele mai potrivite. Paragraful 4.1 este însoțit de tabele sintetice și de ilustrații, pentru o urmărire mai ușoară a caracteristicilor, comportamentului și domeniului de aplicare al materialelor folosite la confecționarea implantelor chirurgicale cranio-maxilo-faciale.

Paragraful 4.2, intitulat „Elemente de fixare“, prezintă plăcuțele și șuruburile folosite la reducerea și fixarea fracturilor mandibulare și craniene. După introducerea în problematica generală se trece la o prezentare amănunțită, ilustrată cu numeroase imagini și schițe, a tipurilor de plăci de adaptare și de fixare folosite în cazul fracturilor anterior amintite. În continuare, sunt prezentate șuruburile cranio-maxilo-faciale, precum și cele mandibulare. Sunt prezentate, de asemenea, configurații speciale de plăci, textul fiind însoțit și aici de un număr mare de imagini și schițe pentru înțelegerea practică a problemei abordate.

Paragraful 4.3, intitulat „Studiu de caz“, prezintă în detaliu modul de execuție, cu ajutorul echipamentului *Comp-U-Craft*, a unei proteze similare modelului LN 331 S, din catalogul „Aesculap“. Se validează, astfel, scopul declarat de utilizare a echipamentului *Comp-U-Craft* în domeniul implantologiei chirurgicale cranio-maxilo-faciale, avantajul acestei metode față de utilizarea unor proteze prefabricate fiind posibilitatea adaptării exacte a formei și a dimensiunilor pentru

cazul fiecărui pacient în parte, de regulă preoperator, dar la nevoie chiar și intraoperator.

Dintre multiplele variante a căror justificare, din punct de vedere al intervențiilor chirurgicale, poate fi fundamentată doar de către medicii chirurghi, s-a ales o plăcuță multifuncțională, care s-a dovedit eficientă atât la fracturile feței și ale mandibulei, unde se impune păstrarea planeității și o rezistență ridicată, cât și la fracturile de boltă craniană, unde este necesar să se muleze după forma craniului și unde criteriul rezistenței mecanice nu contează (deoarece în partea superioară a craniului nu există o musculatură care să dezvolte forțe de mărimi similare cu cele care pun în mișcare mandibula, cu cele care acționează accidental la mișcări anormale ale acesteia sau care acționează asupra scheletului facial fix în timpul schimbării de mimică a feței). Astfel, într-un prim scenariu, a fost modelată plăcuța de implantare tip LN 331 S din oțel inoxidabil, amplasată pe o calotă semisferică din os, având formă similară cu calota craniană. Calota este fracturată în urma unei lovituri accidentale după o linie neregulată, dar fractura este redusă și fixată cu ajutorul plăcuței și a patru șuruburi cu filet special, pentru os. Analiza numerică s-a făcut cu Metoda Elementelor Finite (MEF), utilizând aplicația profesională ANSYS, care generează, în acest scop, rețeaua cu elemente finite triunghiulare, modelul cu plăcuța pe calotă conținând un număr de noduri și de elemente care rezultă automat în funcție de dimensiunile calotei și ale plăcuței implantate.

Studiul comportării mecanice a plăcuței de implantare se face fără încărcare cu forțe exterioare, singurele forțe fiind cele care apar în șuruburile de prindere. Mai trebuie menționat faptul că zona de contact între plăcuță și scheletul cranian este considerată naturală, fără întrepătrunderi între materialul osos și materialul implantului. Aceasta permite studiul comportării mecanice separate a osului și a plăcuței, singurele legături mecanice acceptate fiind cele reale, prin șuruburile de fixare. Pentru a se obține distribuția de tensiuni și deformări pe ansamblul mecanic format din calota ososă implantată cu plăcuța LN 331 S din oțel inoxidabil biocompatibil este necesar să se precizeze caracteristicile fizice și proprietățile mecanice ale materialelor celor două componente din sistem.

Din analiza datelor prezentate se observă că există diferențe semnificative ale proprietăților fizice și ale caracteristicilor mecanice între cele două materiale, motiv pentru care, în numeroase situații, se încearcă realizarea implantelor din materiale plastice sau compozite cu proprietăți similare osului uman. Faptul că oțelul inoxidabil utilizat pentru realizarea plăcuței LN 331 S și a șuruburilor de fixare are proprietăți mecanice mult superioare celor ale osului implantat nu deranjează comportarea mecanică a structurii, deoarece cea mai importantă caracteristică a elementelor de fixare (implantele și șuruburile) care se ia în considerație este biocompatibilitatea. Materialul utilizat asigură această biocompatibilitate și faptul că el prezintă caracteristici mecanice cu valori superioare celor ale osului reprezintă un aspect pozitiv.

Atunci când plăcuțele pentru implantare sunt utilizate pentru fixarea fragmentelor osoase pe porțiuni plane ale scheletului facial, starea de tensiune și de deformare este diferită în comparație cu situația prezentată la fixarea unei fracturi a calotei, unde plăcuța este inițial deformată după forma capului. Se poate exemplifica plăcuța de aceeași formă inițială, utilizată pentru fixarea a două fragmente obținute prin fracturarea mandibulei, asupra plăcuței acționând ansamblul muscular pterigoid-maseter, care dezvoltă forțe de 500 N în planul plăcii. Se observă că valorile maxime ale tensiunilor echivalente sunt inferioare celor înregistrate la cazul fixării calotei sferice, situație care se datorează modului diferit de fixare, precum și pretensionării plăcuței determinată de forma calotei, pretensionare inexistentă la osul cu suprafața de fixare plană. Folosind aceeași plăcuță pentru fixarea unei fracturi de mandibulă, suprafața de fixare fiind plană, iar asupra plăcuței acționând suplimentar o forță datorită ocluziei, rezultă o distribuție a tensiunilor și o distribuție a deformațiilor semnificativ diferite față de cazul precedent.

Devine evident că același tip de plăcuță, pe același tip de os, este solicitată diferit și se deformează diferit, în funcție de tipul de solicitare externă aplicată. Analiza efectivă a evidențiat faptul că se pot folosi plăcuțe tipizate cu aceleași caracteristici mecanice, aceeași formă și din același material, pe fracturi plasate diferit pe oase ale scheletului cranian și solicitate mecanic diferit. Rezultatele fixării fragmentelor osoase sunt corespunzătoare din punct de vedere mecanic în toate cazurile studiate, fapt care susține tehnica utilizării plăcuțelor tipizate în diferite intervenții

chirurgicale reparatorii a structurii osoase. Aceleași tipuri de plăcuțe se pot folosi și pentru fixarea fragmentelor de oase lungi rezultate în urma fracturărilor, deși acestea au cu totul altă structură și alte proprietăți mecanice comparativ cu oasele capului. Astfel, oasele lungi au structura și proprietăți similare cu oasele capului doar pe exterior, interiorul având o structură spongioasă, cu proprietăți mecanice mult inferioare. Plăcuța analizată poate fi utilizată la fixarea unor fracturi pe astfel de oase, pentru ilustrare prezentându-se cazul unei fracturi de femur fixată prin plăcuța prinsă în patru șuruburi.

Bibliografia lecturată cuprinde un număr de 121 de titluri, majoritatea de dată recentă. Acestea sunt toate citate în lucrare, lor adăugându-li-se alte 17 titluri, reprezentând standardele care au stat la baza conceperii și execuției echipamentului *Comp-U-Craft*.

Pentru a crește claritatea tezei și a facilita urmărirea ei logică, o cantitate însemnată de informații de detaliu a fost trecută în anexe. Astfel, Anexa 1 prezintă sursa programului care se descarcă în memoria locală a microcontrolerului AN 2131 Q. Anexa 2 prezintă datele de catalog ale circuitelor integrate folosite la construcția interfeței electronice a motoarelor pas cu pas. Anexa 3 prezintă algoritmul Bresenham în comparație cu algoritmul care implementează ecuația dreptei, fiind arătat și un exemplu de funcție de realizare a mișcării pe baza acestui algoritm. Anexa 4 prezintă referințele normative internaționale pentru execuția șuruburilor folosite la fixarea implantelor chirurgicale cranio-maxilo-faciale. Anexa 5 prezintă detalii tehnice referitoare la funcționarea, construcția, cablarea și utilizarea motoarelor pas cu pas.

În concluzie, teza documentează un demers ingineresc executat după canoanele cercetării moderne, adică începând cu un studiu de piață, continuând cu creionarea direcțiilor de cercetare și cu justificarea tehnico-economică, trecând apoi la sinteza bibliografică a elementelor necesare unei proiectări performante și încheindu-se cu proiectarea propriu-zisă. Un astfel de demers asigură întotdeauna succesul scontat, fiind liantul între elementele cheie ale acestuia. Rezultatul nu a fost mai

prejos nici în cazul cercetării care face obiectul tezei de față, succesul de piață de pe cinci continente confirmând acest lucru.

Cu toate acestea, teza nu epuizează un domeniu de cercetare, ci dimpotrivă, deschide noi direcții de studiu. Astfel, în acest moment se conturează următoarele direcții de dezvoltare ulterioară:

- Din punct de vedere conceptual, deschide drumul echipamentelor relativ mici și ieftine, dar cu performanțe compatibile cu cele din marea industrie, care să permită micilor întreprinzători (baza oricărei economii) să realizeze produse competitive calitativ, în serii mici sau chiar unicate. Nișa de piață pentru aceste produse este neocupată în România și foarte slab acoperită pe plan mondial, astfel încât aici oportunitățile sunt nelimitate.
- Din punct de vedere constructiv, se pot dezvolta versiuni particularizate ale echipamentului, pentru a crește productivitatea și a scădea costurile de realizare a unor produse specifice, pentru care interesul pieței este mai mare, la un moment dat.
- Tot din punct de vedere constructiv, se poate definitiva tehnologic cercetarea (aflată încă în stadiu experimental) de introducere a două axe suplimentare (una pentru rotirea piesei în planul mesei de lucru, iar a doua pentru înclinarea direcției de coborîre a sculei față de axa Z), ceea ce va permite executarea unor piese tridimensionale cu forme complexe, beneficiind de o sculă prelucrătoare cu cinci grade de libertate, față de piesel tridimensionale care se pot obține cu comanda pe numai trei axe, scula prelucrătoare rămânând permanent verticală față de planul de prindere al materialului brut.
- În fine, din punct de vedere aplicativ, datorită versatilității mari, se deschide un uriaș orizont de cercetare și dezvoltare în ceea ce privește domeniul aplicațiilor posibile, implantologia maxilo-facială fiind doar un segment îngust în care echipamentul *Comp-U-Craft* și-a dovedit utilitatea.



## Bibliografie

- [1] D.E. Altobelli, A.J. Yaremchuk, J.S. Gruss. *Implant Materials in Rigid Fixation: Physical, Mechanical, Corrosion and Biocompatibility Considerations*, In: *Rigid Fixation of the Craniomaxillofacial Skeleton*, 1992
- [2] W.C Ardary. *Plate and Screw Fixation in the Management of Mandible Fractures*, *Clin. Plast. Surgery*, no. 16, pp. 61–67, 1989.
- [3] V. Bacria, T. Gligor. *Mecanica*, Centrul de Multiplicare al Universității Tehnice din Timișoara, 1994.
- [4] L. Benche. *Mecanica și rezistența materialelor*, Universitatea din Brașov, 1981.
- [5] D.D. Boiangiu, S. Murgulescu. *Mecanica*, Institutul Politehnic, București, 1980.
- [6] N. Boja, E. Petrișor, E. Topuz, F.C. Klepp, I. Mihaș, B. Rendi. *Algebră geometrie, ecuații diferențiale*, Universitatea Tehnică Timișoara, 1992.
- [7] N. Boja, B. Căruntu, L. Cristea. *Algebră lineară, geometrie analitică și diferențială, ecuații diferențiale*, Editura „Politehnica“, Timișoara, 2001.
- [8] L. Brândeș. *Mecanică Dinamică*, Institutul Politehnic „Traian Vuia“, Timișoara, 1982.
- [9] N. Brinckman, et. al. *Ortopaedic Biomechanics*, A.O. Publishing Thieme, 2002.
- [10] Gh. Buzdugan, E. Mihăilescu, M. Radeș. *Măsurarea vibrațiilor*, Editura Academiei R.S.R., București, 1979.
- [11] E.W. Chang, Samuel M. Lam. *Mandible Fractures, General Principles and Occlusion*, March 28, 2002, <http://www.emedicine.com>.
- [12] A. Chiriac. *Mecanica*, Universitatea Tehnică Timișoara, 1994.

- [13] A. Chisăliță. *Mecanica*, Atelierul de Multiplicare al Institutului Politehnic, Cluj-Napoca, 1989.
- [14] W.D. Clark, E.J. Simko. *Mandibular Fractures, Current Therapy in Otolaryngology*, 6<sup>th</sup> ed., pp. 15–152, 1998.
- [15] B. Crstici, T. Bânzaru, O. Lipovan, M. Neau, N.Neamțu, N. Neuhaus, B. Rendi, D. Rendi, I. Sturz. *Matematici speciale*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [16] A. Dănoiu, I. Smicală. *Mecanica*, Centrul de Multiplicare al Institutului Politehnic din Timișoara, 1982.
- [17] G. Deliu, E. Secara, I. Sofariu. *Mecanica, cinematica și dinamica*, Universitatea din Brașov, 1983.
- [18] G. Deliu, *Mecanica*, Editura Albastră, Cluj-Napoca, 2003.
- [19] C. Demian. *Utilizarea titanului și aliajelor de titan la realizarea protezelor și elementelor de fixare*, Proiect de diplomă, Universitatea „Politehnica” din Timișoara, 2003.
- [20] D. Drăgulescu. *Mecanica și rezistența materialelor*, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1979.
- [21] D. Drăgulescu, A. Cornut. *Mecanica și rezistența materialelor*, Institutul Politehnic „Traian Vuia”, Timișoara, 1980.
- [22] D. Drăgulescu, M. Toth-Tașcău. *Elemente de inginerie mecanică*, Universitatea Tehnică Timișoara, 1993.
- [23] D. Drăgulescu. *Dinamica roboților*, Editura Didactică și Pedagogică, R.A., București, 1997.
- [24] D. Drăgulescu, M. Toth-Tașcău. *Mecanica*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2002.

- [25] D. Drăgulescu, D. Stanciu, M. Toth-Tașcău. *About the stress distribution on teeth using finite elements method*, Acta of Bioengineering and Biomechanics, vol. 4, 2002.
- [26] D. Drăgulescu, D. Stanciu, M. Toth-Tașcău. *Modeling and dynamic study of human mandible*, Journal of Politehnica University Timisoara, Transactions on Mechanical Engineering, 2002.
- [27] D. Drăgulescu, D. Stanciu, M. Toth-Tașcău. *Strain Distribution on teeth using Finite Elements Method*, Proceedings of the 4<sup>th</sup> GRACM Congress on Computational Mechanics, 2002
- [28] D. Drăgulescu, M. Toth-Tașcău. *Orthopaedic biomechanics. Human body parts modeling*, Biomedical Engineering Intensive Course, Wilhelmshaven, Germania, sept. 2003.
- [29] D. Drăgulescu, M. Dreucean, D. Stanciu, M. Toth-Tașcău. *On mandible rebuilding based on numerical modeling and image processing*, Russian Journal of Biomechanics, vol. 7, no. 2, 2003.
- [30] D. Drăgulescu, V. Morcovescu. *L'étude du comportement du fémur par la méthode des éléments finis*, Proceedings of the 16<sup>th</sup> AFM Conference, Nice, France, 2003.
- [31] D. Drăgulescu, M. Dreucean, E. Urtilă, A. Iovan. *Contributions to reconstruction techniques of the craniofacial skeleton*, Craiova Medical Journal, vol. 5, sup. 3.
- [32] T. Engdahl. *How to Use Disk Drive Stepper Motor*, <http://www.hut.fi/Misc/Electronics/circuits/diskstepper.html>
- [33] B.L. Eppley, A.M. Sandove. *A Comparison of Reabsorbable and Metallic Fixation in Healing of Calvarial Bone Grafts*, Plastic and Reconstructive Surgery, no. 96, Sept, pp. 316–322, 1995.

- [34] T. Fader, A. Stanciu. *Combină multifuncțională cu comandă numerică și 3÷5 grade de libertate*. Analele Universității „Aurel Vlaicu“ din Arad, Seria „Electrică“, Fascicola „Electrotehnică, electronică, automatizări“, ISSN 1582-3377, Arad, 2000, pp. 139–144;
- [35] D.W. Friedman, P.J. Orland, R.S. Greco. *Biomaterials: An Historical Perspective*, In: *Implantation Biomaterials. The Host Response to Biomechanical Devices*, 1994.
- [36] J. Gross, J. Retto, E. Rosen. *Musculoskeletal Examination*, Second Edition, Blackwell Publishing, 2002.
- [37] I. Groșanu. *Mecanica*, Centrul de Multiplicare al Institutului Politehnic, Timișoara, 1985.
- [38] J.S. Grus. *Craniofacial Osteotomies and Rigid Fixation in the Correction of Post-traumatic Craniofacial Deformities*, *Scandinavian Journal of Plastic & Reconstructiv Surgery & Hand Surgery*, Supplementum 27, pp. 83–95, 1995.
- [39] A. Hegedüs. *Mecanică*, Centrul de Multiplicare al Universității Tehnice, Timișoara, 1992.
- [40] Hütte. *Manualul inginerului. Fundamente*, Editura Tehnică, București, 1995.
- [41] J.C Irish, P.J. Gullane. *Plating Techniques for Mandibular Reconstruction*, *Op. Tech. Otol. Head Neck Surgery*, no. 4, pp. 96–103, 1993.
- [42] D.W. Jones, *Control of Stepping Motors*, <http://www.cs.uiowa.edu/~jones/step>
- [43] C. Lindqvist. *Future of Biodegradable Osteosynthesis in Maxillofacial Fracture Surgery (Editorial)*, *British Jurnal of Oral & Maxillofacial Surgery*, no. 33, pp. 69–70, 1995.
- [44] R.H. Maisel, P.A. Hilger, G.L. Adams. *Reconstruction of the Mandible*, *Laryngoscope*, nr. 93, pp. 1112–1126, 1983.

- [45] D. Mangeron, N. Irimiciuc. *Mecanica rigidelor cu aplicații în inginerie*, Editura Tehnică, București, 1978.
- [46] C. Marin, T. Huidu. *Mecanica*, Editura Printech, București, 1999.
- [47] L. Moldovan. *Mecanica*, Universitatea „Petru Maior“, Târgu-Mureș, 1998.
- [48] V. Morcovescu, D. Drăgulescu. *Reconstruction of the human femur based on the CT slices to perform the finite element analysis*, Journal of Politehnica University Timisoara, Transactions on Mechanical Engineering, 2002.
- [49] V. Olariu, P. Sima, V. Achiriloae. *Mecanica tehnică*, Editura Tehnică, București, 1982.
- [50] W. Panjabi. *Biomechanics in the Musculoskeletal System*, Harcourt Publishing, 2000.
- [51] C.N. Penfold, D. Lang, B.T. Evans. *The Management of Orbital Roof Fractures*, Journal of Oral Maxillofacial Surgery, no. 30, pp. 97–103, 1992.
- [52] H. Peltoniemi. *Biocompatibility and fixation properties of absorbable mini-plates and screws in growing calvarium. An experimental study in sheep*, Academic dissertation, Medical Faculty of the University of Helsinki, March, 2000.
- [53] J. Prein, L.A. Assael, D.W. Klotch, P.N. Manson, B.A. Rahn, W. Schilli. *Manual of Internal Fixation in the Cranio-Facial Skeleton*, Springer, New York, 1998.
- [54] M. Rădoi, L. Popescu. *Mecanică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1969.
- [55] M.L. Richardson. *Facial and Mandibular Fractures*, University of Washington, School of Medicine, <http://www.rad.washington.edu>.
- [56] R.H. Rudderman, R.L. Muller. *Biomechanics of the Facial Skeleton*, Clin. Plast. Surgery, no. 19, pp. 11–29, 1992.

- [57] H. Sax. *Stepper Motor Driving. Application Note*, SGS-THOMSON Microelectronics.
- [58] G. Silaș, I. Groșanu. *Mecanică*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [59] S. Staicu. *Introducere în mecanica teoretică*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1983.
- [60] A. Stanciu, C. Bursașiu. *Dispozitiv de comandă pentru o combină multifuncțională acționată de motoare pas cu pas*. Analele Universității „Aurel Vlaicu” din Arad, Seria „Electrică”, Fascicola „Electrotehnică, electronică, automatizări”, ISSN 1582–3377, Arad, 2000, pp. 299–304;
- [61] A. Stanciu, A. Ion. *Pachet software pentru comanda numerică a unei combine*. Analele Universității „Aurel Vlaicu” din Arad, Seria „Electrică”, Fascicola „Electrotehnică, electronică, automatizări”, ISSN 1582–3377, Arad, 2000, pp. 305–310;
- [62] D. Stanciu, D. Drăgulescu. *Mandibula umană. Studii imagistice și biomecanice*, Orizonturi Universitare, Timișoara, 2003.
- [63] K.L. Stierman. *Mandibular fractures*, Byron J. Bailey, June 14, 2000.
- [64] J. Sumner-Smith. *Bouncing Clinical Ortopaedics*, A.O. Publishing Thieme, 2001.
- [65] M. Toth-Tașcău, D. Drăgulescu, V. Stănciulescu. *Analiza prin metoda elementelor finite a implantării scheletului facial*, Journal of „Politehnica” University Timisoara, Transactions on Mechanical Engineering, 2002.
- [66] E. Urtilă ș.a. *Chirurgia orală și maxilo-facială*, Editura Medicală, București, 1995.
- [67] E. Urtilă ș.a. *Chirurgia orală și maxilo-facială*, Tratat în colaborare, Editura Medicală, București, 1998.
- [68] A. Vasilescu. *Mecanica*, Editura Conspress, București, 1998.

- [69] Warner Electric. *Stepper & Synchronous Motors*, 1995.
- [70] D.J. Wood. *Mechanical Metallurgy and Passivation of Titanium Implant Alloys*, San José State University, College of Materials Engineering, Spring 1993.
- [71] M.J. Yaremchuk, J.S. Gruss, P.N. Manson. *Rigid Fixation of The Craniomaxillofacial Skeleton*, Boston, Butterworth-Heinemann, 1992.
- [72] N. Zachariades, M. Meztis, G. Rallis. *An Audit of Mandibular Fractures Treated by Intermaxillary Fixation, Intraosseous Wiring and Compression Plating*, British Journal of Oral & Maxillofacial Surgery, no. 34, pp. 293–297, 1996.
- [73] D. Zeevi. *Clinical Biomechanics*, Harcourt Publishing, 2000.
- [74] S.F. Worall. *Maxillofacial injuries*, The Oxford Textbook of Trauma, 2000.
- [75] *How Stepper Motors Work*, <http://www.imagesco.com/articles/picstepper/02.html>.
- [76] *Half Stepping*, <http://www.imagesco.com/articles/picstepper/05.html>.
- [77] *Stepper motors. Lead wires*, [http://www.fdk.co.jp/cyber-e/se10-e/lead\\_e.html](http://www.fdk.co.jp/cyber-e/se10-e/lead_e.html).
- [78] *Stepper motors. Stepper motor terminology*, [http://www.fdk.co.jp/cyber-e/se10-e/terminology\\_e.html](http://www.fdk.co.jp/cyber-e/se10-e/terminology_e.html).
- [79] *Stepper motors. Driving*, [http://www.fdk.co.jp/cyber-e/se10-e/driving\\_e.html](http://www.fdk.co.jp/cyber-e/se10-e/driving_e.html).
- [80] *The L297 Stepper Motor Controller. Application Note*, SGS-THOMSON Microelectronics.
- [81] *Stepper Motor Controller. L297*, SGS-THOMSON Microelectronics.
- [82] *Introduction to Corrosion of Implants*, <http://www.corossion-doctors.org/Implants/Introduction.html>

- [83] *Biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory metal alloy*, Chapter 2. Review of the literature, <http://herkules.oulu.fi/isbn9514252217/html/x753.html>
- [84] *Bresenham's Line Algorithm*, <http://www.cs.unc.edu/~hoff/projects/comp235/bresenham/perform0.html>.
- [85] *Drawing Lines — The Bresenham Algorithm*, <http://gamedev.cs.colorado.edu/tutorials/Bresenham.pdf>.
- [86] *HPGL Controller*, <http://www.abilitysystems.com/hpgl.html>.
- [87] *PCL and HPGL*, <http://www.swiftview.com/pclcorner/pclcorner1.htm>.
- [88] *Floyd-Steinberg Dithering, Classical Algorithm* [http://www.visgraf.impa.br/Courses/ip00/proj/Dithering1/floyd\\_steinberg\\_dithering.html](http://www.visgraf.impa.br/Courses/ip00/proj/Dithering1/floyd_steinberg_dithering.html).
- [89] *Floyd-Steinberg Algorithm*, <http://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall99/cs426/lectures/dither/sld021.htm>
- [90] *Floyd-Steinberg Motor Control*, <http://home.earthlink.net/~mrob/pub/lego/fsmotor.html>
- [91] *EZ-USB, Technical Reference Manual*, [http://www.keil.com/dd/docs/datashts/cypress/an21xx\\_trm.pdf](http://www.keil.com/dd/docs/datashts/cypress/an21xx_trm.pdf).
- [92] *Programming a 24LC00 EEPROM using the EZ-USB I<sup>2</sup>C port*, [http://www.8051.co.kr/html/development/pdf/cpu\\_application\\_note/Cypress/eeeprom\\_app\\_note.pdf](http://www.8051.co.kr/html/development/pdf/cpu_application_note/Cypress/eeeprom_app_note.pdf).
- [93] *Quick and EZ Guide to USB, Cypress*, [http://www.eetasia.com/ARTICLES/2001MAR/2001MAR27\\_MPR\\_CT\\_AN1.PDF](http://www.eetasia.com/ARTICLES/2001MAR/2001MAR27_MPR_CT_AN1.PDF).
- [94] *Soft USB Controller Design Challenges*, Cypress, [http://www.eetasia.com/ARTICLES/2001MAR/2001MAR28\\_MPR\\_CT\\_AN.PDF](http://www.eetasia.com/ARTICLES/2001MAR/2001MAR28_MPR_CT_AN.PDF)
- [95] *Working with Stepper Motors*, <http://eio.com/jasstep.htm>.
- [96] *Stepper Motors*, [http://www.euclidres.com/apps/stepper\\_motor/stepper.html](http://www.euclidres.com/apps/stepper_motor/stepper.html)



- [97] *Controlling Stepper Motors*, <http://neil.fraser.name/hardware/stepper/>
- [98] *Stepper Motor Driving*, <http://www.st.com/stonline/books/ascii/docs/1679.htm>
- [99] *Stepper Motors*, <http://www.doc.ic.ac.uk/~ih/doc/stepper/>
- [100] *The Stepper Motor Archive*, <http://www.wirz.com/stepper/>
- [101] *Stepper Motor Controller*, <http://www.doc.ic.ac.uk/~ih/doc/stepper/control2/connect.html>.
- [102] *Motor Technologies. Stepper Motors*, <http://www.allegromicro.com/techpub2/computmot/a04a08.pdf>
- [103] *Industrial Circuits Application Note. Stepper Motor Basics*, <http://library.solarbotics.net/pdflib/pdf/motorbas.pdf>
- [104] *Stepper Motor and Driver Selection*, <http://www.njr.co.jp/pdf/ee/ee05003.pdf>
- [105] *Stepper Motor System Basics*, <http://www.ams2000.com/stepping101.html>
- [106] *Stepper Motor Technology*, Thompson Airpax Mechatronics, <http://www.allegromicro.com/techpub2/airpax/smh29.pdf>
- [107] *Stepper Motors*, National Instruments, [http://zone.ni.com/devzone/devzone.nsf/webcategories/DCAD2331802781F0862567F60072BB2B?open-document&node=DZ52477\\_US](http://zone.ni.com/devzone/devzone.nsf/webcategories/DCAD2331802781F0862567F60072BB2B?open-document&node=DZ52477_US)
- [108] *Basic Theory of Stepping Motors*, [http://www.sapiens.itgo.com/step\\_motor/](http://www.sapiens.itgo.com/step_motor/)
- [109] *Unipolar Stepper Motor Control Circuit*, [http://home.att.net/~theremin1/Circuit\\_Library/unipolar\\_stepper\\_motor.htm](http://home.att.net/~theremin1/Circuit_Library/unipolar_stepper_motor.htm)
- [110] *Drive Circuit Basics*, <http://www.njr.co.jp/pdf/ee/ee05002.pdf>
- [111] *Stepper Motor*, <http://e-www.motorola.com/webapp/sps/site/overview.jsp?nodeId=03M0zpbmQXGM10C9Zh3C>

- [112] *The ANSYS Home Page*, [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
- [113] *Peter Budgell's ANSYS Tips & Tricks*, [http://www.sympatico.ca/peter\\_budgell](http://www.sympatico.ca/peter_budgell)
- [114] ANSYS Customer Portal, <http://www.ansys.com>
- [115] ANSYS Europe Newsletter Archive, <http://www.ansys.com/europe/newsletters.htm>
- [116] PADT's ANSYS Benchmarks, <http://www.padtinc.com/services/abench/default.htm>
- [117] ANSYS Online Documentation, <http://www.ansys.com>
- [118] ANSYS Tutorials at University of Alberta, <http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys>
- [120] \*\*\* Cercetări privind îmbunătățirea stării de sănătate a populației prin realizarea de implante și echipamente de distracție osoasă. Program BIOTECH/2002–2005.
- [121] \*\*\* Laborator pentru certificarea de implante și distracție osoasă utilizate pentru corectarea scheletului osos — CIDUCOS. Program INFRAS/2003–2005.
- \*\*\* Legea 90/1996 — Legea protecției muncii
- \*\*\* STAS 6857/1-85 — Documentația tehnică în construcția de mașini. Condiții generale pentru desene de execuție.
- \*\*\* STAS 6857/2-85 — Documentația tehnică în construcția de mașini. Condiții generale pentru documente scrise.
- \*\*\* SR ISO 129:1994 — Desene tehnice. Cotare. Principii generale, definiții, metode de executare și indicații speciale.
- \*\*\* STAS ISO 406-91 — Desene tehnice. Tolerarea dimensiunilor liniare și unghiulare.
- \*\*\* SR ISO 1302:1995 — Desene tehnice. Indicarea stării suprafeței.

- \*\*\* STAS ISO 1660-91 — Desene tehnice. Cotarea și tolerarea profilelor.
- \*\*\* SR EN 22768-1:1995 — Toleranțe generale. Partea 1: Tabele ale treptelor de toleranțe și abateri limită pentru alezaje și arbori.
- \*\*\* SR EN 22768-2:1995 — Toleranțe generale. Partea 2: Toleranțe geometrice pentru elemente fără indicarea toleranțelor individuale,
- \*\*\* STAS 4102-85 — Piese pentru instalații de legare la pământ de protecție.
- \*\*\* STAS 12604-89 — Protecția împotriva electrocutării. Prescripții generale.
- \*\*\* STAS 2614/1-86 — Aparate electrice pentru uz casnic și scopuri similare. Condiții tehnice generale de securitate.
- \*\*\* STAS 8138-83 — Echipament electric pentru mașini industriale. Condiții tehnice generale.
- \*\*\* STAS 8857-87 — Mașini unelte pentru prelucrarea prin așchiere a metalelor. Metoda de măsurare a nivelului de zgomot.
- \*\*\* STAS 9153-90 — Culorile indicatoarelor luminoase de semnalizare, ale butoanelor de comandă și ale butoanelor luminoase de comandă.
- \*\*\* STAS 1893/1-87 — Mașini electrice rotative. Condiții tehnice generale. Capitolul 4 Servicii tip. Subcapitolul 4.9 Serviciu cu variații neperiodice de sarcină și turație. Serviciu tip S9
- \*\*\* SR EN 485-1/2/3:1995 — Aluminiu și aliaje de aluminiu. Table, benzi și table groase.



# Anexa 1

Sursa programului care rulează pe microcontrolerul AN2131Q pentru interconectarea echipamentului cu un calculator, prin portul USB

Programul prezentat mai jos este prima variantă, dezvoltată ca proiect de semestru, condus de autorul tezei, de către o semigrupă de studenți în anul al treilea, la materia „Ingineria Calculatoarelor“.

```
.include 'general.inc'
.extrnw (data)adrcmd
.extrnw (data)smt

; segmentul contine tabela de adrese pentru
; handler-ele de evenimente USB
.ASEG USB_table, code

        .org 300h          ; orice adresa e buna, daca e
                          ; page boundary

USB_Jump_Table:
        ljmp    SUDAV_ISR      ; SETUP data available
        .db1 0
        ljmp    SOF_ISR       ; SOF
        .db1 0
        ljmp    SUTOK_ISR     ; SETUP data loading
        .db1 0
        ljmp    SUSP_ISR      ; Global Suspend
```

```
.dbl 0
ljmp    URES_ISR      ; USB Reset
.dbl 0
ljmp    SPARE_ISR
.dbl 0
ljmp    EP0IN_ISR
.dbl 0
ljmp    EP0OUT_ISR
.dbl 0
ljmp    EP1IN_ISR
.dbl 0
ljmp    EP1OUT_ISR
.dbl 0
ljmp    EP2IN_ISR
.dbl 0
ljmp    EP2OUT_ISR   ; il vom folosi la transfer
.dbl 0               ; bulk paired cu EP3OUT
ljmp    EP3IN_ISR
.dbl 0
ljmp    EP3OUT_ISR
.dbl 0
ljmp    EP4IN_ISR
.dbl 0
ljmp    EP4OUT_ISR
.dbl 0
ljmp    EP5IN_ISR
.dbl 0
ljmp    EP5OUT_ISR
.dbl 0
```

## Anexa 1

```
ljmp    EP6IN_ISR
.db1 0
ljmp    EP6OUT_ISR
.db1 0
ljmp    EP7IN_ISR
.db1 0
ljmp    EP7OUT_ISR
.db1 0
```

```
;-----
; Vectori de intrerupere
;-----
```

```
.org 0Bh
ljmp Timer0_ISR      ; Rutina de tratare a intreruperii
                    ; pentru timerul 0, intreruperea TF0

.org 13h
ljmp Int1_ISR        ; Rutina de tratare a intreruperii
                    ; externe 1 - limit switch

.org 43h              ; INT 2 pentru EZ_USB e
                    ; folosit la evenimente USB
ljmp USB_Jump_Table ; Auto-vector va seta byte-ul
                    ; necesar pentru saltul la rutina
                    ; corespunzatoare
```

```
;Autovector = se seteaza automat  
;byte-ul de la adresa 45 (3 al  
;instrucțiunii ljmp)  
  
;a i se sare direct la ljmp-ul  
;corespunzator din jump table
```

```
;-----  
; Rutina tratare transfer USB:  
; se transmit blocuri de comenzi de miscare  
; Endpoint 2 Bulk transfer  
;-----
```

EP2OUT\_ISR:

```
push dps          ; salvarea registrilor e obligatorie  
push dph  
push dpl  
push dph1  
push dpl1  
push acc  
push r7  
  
mov a, EXIF          ; clear bitul pentru IRQ 2  
clr acc.4  
mov EXIF, a  
  
mov dptr, #OUT07IRQ ; clear bitul pentru Endpoint 2 OUT  
mov a, #01000000b  
movx @dptr, a
```



```
mov  dptr, #AUTOPTRH      ; setam registrii Auto pointer
mov  a, .HIGH(OUT2BUF)    ; pentru transfer automat
movx @dptr, a
mov  dptr, #AUTOPTL
mov  a, .LOW(OUT2BUF)
movx @dptr, a

mov  dptr, #OUT2BC        ; preluam dimensiunea pachetului
movx a, @dptr
mov  r7, a

mov  dptr, #AUTODATA     ; incepem transferul de la autopointer
inc  dps                  ; spre zona de data proprie
call get_free_dptr

loop:
inc  dps                  ; dps pointeaza cand spre data pointerul
movx a, @dptr             ; sursa, cand destinatie
inc  dps
movx @dptr, a
inc  dptr
djnz r7, loop

mov  .low( USB_dptr ), dpl ; salvam valoarea curenta a
                           ; pointerului
mov  .high( USB_dptr), dph ; spre datele transferate

mov  dptr, #OUT2BC
```

```
movx @dptr, #0          ; armam urmatorul transfer scriind in
                        OUT2BC

pop  r7                 ; revin din handler... refac registrii
pop  acc
pop  dpl1
pop  dph1
pop  dpl
pop  dph
pop  dps
reti

;-----
; Rutina tratare transfer USB:
; se transmite la PC informatia de stare
; Endpoint 2 Bulk transfer
;-----

EP_2IN_ISR:
    push dps            ; salvarea registrilor e obligatorie
    push dph
    push dpl
    push dph1
    push dpl1
    push acc
    push r7

    ;citire limitatoare
    mov  dptr, #PINSC
```

```
mov a, @dptr

mov dptr, #IN2BUF ; trimit adresa la care ma aflu
mov @dptr, .low(adrcmd) ; in tratare
inc dptr
mov @dptr, .high(adrcmd)
inc dptr
mov @dptr, a
mov dptr, #IN2BC ; armez transferul prin actualizarea
mov @dptr, #3 ; registrului de dimensiune a bufferului

pop r7 ; revin din handler... refac registrii
pop acc
pop dpl1
pop dph1
pop dpl
pop dph
pop dps
reti

;-----
; Rutina tratare transfer USB:
; se transmite comanda halt
; Endpoint 4 Bulk transfer
;-----
EP_4OUT_ISR:
```

```
    push dps                ; salvarea registrilor e obligatorie
    push dph
    push dpl
    push dph1
    push dpl1
    push acc
    push r7

    mov  dptr, #OUT4BUF
    mov  a, @dptr
    cjne a, #10h, l1        ;10h=codul comenzii abort

abort:
    clr  et0                ; clear bit = dezactivez timer 0
                                ;se transmite nivel 0 logic tuturor
                                ;motoarelor

    mov  dptr,#OUTB
    mov  a,#00h
    movx @dptr,a
    mov  USB_buffer,#0
    mov  .low( USB_dptr ), .low( START_BLOCK0 )
    mov  .high( USB_dptr ), .high( START_BLOCK0 )

l1:
    cjne a,#20h,l2         ;20h = codul comenzii start

start:
    mov  .low( adrcmd ), .low( START_BLOCK0 )
    mov  .high( adrcmd ), .high( START_BLOCK0 )
```

```
call IACMD
```

```
l2:
```

```
mov  dptr, #OUT4BC ; armez urmatorul transfer  
mov  a, 0  
mov  @dptr, a
```

```
pop  r7           ; revin din handler... refac registrii  
pop  acc  
pop  dpl1  
pop  dph1  
pop  dpl  
pop  dph  
pop  dps  
reti
```

```
;-----  
;   Functii de uz specific transferului  
;   prin USB  
;-----
```

```
.extrnw (data)USB_dptra  
.extrnt (bit) curent_buffer  
.extrnt (bit) USB_buffer  
;  
;   get_next_dptra returneaza in dptra
```

```
;      adresa urmatoare in setul de date curent  
;      unde se poate transfera un pachet  
;
```

get\_next\_dptra:

```
    push acc          ; salvez valoarea initiala  
    push .low ( USB_dptra )  
    push .high( USB_dptra )  
    jb  USB_buffer, buffer_1      ; sunt in buffer 0 sau 1?
```

buffer\_0:

```
    pop  acc  
    clr  c  
    subb a, .high( END_BLOCK0 )  
    jc   to_buffer1      ; adresa a depasit primul buffer  
    pop  acc  
    clr  c  
    subb a, .low( END_BLOCK0 )      ; adresa a depasit primul bffr  
    jc   to_buffer1
```

to\_buffer1:

```
    mov  .low( USB_dptra ), .low( START_BLOCK1 )  
    mov  .high( USB_dptra ), .high( START_BLOCK1 )  
    mov  dpl, .low( START_BLOCK1 )  
    mov  dph, .high( START_BLOCK1 )  
    ret
```

buffer\_1:

```
    pop  acc
```

```
clr c
subb a, .high( END_BLOCK1 )
jc to_buffer0 ; adresa a depasit al doilea buffer
pop acc
clr c
subb a, .low( END_BLOCK1 ) ; adresa a depasit al doilea
;buffer
jc to_buffer0
```

to\_buffer0:

```
mov .low( USB_dptr ), .low( START_BLOCK0 )
mov .high( USB_dptr ), .high( START_BLOCK0 )
mov dpl, .low( START_BLOCK0 )
mov dph, .high( START_BLOCK0 )
ret
```

```
;-----
; programarea timerelor si ISR-ul pentru timere
;-----
;Se foloseste unul din cei 2 pointeri DPTR pentru lucrul
;cu adresa din memoria RAM extern de unde urmeaza sa se
;citeasca urmatoarea comanda de miscare. Aceasta adresa
;se va pastra in permanenta in memorie (?RAM intern),
;in variabila numita 'adrcmd'
;Comanda de miscare cuprinde: 1 octet pentru tipul miscarii
;(pas x,y,z si directie x,y,z), 3 octeti pentru numarul de
;pasi si 2 octeti pentru precizarea delay-ului. Simtul se
```

```
;afla in memorie pe 2 octeti, in variabilele ;'smt'.  
;Intrucat timerele numara "in sus" de la valoarea  
;incarcata, atat delay-ul, cat si simtul trebuie;  
;incarcate complementate fata de valoarea lor reala.  
;Pentru a economisi timpul afectat acestei operatii de  
;catre microcontroler, s-a convenit ca datele sa fie primite  
;de la PC in varianta complementata.
```

MAIN:

```
; initializare stiva  
mov SP, #STACK-1  
  
; initializare intreruperi USB  
mov dptr, #USBBAV  
movx a, @dptr  
setb acc.0 ;setam bitul AutoVector Enable  
movx @dptr, a  
mov dptr, #OUT07IEN  
mov a, #00011000b ; setam bitul 3 pentru enable interrupt  
movx @dptr, a  
  
; validare endpointuri USB  
mov dptr, #IN07VAL  
mov a, #00001000b  
mov @dptr, a  
mov dptr, #OUT07VAL  
mov a, #00011000b  
mov @dptr, a
```



## Anexa 1

```
; validare intreruperi USB
mov  dptr, IN07IEN
mov  a, #00001000b
mov  @dptr, a

setb ex2          ; enable int 2 (intreruperi USB)
setb PR2OUT       ; enable double-buffer ptr. endpoint2

;initializare simt
mov  .low(smt),   #9Bh
mov  .high(smt),  #FFh ;100d=64h complementat pe 16 biti
                        ;echivalentul a 50 µs

;initializare adresa primei comenzi
mov  .low(adrcmd), .low(START_BLOCK_1)
mov  .high(adrcmd), .high(START_BLOCK_1)
;programare timer 0 - modul 1 (pe 16 biti), sursa tactului
;este frecventa de clock divizata cu 12, comanda timerului
;prin bitul tr0
mov  tmod,#01h
;activare generala intreruperi, activare intreruperi timer0
;activare intr. externa 1 (limit switch) activa pe nivel
setb ea
setb et0
setb ex1
clr  it1
;programare B ca port de iesire, prin el se vor genera
;secventele de pasi, deci el se va conecta la driverul
```

```
    ;motoarelor
    mov  dptr,#PORTBCFG
    mov  a,#00h
    movx @dptr,a
    mov  dptr,#OEB
    mov  a,#0ffh
    movx @dptr,a

    ;programare bitii 0,1,2 din portul C ca intrari pt citire
    ;limitswitch
    mov  dptr,#PORTCCFG
    mov  a,@dptr
    orl  a,#03h
    movx @dptr,a
    mov  dptr,#OEC
    mov  a,@dptr
    orl  a,#F8h
    movx @dptr,a
    ;se asteapta comanda de start

    ;bucla infinita - programul face totul cu intreruperi

bucl:
    sjmp bucl

IACMD:
    ;salvare registre in stiva
    push a
    push psw
```

## Anexa 1

```
mov  dptr,      adrcmd
;se preiau in registrele r0 tipul miscarii, in r1, r2, r3
;numarul de pasi (r1 - lsb), r4, r5 - delay-ul (r4 - lsb)
;folosim setul 3 de registre r0-7
setb rs1
setb rs0
movx a,@dptr
mov  r0,a
inc  dptr
movx a,@dptr
mov  r3,a          ;pp. ca in memorie msb e plasat primul
inc  dptr
movx a,@dptr
mov  r2,a
inc  dptr
movx a,@dptr
mov  r1,a
inc  dptr
movx a,@dptr
mov  r5,a
inc  dptr
movx a,@dptr
mov  r4,a
;se testeaza dptr - trebuie sa fie in interiorul unuia din
;cele 2 blocuri
mov  a,dph
cjne a,.high(END_BLOCK1),testbl2
mov  a,dpl
```

```
    cjne a, .low(END_BLOCK1), testbl2
    ;s-a ajuns la sfarsitul blocului 1, se trece la blocul 2
    mov  dph, .high(START_BLOCK2)
    mov  dpl, .low(START_BLOCK2)
    sjmp sftest

testbl2:
    mov  a, dph
    cjne a, .high(END_BLOCK2), sftest
    mov  a, dpl
    cjne a, .low(END_BLOCK2), sftest
    ;s-a ajuns la sfarsitul blocului 2, se trece la blocul 1
    mov  dph, .high(START_BLOCK1)
    mov  dpl, .low(START_BLOCK1)
    sjmp sftest      ;daca l-am modificat, nu il mai incrementez
    inc  dptr

sftest:
    mov  adrcmd, dptr      ;adresa urmatoarei comenzi se salveaza
                          ;in memorie

    ;se incepe cu transmiterea unui simt
    mov  dptr, #OUTB
    mov  a, r0
    movx @dptr, a

    ;se opreste temporar timerul pentru programare, daca era
    ;pornit
    clr  tr0
    mov  t10, .low(smt)
    mov  th0, .high(smt)
```

```
;se porneste timerul
setb tr0
;se decrementeaza contorul de pasi cu functia decnt
lcall    decnt
;folosim bitul 00h (adresa 20h) pentru a arata ca urmeaza
;un simt sau
;un delay ( nivel zero); simt//delay = 0 va arata ca
;urmeaza un delay
clr    #00h
;restaurare registre din stiva
pop    psw
pop    a

endcmd:
    ret

;ISR pentru timer
Timer0_ISR:
    ;salvare registre in stiva
    push a
    push psw
    ;folosim setul 3 de registre r0-7
    setb rs1
    setb rs0
    ;se testeaza bitul simt//delay
    jbc  #00h,simt ;daca bitul 00h=1 face salt si anuleaza bitul
    ;tratate delay
```

```
mov  dptr,#OUTB
mov  a,r0
and  a,#07h    ;se pastreaza directia de miscare
movx @dptr,a
;oprire timer pentru programare
clr  tr0
mov  tl0,r4
mov  th0,r5
;pornire timer
setb tr0
;urmeaza simt
setb #00h
;restaurare registre din stiva
pop  psw
pop  a
reti
```

simt:

```
;se transmite un simt
mov  dptr,#OUTB
mov  a,r0
movx @dptr,a
;se opreste temporar timerul
clr  tr0
mov  tl0,.low(smt)
mov  th0,.high(smt)
;se porneste timerul
setb tr0
```

```
;se decrementeaza contorul de pasi cu functia decnt
;daca s-a ajuns la 0, aceasta functie va apela IACMD
scall    decnt
;restaurare registre din stiva
pop  psw
pop  a
reti

; functia de decrementare a contorului (r3,r2,r1)

decnt:
    dec  r1
    jnc  sfdec
    dec  r2
    jnc  sfdec
    dec  r3
    jnc  sfdec
    ;contorul a ajuns la 0
    acall    IACMD

sfdec:
    ret

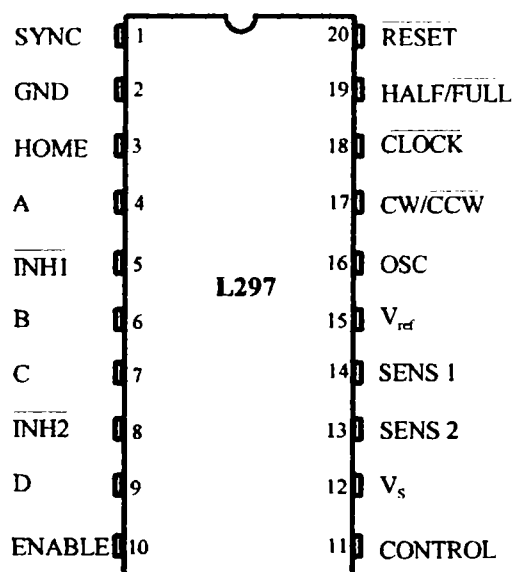
;ISR-ul pentru limit switch-uri
```

```
Int1_ISR:
    push dph
    push dpl
    ;oprire timer
    clr tr0
    ;se transmite nivel 0 logic tuturor motoarelor
    mov  dptr,#OUTB
    mov  a,#00h
    movx @dptr,a
    pop  dpl
    pop  dph
    reti
```



## Anexa 2

Disponerea și semnificația pinilor capsulei L297 [80]



Funcțiile pinilor pentru circuitul L297 [80]

Nr. crt.	Denumire pin	Funcție
1	<i>SYNC</i>	Ieșire a oscilatorului încorporat de comutare. Când se dorește sincronizarea mai multor circuite L297, ieșirile SYNC se leagă împreună. Dacă este folosită o sursă externă de tact, atunci semnalul va fi injectat aici.
2	<i>GND</i>	Masa
3	<i>HOME</i>	Ieșire open collector activă când circuitul L297 se află în starea inițială ( $ABCD = 0101$ ). Tranzistorul este deschis când acest semnal este activ.
4	<i>A</i>	Semnalul de comandă a fazei <i>A</i> a motorului pentru nivelul de putere.

5	$\overline{INH1}$	Activ pe zero, acest semnal inhibă controlul pentru nivelul de comandă al fazelor $A$ și $B$ . Când este folosită o punte bipolară, acest semnal asigură o descreștere rapidă a curentului de sarcină, atunci când o înfășurare nu este energizată. De asemenea, este folosită drept comutator pentru a regla curentul de sarcină dacă intrarea CONTROL este pe zero.
6	$B$	Semnalul de comandă a fazei $B$ a motorului pentru nivelul de putere.
7	$C$	Semnalul de comandă a fazei $C$ a motorului pentru nivelul de putere.
8	$\overline{INH2}$	Active pe zero, acest semnal inhibează controlul pentru nivelul de comandă al fazelor $C$ și $D$ . Aceleași funcții ca $\overline{INH1}$ .
9	$D$	Semnalul de comandă a fazei $D$ a motorului pentru nivelul de putere.
10	$ENABLE$	Intrarea de validare a circuitului. Când este inactivă (valoare zero), semnalele $\overline{INH1}$ , $\overline{INH2}$ , $A$ , $B$ , $C$ și $D$ sunt zero.
11	$CONTROL$	Semnal de control care definește acțiunile comutatorului. Când are valoarea zero comutatorul acționează asupra semnalelor $\overline{INH1}$ , $\overline{INH2}$ , iar în caz contrar acționează asupra liniilor de fază $ABCD$ .
12	$V_S$	Alimentare la 5V.
13	$SENS_2$	Intrarea pentru detectarea tensiunii curentului de sarcină pentru nivelurile de tensiune ale fazelor $C$ și $D$ .
14	$SENS_1$	Intrarea pentru detectarea tensiunii curentului de sarcină pentru nivelurile de tensiune ale fazelor $A$ și $B$ .
15	$V_{ref}$	Tensiune de referință pentru circuitul de comutare. Nivelul de tensiune aplicat la acest pin va determina curentul de sarcină maxim.
16	OSC	O rețea $RC$ ( $R$ legat la $V_{CC}$ , $C$ la masă) conectată la această intrare determină rata de comutare. Într-o configurație multi-L297, pentru sincronizare se leagă toate aceste intrări (cu excepția uneia singură) la masă. $f = 1/0,69 RC$

17	$CW/\overline{CCW}$	Semnal de intrare care controlează direcția în sensul acelor de ceasornic / sens invers al acelor de ceasornic.  Direcția fizică de rotație a motorului este determinată și de modul de conectare a înfășurărilor.
18	$\overline{CLOCK}$	Semnalul de ceas pentru pas. Un puls de valoare zero la această intrare determină avansarea motorului cu un increment. Pasul se realizează pe nivelul crescător al acestui semnal.
19	$HALF/\overline{FULL}$	Intrare de selectare a pasului. Când are valoarea unu este selectată operarea în jumătate de pas, altfel este selectată operarea în pas întreg.  Modul de operare în pas întreg într-o fază este obținut prin selectarea lui <i>FULL</i> când translatorul lui L297 este într-o stare pară.  Modul de operare în pas întreg în două faze este obținut prin selectarea lui <i>FULL</i> când translatorul lui L297 este într-o stare impară.
20	$\overline{RESET}$	Intrare de reset. Un puls de valoare zero la această intrare aduce translatorul la poziția de start (starea 1, <i>ABCD</i> =0101).

Valori nominale maxime absolute [81]

Simbol	Descriere	Valoare	Unitate de măsură
$V_S$	Tensiune de alimentare	10	V
$V_i$	Semnale de intrare	7	V
$P_{tot}$	Puterea totală disipată ( $T_{amb} = 70^\circ C$ )	1	W
$T_{stg}, T_j$	Temperatura de păstrare și temperatura joncțiunii	-40 la +150	°C

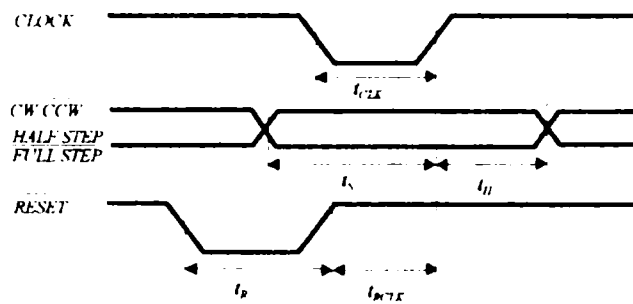
Caracteristici electrice ( $T_{amb} = 25^{\circ}C$ ,  $V_S = 5V$  dacă nu sunt specificate alte condiții) [81]:

Simbol	Descriere	Condiții de testare	Min.	Tip	Max	Unitate de măsură
$V_S$	Tensiune de alimentare (pin 12)		4,75		7	V
$I_S$	Curent de alimentare de liniște (pin 12)	Ieșiri variabile		50	80	mA
$V_i$	Tensiune de intrare (pin 11, 17, 18, 19, 20)	Nivel scăzut ( <i>Low</i> )			0,6	V
		Nivel ridicat ( <i>High</i> )	2		$V_S$	V
$I_i$	Curent de intrare (pin 11, 17, 18, 19, 20)	$V_i = L$			100	$\mu A$
		$V_i = H$			10	$\mu A$
$V_{en}$	Tensiune de intrare de validare (pin 10)	Nivel scăzut ( <i>Low</i> )			1,3	V
		Nivel ridicat ( <i>High</i> )	2		$V_S$	V
$I_{en}$	Curent de intrare de validare (pin 10)	$V_{en} = L$			100	$\mu A$
		$V_{en} = H$			10	$\mu A$
$V_o$	Tensiune de ieșire pe o fază (pin 4, 6, 7, 9)	$I_o = 10 mA$ $V_{OL}$			0,4	V
		$I_o = 5 mA$ $V_{OH}$	3,9			V
$V_{inh}$	Tensiune de ieșire de inhibare (pin 5, 8)	$I_o = 10 mA$ $V_{inhL}$			0,4	V

		$I_o = 5 \text{ mA}$ $V_{inhH}$	3,9			V
$V_{SYNC}$	Tensiune de ieșire de sincronizare	$I_o = 5 \text{ mA}$ $V_{SYNCH}$	3,3			V
		$I_o = 5 \text{ mA}$ $V_{SYNCHV}$			0,8	V
$I_{leak}$	Curent de scurgere (pin 3)	$V_{CE} = 7 \text{ V}$			1	$\mu\text{A}$
$V_{sat}$	Tensiune de saturare (pin 3)	$I = 5 \text{ mA}$			0,4	V
$V_{off}$	Deriva de tensiune a comparatoarelor (pin 13, 14, 15)	$V_{ref} = 1 \text{ V}$			5	mV
$I_o$	Deriva de curent a comparatoarelor (pin 13, 14, 15)		-100		10	$\mu\text{A}$
$V_{ref}$	Tensiune de intrare de referință (pin 15)		0		3	V
$t_{CLK}$	Timp de ceas		0,5			$\mu\text{s}$
$t_s$	Timp de ridicare ( <i>Set up time</i> )		1			$\mu\text{s}$
$t_H$	Timp de menținere ( <i>Hold time</i> )		4			$\mu\text{s}$
$t_R$	Timp de reset		1			$\mu\text{s}$

$t_{RCLK}$	Întârzierea dintre semnalul de reset și semnalul de ceas		1			$\mu s$
------------	--	--	---	--	--	---------

Diagrama de funcționare [81]:



## Anexa 3

### Algoritmul Bresenham și aplicațiile sale în comanda motoarelor pas cu pas

Aproximarea liniilor pentru mișcarea concomitentă pe două axe este făcută folosind algoritmul Bresenham. Acest algoritm este cel mai răspândit algoritm folosit pentru aproximarea liniilor într-un spațiu discret. Algoritmul este enunțat numai pentru jumătatea de sub diagonala principală din cadranul I al sistemului de coordonate carteziane (deplasare în sens crescător pe ambele axe, cu valoarea distanței parcurse pe axa X mai mare decât a distanței parcurse pe axa Y). Pentru celelalte cazuri se poate obține foarte ușor algoritmul.

Algoritmul Bresenham pentru trasarea punct cu punct a unei linii de la punctul  $(x_1, y_1)$  la punctul  $(x_2, y_2)$  cu  $x_1 < x_2$ ,  $y_1 < y_2$  și  $x_2 - x_1 \geq y_2 - y_1$  este:

$$DX = x_2 - x_1$$

$$DY = y_2 - y_1$$

$$X = x_1$$

$$Y = y_1$$

$$R = DX$$

Atât timp cât  $(X \leq x_2)$

Punct  $(X, Y)$  - acesta este următorul punct prin care se trasează

$$X = X + 1$$

$$R = R - 2 * DY$$

Dacă  $(R \leq 0)$

$$Y = Y + 1$$

$$R = R + 2 * DX$$

Algoritmul care trasează un segment de la punctul curent (de coordonate (0,0)) la punctul destinație (de coordonate (x,y)), folosind ecuația dreptei este:

```
functie linie (x,y)
  panta = y/x
  yp = 0
  for xc = 0 to x
    uc = panta * xc
    if (yc = yp)

      pas pe x
    else
      pas pe x si pe y
  yp = yc
```

Prin comparație, complexitatea computațională a algoritmului bazat pe ecuația dreptei este mai mare, deoarece implică înmulțiri și împărțiri al căror rezultat ar putea fi numere fracționare. Acest lucru implică aproximări de rotunjire, deoarece comanda echipamentului se face în pași care trebuie exprimați exclusiv prin numere întregi. Pe de altă parte, acest algoritm, pentru a fi mai ușor de urmărit, este prezentat într-o formă redusă la situația unui unghi aflat în primul semicadran al primului cadran al unui sistem ortogonal cu originea în punctul curent și cu axele paralele cu cele ale motoarelor de comandă. Luarea în considerație a cadranelor se impune pentru a atribui semnul corect numărului de pași care trebuie executați pe oricare dintre axe, acest semn fiind, de fapt, asociat sensului de rotație al motoarelor de acționare. La rândul lor, cadranele sunt împărțite în semicadrane pentru a se identifica axa cu numărul maxim de pași de efectuat. Această informație este necesară pentru a verifica complianța cu constrângerile de accelerație, viteză maximă și, respectiv, decelerație, impuse de tipul motorului, de masa totală deplasată, de tipul materialului, al sculei și al operației de prelucrare. În consecință, acest algoritm devine și mai complex prin prisma acestor verificări de efectuat.



Motoarele pas cu pas prezintă o anumită inerție proprie, iar mașina prezintă, de asemenea, o inerție semnificativă. Din această cauză motoarele trebuie comandate cu o pantă de accelerație sau de decelerație care să asigure o putere suficient de mare pentru a învinge inerția sistemului. Motoarele pas cu pas sunt comandate de o succesiune de două coduri primite la intrare. Între aceste două coduri trebuie să existe un interval de timp în care driverele motoarelor să „simtă” prezența codurilor. Mișcarea este implementată în jurul unor funcții de genul celei prezentate în continuare:

```
static void GeneralPiece(long int steps,int port,int port1,int
motor1,int directie1,int motor2,int directie2, int motor3, int
directie3,long int Xsteps,long int Ysteps,long Zsteps)
{
    long int a,b;
    unsigned short int a1,a2,a3,b1,b2,b3,c1,c2,c3;
    a1=coduri_pas[motor1][directie1];
    a2=coduri_front[motor1][directie1];
    a3=coduriver[motor1][directie1];
    b1=coduri_pas[motor2][directie2];
    b2=coduri_front[motor2][directie2];
    b3=coduriver[motor2][directie2];
    c1=coduri_pas[motor3][directie3];
    c2=coduri_front[motor3][directie3];
    c3=coduriver[motor3][directie3];
    x=0;
    for (a=0;a<steps;a++)
        {brese3D();
        x++;
```

```
trakX+=brese_x;
trakY+=brese_y;
trakZ+=brese_z;
outputbyte=0;
outputbyte1=0;
controlbyte=0;

if (brese_x)
    {outputbyte+=a1;
    outputbyte1+=a2;
    controlbyte+=a3;}
if (brese_y)
    {outputbyte+=b1;
    outputbyte1+=b2;
    controlbyte+=b3;}
b=verify1(port,controlbyte);
if (b==2)
    {tslow=0;
    maxim1=steps-a;
    timp=0;
    x=0;
    Optimize(CurentPoz+1,EndPoz);
    if ((Xsteps==0) && (Ysteps==0))
        {FeedLowSpeedProj=LowSpeedZ;
        FeedHighSpeedProj=HighSpeedZ;
        FeedAccelProj=AccelZ;}
    else
```

```

    { FeedLowSpeedProj=Max (Abs (Xsteps) , Abs (Ysteps) ) *FeedLowSpeed/sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps) ;
      FeedHighSpeedProj=Max (Abs (Xsteps) , Abs (Ysteps) ) *FeedHighSpeed/sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps) ;
      FeedAccelProj=Max (Abs (Xsteps) , Abs (Ysteps) ) *FeedAccel/sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps) ;

      FeedLowSpeedProj=Min_ (FeedLowSpeedProj*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps) /sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps) , LowSpeedZ*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps) /Abs (Zsteps) ) ;
      FeedHighSpeedProj=Min_ (FeedHighSpeedProj*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps) /sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps) , HighSpeedZ*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps) /Abs (Zsteps) ) ;
      FeedAccelProj=Min_ (FeedAccelProj*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps) /sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps) , AccelZ*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps) /Abs (Zsteps) ) ; }

    pas=1/FeedLowSpeedProj;
    maximvel=1/FeedHighSpeedProj;
    aux1=(longint) ((FeedHighSpeedProj*FeedHighSpeedProj-FeedLowSpeedProj*FeedLowSpeedProj) / (2*FeedAccelProj));
    aux2=aux1;
    b=verify1(port,controlbyte);
  }
  if (b==3)
  {

```

```
trakX=0;
trakY=0;
trakZ=0;
Optimize (CurentPoz+1, EndPoz);
if ((Xsteps==0) && (Ysteps==0))
    { FeedLowSpeedProj=LowSpeedZ;
      FeedHighSpeedProj=HighSpeedZ;
      FeedAccelProj=AccelZ; }
else
    { FeedLowSpeedProj=Max (Abs (Xsteps), Abs (Ysteps)) *FeedLowSpeed/sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps);
      FeedHighSpeedProj=Max (Abs (Xsteps), Abs (Ysteps)) *FeedHighSpeed/sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps);
      FeedAccelProj=Max (Abs (Xsteps), Abs (Ysteps)) *FeedAccel/sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps);
      FeedLowSpeedProj=Min_ (FeedLowSpeedProj*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps)/sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps), LowSpeedZ*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps)/Abs (Zsteps));
      FeedHighSpeedProj=Min_ (FeedHighSpeedProj*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps)/sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps), HighSpeedZ*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps)/Abs (Zsteps));
      FeedAccelProj=Min_ (FeedAccelProj*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps)/sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps), AccelZ*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps)/Abs (Zsteps)); }
/*FeedLowSpeedProj=maxim*FeedLowSpeed/sqrt (minim*minim+maxim*maxim);
```

```

FeedHighSpeedProj=maxim*FeedHighSpeed/sqrt
(minim*minim+maxim*maxim);

FeedAccelProj=maxim*FeedAccel/sqrt (minim*m
inim+maxim*maxim);*/

if      ((Abs (Xsteps)>=Abs (Ysteps))      &&
(Abs (Xsteps)>=Abs (Zsteps)))
    {bresemax=&brese_x;
    if (Abs (Ysteps)>Abs (Zsteps))
        {bresemin=&brese_z;
        bresemin=&brese_y;}
    else
        {bresemin=&brese_y;
        bresemin=&brese_z;}
    }
else
    if      ((Abs (Ysteps)>=Abs (Xsteps))      &&
(Abs (Ysteps)>=Abs (Zsteps)))
        {bresemax=&brese_y;
        if (Abs (Xsteps)>Abs (Zsteps))
            {bresemin=&brese_z;
            bresemin=&brese_x;}
        else
            {bresemin=&brese_x;
            bresemin=&brese_z;}
        }
    else
        if ((Abs (Zsteps)>=Abs (Ysteps)) &&
(Abs (Zsteps)>=Abs (Xsteps)))

```

```
        {bresemax=&brese_z;
        if (Abs(Ysteps)>Abs(Xsteps))
            {bresemin=&brese_x;
            breseminj=&brese_y;}
        else
            {bresemin=&brese_y;
            breseminj=&brese_x;}
        }

    if (Xsteps>=0)
        {v1=1;}
    else
        {v1=-1;}
        v2=0;
        v3=0;
    if (Ysteps>=0)
        {v4=1;}
    else
        {v4=-1;}
    if (Zsteps>=0)
        {v5=1;}
    else
        {v5=-1;}

    brese_merel=bml;
    brese_mere=bm;
    pas=1/FeedLowSpeedProj;
    maximvel=1/FeedHighSpeedProj;
```

```
aux1=(longint)((FeedHighSpeedProj*FeedHighSpeedProj-FeedLowSpeedProj*FeedLowSpeedProj)/(2*FeedAccelProj));
aux2=aux1;
tslow=0;
pas=1/FeedLowSpeedProj;
maxim1=steps-a;
timp=0;
x=0;
b=verifyl(port,controlbyte);
}
if (b==0)
    {status=1;
    break;}
if (brese_z)
    {b=verifyl(port1,c3);
    if (b==2)
        {tslow=0;
        pas=1/FeedLowSpeedProj;
        maxim1=steps-a;
        timp=0;
        x=0;
        b=verifyl(port1,controlbyte);
        }
    if (b==3)
        {
        trakX=0;
        trakY=0;
```

```
trakZ=0;
if ((Xsteps==0) && (Ysteps==0))
    { FeedLowSpeedProj=LowSpeedZ;
      FeedHighSpeedProj=HighSpeedZ;
      FeedAccelProj=AccelZ;}
else
    { FeedLowSpeedProj=Max (Abs (Xsteps) , Abs
      (Ysteps) ) *FeedLowSpeed/sqrt (Xsteps*Xs
      teps+Ysteps*Ysteps) ;
      FeedHighSpeedProj=Max (Abs (Xsteps) , Abs
      (Ysteps) ) *FeedHighSpeed/sqrt (Xsteps*X
      steps+Ysteps*Ysteps) ;
      FeedAccelProj=Max (Abs (Xsteps) , Abs (Yst
      eps) ) *FeedAccel/sqrt (Xsteps*Xsteps+Ys
      teps*Ysteps) ;
      FeedLowSpeedProj=Min_ (FeedLowSpeedPro
      j*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zs
      teps*Zsteps) /sqrt (Xsteps*Xsteps+Ystep
      s*Ysteps) , LowSpeedZ*sqrt (Xsteps*Xstep
      s+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps) /Abs (Zs
      teps) ) ;
      FeedHighSpeedProj=Min_ (FeedHighSpeedP
      roj*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+
      Zsteps*Zsteps) /sqrt (Xsteps*Xsteps+Yst
      eps*Ysteps) , HighSpeedZ*sqrt (Xsteps*Xs
      teps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Zsteps) /Abs
      (Zsteps) ) ;
      FeedAccelProj=Min_ (FeedAccelProj*sqrt
      (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Ysteps+Zsteps*Z
      steps) /sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*Yste
      ps) , AccelZ*sqrt (Xsteps*Xsteps+Ysteps*
      Ysteps+Zsteps*Zsteps) /Abs (Zsteps) ) ;}

if      ((Abs (Xsteps) >=Abs (Ysteps) )      &&
      (Abs (Xsteps) >=Abs (Zsteps) ) )
    {bresemax=&brese_x;
```



```

if (Abs(Ysteps)>Abs(Zsteps))
    {bresemin=&brese_z;
    bresemij=&brese_y;}
else
    {bresemin=&brese_y;
    bresemij=&brese_z;}
}
else
if ((Abs(Ysteps)>=Abs(Xsteps))    &&
(Abs(Ysteps)>=Abs(Zsteps)))
    {bresemax=&brese_y;
    if (Abs(Xsteps)>Abs(Zsteps))
        {bresemin=&brese_z;
        bresemij=&brese_x;}
    else
        {bresemin=&brese_x;
        bresemij=&brese_z;}
    }
else
if ((Abs(Zsteps)>=Abs(Ysteps)) &&
(Abs(Zsteps)>=Abs(Xsteps)))
    {bresemax=&brese_z;
    if (Abs(Ysteps)>Abs(Xsteps))
        {bresemin=&brese_x;
        bresemij=&brese_y;}
    else
        {bresemin=&brese_y;
        bresemij=&brese_x;}
    }

```

```

    }
    if (Xsteps>=0)
        {v1=1;}
    else
        {v1=-1;}
        v2=0;
        v3=0;
    if (Ysteps>=0)
        {v4=1;}
    else
        {v4=-1;}
    if (Zsteps>=0)
        {v5=1;}
    else
        {v5=-1;}
    brese_merel=bml;
    brese_mere=bm;
    pas=1/FeedLowSpeedProj;
    maximvel=1/FeedHighSpeedProj;
    aux1=(longint) ((FeedHighSpeedProj*FeedHigh
    SpeedProj-FeedLowSpeedProj*FeedLowSpeedProj)
    / (2*FeedAccelProj));
    tslow=0;
    pas=1/FeedLowSpeedProj;
    maximl=steps-a;
    timp=0;
    x=0;
    b=verify1(port,controlbyte);
}

```

```

        if (b==0)
            {status=1;
             break;}
    }

    if ((brese_z) && (LPT1!=LPT2))
        {_outp(port1,c1+bytecurent);}
    if (LPT1==LPT2)
        {if (brese_z)
         {_outp(port,outputbyte+c1+bytecurent);}
         else
         {_outp(port,outputbyte+bytecurent);}
        }
    else
        {_outp(port,outputbyte+bytecurent);}
    delay(delay_front);
    if ((brese_z) && (LPT1!=LPT2))
        {_outp(port1,c2+bytecurent);}
    if (LPT1==LPT2)
        {if (brese_z)
         {_outp(port,outputbyte+c2+bytecurent);}
         else
         {_outp(port,outputbyte+bytecurent);}
        }
    else
        {_outp(port,outputbyte1+bytecurent);}
    delay(pas-delay_front);

```

```
timp+=pas;
if (x<(long int)aux1)
    /*acceleratie*/
    MaximSpeed=SpeedStartProj+AccelStartProj*timp;
    pas=1.0/MaximSpeed;
    if (pas<maximvel)
        {pas=maximvel;
        MaximSpeed=SpeedMaximProj;}
    }
else
    {if ((maxim1-x)<aux2)
        {if (tslow==0)
            {tslow=timp;}
        pas=1.0/(MaximSpeed-AccelEndProj*(timp-
        tslow));
        }
    else
        {}
    }
}
```

Funcția primește ca parametri motoarele, direcțiile și numărul de pași care trebuie executați pe direcția „lungă“ din algoritmul Bresenham. Algoritmul menționat este implementat într-o funcție separată și se apelează fără parametri în `GeneralPiece`, informațiile necesare rulării algoritmului fiind presetate în variabile globale. Funcția prezentată este responsabilă, de asemenea, de calculul întârzierilor dintre pașii mașinii. Funcția trebuie să prevadă inclusiv posibilitatea punerii în pauză a mișcării și reluarea proiectului.

## Anexa 4

### **A.4.1 ISO 5835/1991–01.15 Implante pentru chirurgie — Șuruburi metal os cu cap hexagonal, cu circumferința capului sferică, îngropată, dimensiuni asimetrice pentru filet.**

#### *A.4.1.1 Domeniu*

Acest Standard Internațional specifică dimensiuni și toleranțe pentru șuruburi metal os folosite în chirurgie, care au cap hexagonal, cu circumferința capului sferică, îngropată, dimensiuni asimetrice pentru filet.

Observații:

- a) Necesitățile mecanice pentru șuruburi care sunt citate în acest Standard Internațional sunt specificate de standardul ISO 6475;
- b) Relaționările Standardelor Internaționale care se referă la șuruburi pentru oase, plăci pentru oase și unelte necesare sunt prezentate în Anexa 4.2.

#### *A.4.1.2 Referințe normative*

Standardele care urmează conțin prevederi care, prin referințele din acest text, se constituie prevederi ale acestui Standard Internațional. La momentul publicării, edițiile indicate erau în vigoare. Toate standardele suportă revizuire. Membri ai IEC și ISO dețin registre ale Standardelor Internaționale valide în momentul de față.

- ISO 6018: 1987 Implante ortopedice — Cerințe generale pentru mutare, împachetare și etichetare;
- ISO 6475: 1989 Implante pentru chirurgie — Șuruburi metal os filet asimetric și cap sferoidal, îngropat. Cerințe mecanice și metode de testare.

#### A.4.1.3 Coduri pentru filetul șurubului

Pentru identificarea tipului de filet al șurubului, trebuie folosite următoarele coduri, conform cu acest Standard Internațional:

Filet de mică adâncime (pentru șuruburi corticale): codul HA;

Filet adânc (pentru șuruburi spongioase): codul HB.

#### A.4.1.4 Dimensiuni și toleranțe

Toate dimensiunile și toleranțele sunt date în milimetri.

#### A.4.1.5 Șurub cu filet de mică adâncime (HA)

Șuruburile HA trebuie să fie conforme cu figurile A.4.1 și A.4.2 și cu Tabelele A.4.1 și A.4.2.

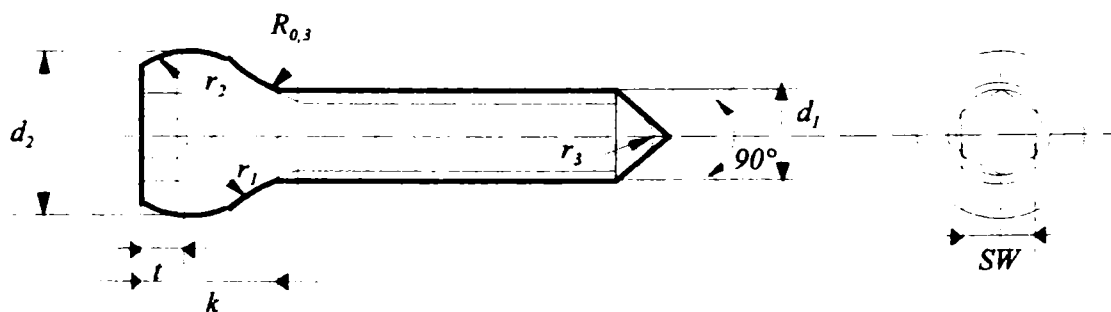


Fig. A4.1 Șurub cu filet de mică adâncime (HA)

Unghiul marcat pe figură poate fi de 60° pentru șuruburi autofiletante.

Tabelul A.4.1. Dimensiuni pentru seria de șuruburi HA

Codul și diametrul filetului	Diame- trul nominal $d_1$	$d_2$		$k$ =	$r_1$ +0,25 0	$r_2$ =	$r_3$ =	$SW$ F10 <sup>1)</sup>	$t$ min
			Tole- ranță						
HA 1,5	1,5	3	0	1,6	1,5		0,3	1,5	0,8
HA 2,0	2	4	-0,10	1,9	2	2	0,4	1,5	1,0
HA 2,7	2,7	5	0 -0,15	2,3	2,5	2,5	0,4	2,5	1,2
HA 3,5	3,5	6		2,6	3	2,5	1	2,5	1,5
HA 4	4	6		2,4	3	2,5	1	2,5	1,5
HA 4,5	4,5	8		4,6	4	2,5	1	3,5	2,8
HA 5	5	8		4,6	4	2,5	1	3,5	2,8

$${}^1) F10 = \begin{cases} +0,047 \\ +0,07 \end{cases} \text{ pentru } SW \leq 3 \text{ mm}$$

$$F10 = \begin{cases} +0,058 \\ +0,010 \end{cases} \text{ pentru } SW > 3 \text{ mm}$$

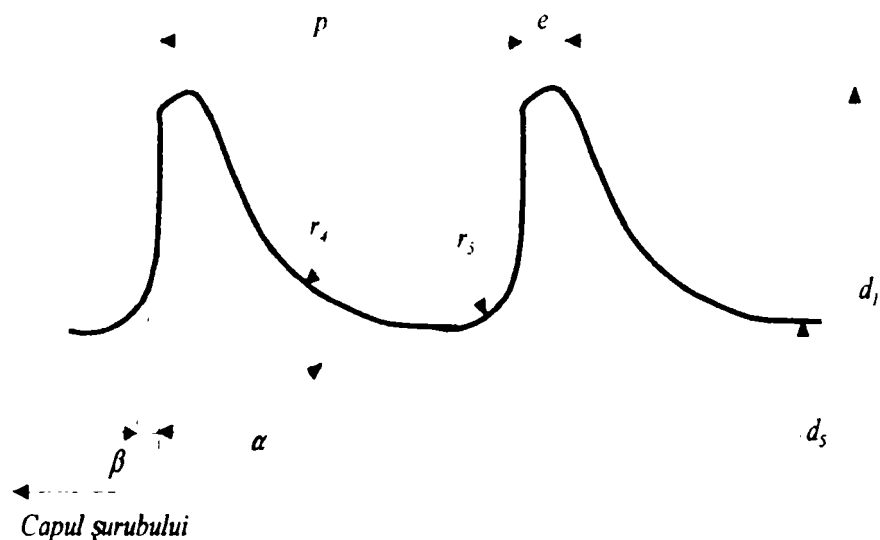


Fig. A.4.2 Filet puțin adânc HA

Tabelul A.4.2. Dimensiuni ale filetelor HA

Codul și diametrul filetelor	$d_1$ 0 -0,5	$d_5$		$e$ ≈	$p$	$r_4$ ≈	$r_5$ ≈	$\alpha$ ≈	$\beta$
			Toleranță						
HA 1,5	1,5	1,1	0	0,1	0,5	0,3	0,1	35°	3°
HA 2,0	2	1,3	-0,10	0,1	0,6	0,4	0,1	35°	3°
HA 2,7	2,7	1,9	0 -0,15	0,1	1	0,6	0,2	35°	3°
HA 3,5	3,5	2,4		0,1	1,25	0,8	0,2	35°	3°
HA 4	4	2,9		0,1	1,5 <sup>1)2)</sup>	0,8	0,2	35°	3°
HA 4,5	4,5	3		0,1	1,75	1	0,3	35°	3°
HA 5	5	3,5		0,1	1,75	1	0,3	35°	3°

1) Variații ale profilului filetelor:



Totalitatea valorilor pentru parametrii  $d_1$ ,  $d_5$ ,  $e$ ,  $r_4$ ,  $r_5$ ,  $\alpha$  și  $\beta$  permit definirea profilului maximal teoretic al filetului. Este recomandat ca variația maximă față de profilul teoretic în orice punct al formei filetului să nu depășească:

- 0,050 mm pentru HA 1,3 și HA 2;
- 0,075 mm pentru HA 2,7 până la HA 5.

În cazul unei revizuii, aceste valori vor trebui reconsiderate.

<sup>2)</sup> Se atrage atenția asupra pasului (*pitch*) șurubului HA 4, care este 1,5 mm, în comparație cu șurubul HB 4, a cărui valoare este de 1,75 mm (a se vedea Tabelul A.4.4).

#### A.4.1.6 Șurub cu filet adânc (HB)

Șuruburile HB trebuie să fie conforme cu figurile A.4.3 și A.4.4 și cu Tabelele A.4.3 și A.4.4.

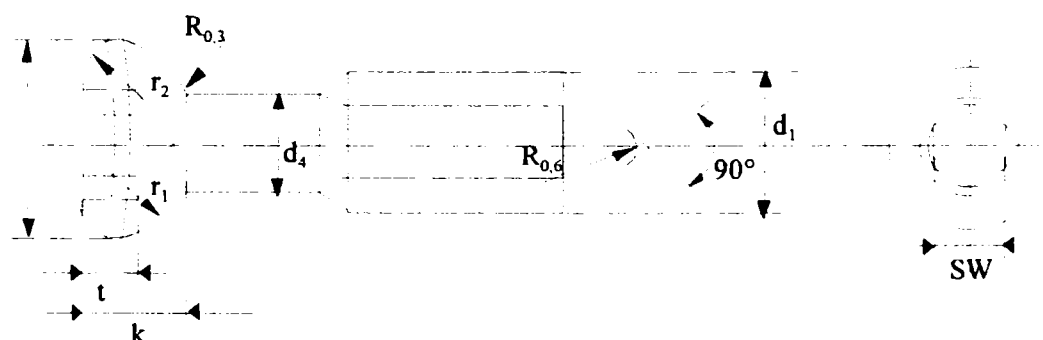


Fig. A.4.3 Șurub cu filet adânc (HB)

Tabelul A.4.3. Dimensiuni ale seriei de șuruburi HB

Codul și diametrul filetului	Diame- trul nominal $d_1$	$d_2$ 0 -0,15	$d_4$ 0 -0,15	$k$ ≈	$r_1$ +0,25 0	$r_2$ ≈	$SW$ F10 <sup>1)</sup>	$t$ min
HB 4	4	6	2,4	2,9	3	2,5	2,5	1,5
HB 6,5	6,3	8	4,5	4,6	4	2,5	3,5	2,8

$${}^1) F10 = \begin{cases} +0,047 \\ +0,007 \end{cases} \text{ pentru } SW \leq 3 \text{ mm}$$

$$F10 = \begin{cases} +0,058 \\ +0,010 \end{cases} \text{ pentru } SW > 3 \text{ mm}$$

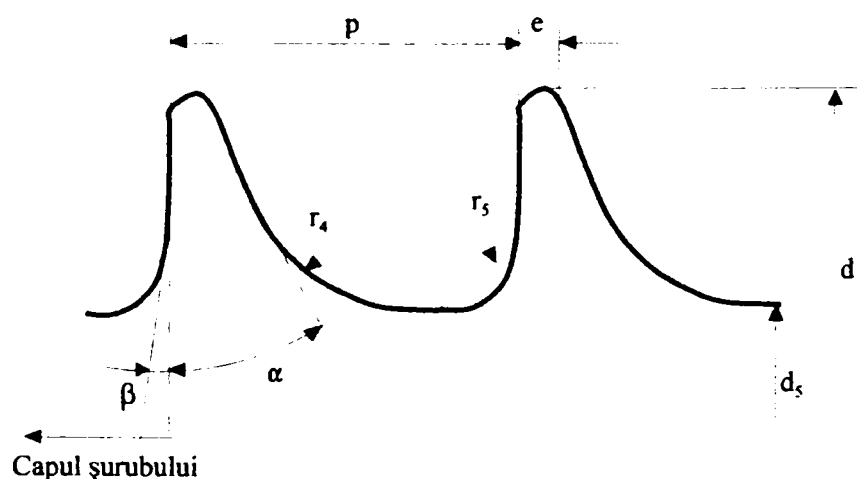


Fig. A.4.4 Filet adânc HB

Tabelul A.4.4. Dimensiuni ale filetului HB

Codul și diametrul filetului	$d_1$ 0 -0,15	$d_5$ 0 -0,15	$e$ ≈	$p$	$r_4$ +0,25 0	$r_5$ ≈	$\alpha$ ≈	$\beta$ ≈

HB 4	4	1,9	0,1	1,75 <sup>1) 2)</sup>	0,8	0,3	25°	5°
HB 6,5	6,5	3	0,2	2,75	1,2	0,8	25°	5°

<sup>1)</sup> Variații ale profilului filetului:

Totalitatea valorilor pentru parametrii  $d_1$ ,  $d_5$ ,  $e$ ,  $r_4$ ,  $r_5$ ,  $\alpha$  și  $\beta$  permit definirea profilului maximal teoretic al filetului. Este recomandat ca variația maximă față de profilul teoretic în orice punct al formei filetului să nu depășească:

— 0,075 mm pentru HB.

În cazul unei revizuirii, aceste valori vor trebui reconsiderate.

<sup>2)</sup> A se vedea nota <sup>2)</sup> a Tabelului 2.

#### A.4.1.7 Marcarea și împachetarea

Marcarea și împachetarea trebuie să fie în concordanță cu standardul ISO 6018.

### A4.2 ISO 5836: 1988, Implante pentru osteosinteză

Capitolul 23 Plăci pentru sinteză osoasă

Subcapitolul 23.3 Specificații pentru găuri corespunzătoare șuruburilor cu filet asimetric și cu partea îngropată (subsuprafața) a capului sferică.

Implante pentru chirurgie — Plăci metal os. Găuri corespunzătoare șuruburilor cu filet asimetric și cu partea îngropată a capului sferică.

#### *A.4.2.1 Utilitate și domeniul de aplicare*

Acest Standard Internațional specifică dimensiunile și toleranțele găurilor din plăcile pentru sinteză osoasă folosite ca implante chirurgicale, astfel încât să fie facilitată fixarea corectă folosind șuruburi conforme cu standardul ISO 5835.

Observații:

- a) Acest Standard Internațional nu se referă la formele și dimensiunile plăcilor sau la spațierea (distanțele centru-la-centru) dintre găuri.
- b) Relaționările dintre Standardele Internaționale care se referă la șuruburile pentru oase, plăcile pentru sinteză osoasă și la uneltele necesare sunt prezentate în anexa B.

#### *A.4.2.2 Referințe*

ISO 5835, Implante pentru chirurgie — Șuruburi metal os cu cap hexagonal și cu partea îngropată (subsuprafața) a capului sferică. Dimensiuni.

#### *A.4.2.3 Dimensiuni și toleranțe*

##### *A.4.2.3.1 Tipul A (cu găuri cilindrice)*

Găurile de tipul A trebuie să fie în conformitate cu figura A.4.5 și cu Tabelul A.4.5.

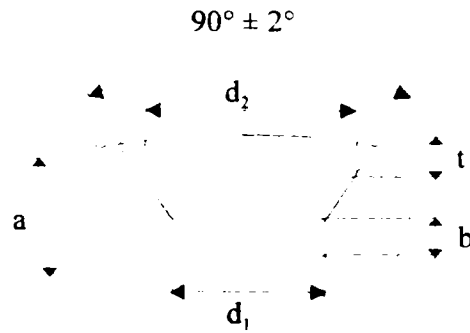


Fig. A.4.5 Gaură de tipul A

Tabelul A.4.5. Dimensiuni ale găurilor de tip A

$d_1$ +0,2 0	$d_2$ +0,2 0	$b$ min	Partea cilindrică a frezei conice (dependent de $a$ )		Șuruburi în conformitate cu ISO 5835
			$t$ 0 -0,2	$a_{ref}$	
1,6	3,1	0,15	0,4	1,3	HA 1,5
1,9	3,2	0,25			
2,1	4,1	0,1	0,4	1,5	HA 2
2,6	4,3	0,25			
2,9	5,2	0,15	0,6	1,9	HA 2,7
3,4	5,4	0,3			
3,7	6,2	0,25	0,9	2,4	HA 3,5

4,2	6,4	0,4			HA 3,5; HA 4; HB 4
4,7	8,2	0,35	1,4	3,5	HA 4,5
5,5		0,75			
5,2	8,2	0,6	1,4	3,5	HA 5
6		1			
6,6		1,3			

**Observație:**

Valorile  $b$  și  $t$  din Tabelul A.4.5 sunt valabile pentru plăci a căror grosime este  $a_{ref}$ . Dacă grosimea plăcii este mai mare decât  $a_{ref}$ , atunci valoarea lui  $t$  nu trebuie să depășească valoarea prezentată în Tabelul A.4.5 pentru ca placa să nu cedeze. Valoarea lui  $b$  va trebui crescută. Dacă grosimea plăcii este mai mică decât  $a_{ref}$ , atunci valoarea lui  $b$  nu trebuie să fie mai mică decât valoarea prezentată în Tabelul A.4.5 pentru a preveni perforarea plăcii de către capul șurubului. Valoarea lui  $t$  va trebui redusă.

În continuare, este prezentată varianta formală a expunerii anterioare:

dacă  $a \geq a_{ref}$  atunci  $t = t_1$

dacă  $a < a_{ref}$  atunci  $t = t_1 - (a_{ref} - a)$

dacă  $a \leq a_{ref}$  atunci  $b = b_1$

dacă  $a > a_{ref}$  atunci  $b = b_1 + (a - a_{ref})$

unde  $a_{ref}$ ,  $t_1$  și  $b_1$  sunt valorile pentru  $a_{ref}$ ,  $b$  și  $t$  prezentate în Tabelul A.4.5.

#### A.4.2.3.2 Tipul B (cu gaură conică)

Găurile de tipul B trebuie să fie conforme cu schema din figura A.4.6.

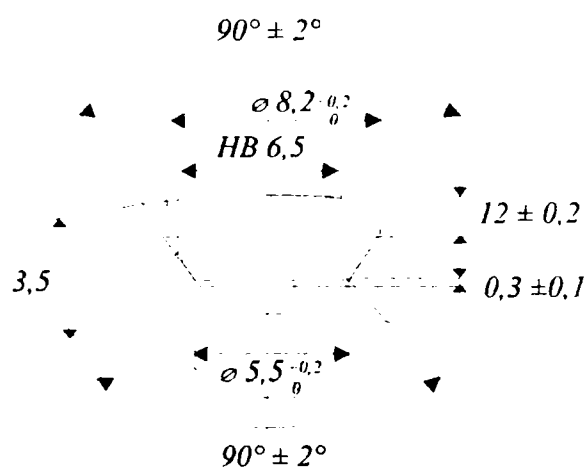


Fig. A.4.6. Gaură de tip B pentru șuruburi HB 6,5 specificate în standardul ISO 5835

Notă: dimensiunile din figura de mai sus sunt în milimetri.

#### A.4.2.3.3 Tipul C (cu filet)

Găurile de tipul C trebuie să respecte desenul din figura A.4.7 și specificațiile din Tabelul A.4.6.

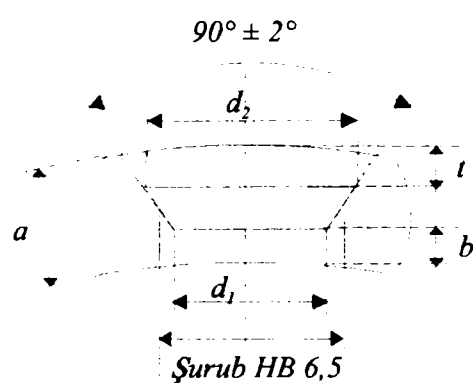


Fig. A.4.7 Găuri de tip C pentru șuruburi HB 6,5 specificate în standardul ISO 5835

Tabelul A.4.6. Dimensiuni ale găurilor de tip C

$d_1$	$d_2$	$b$ min	Partea cilindrică a frezei conice (dependent de $a$ )	
			$t$ 0 -0,2	$a_{ref}$
4,7	8,2	0,35	1,4	3,5
5,5		0,75		

#### A.4.2.3.4 Tipul D (cu freză sferică)

Găurile de tipul  $D_1$ ,  $D_2$  și  $D_3$  trebuie să fie conforme cu reprezentările din figura A.4.8, figura A.4.9, figura A.4.10 și Tabelul A.4.7.

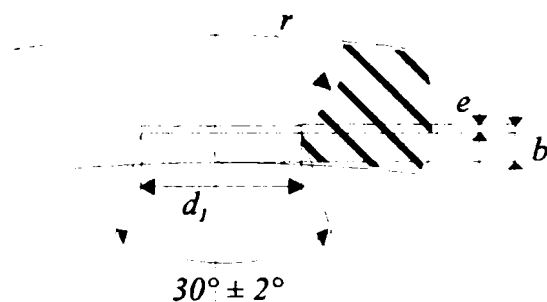


Fig. A.4.8 Găuri de tipul  $D_1$



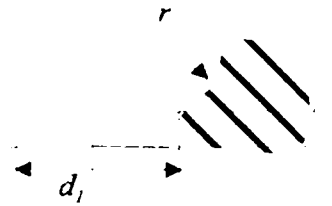


Fig. A.4.9. Găuri de tipul  $D_2$

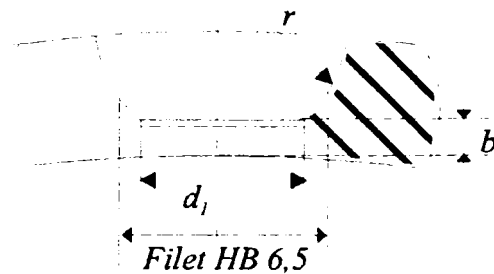


Fig. A.4.10 Găuri de tipul  $D_3$

Tabelul A.4.7 Dimensiuni ale tipurilor de găuri  $D_1$ ,  $D_2$  și  $D_3$

$d_1$	$r$	$e$	$b$	Șuruburi în conformitate cu ISO 5835
+0,2 0	+0,075 +0,050	+0,15 0	min	
1,6	1,5	0,1	0,2	HA 1,5
1,9				
2,1	2	0,2	0,4	HA 2
2,6				

2,9	2,5	0,2	0,4	HA 2,7
3,4				
3,7	3	0,2	0,4	HA 3,5
4,2				HA 3,5; HA 4; HB 4
4,7 <sup>1)</sup>	4	0,4	0,5	HA 4,5; HB 6,5
5,5 <sup>1)</sup>				
5,2 <sup>1)</sup>	4	0,4	0,5	HA 4,5; HA 5; HB 6,5
6 <sup>1)</sup>				
6,6 <sup>2)</sup>		0,4	0,5	HB 6,5

<sup>1)</sup> Diametrul  $d_1$  poate fi filetat pentru a putea folosi șuruburi de tipul HB 6,5

<sup>2)</sup> Se recomandă folosirea acestei valori doar în cazuri excepționale.

Anexa 4.A

Exemplu de șurub combinat

Acest șurub este o combinație între filetul puțin adânc HA 4,5 așa cum este prezentat în figura A.4.2 și Tabelul A.4.2 ale acestui Standard Internațional și capul șurubului în formă de cruce, conform cu figura A.4.7 și Tabelul A.4.6 din ISO 9268: 1988 (pentru informare, ilustrarea și dimensiunile capului șurubului sunt prezentate în figurile A.1 și A.2, respectiv Tabelele A.1 și A.2.

Dimensiunile capului și filetului, care sunt critice din punct de vedere al interfeței cu șurubelnița, burghiul etc., sunt specificate în standardul ISO 9268, respectiv acest Standard Internațional, iar cerințele mecanice sunt specificate în standardul ISO 6475.

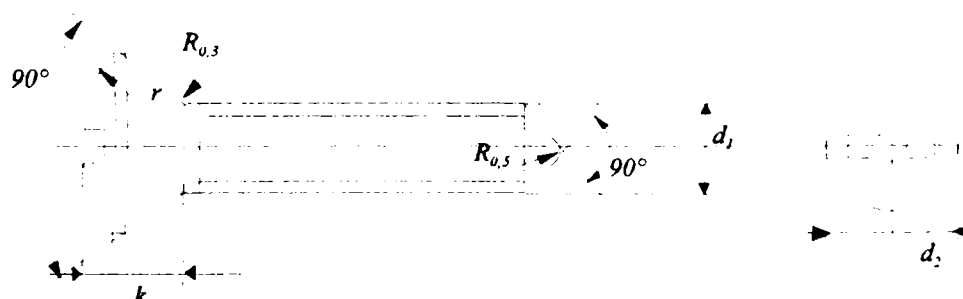


Fig. A.1 Șurub combinat

Tabelul A.1 Dimensiuni ale șurubului combinat

Diame- trul nominal $d_1$	$d_2$	$k$	$r$
	0 -0,15	max	
4,5	8,0	3,8	5,5

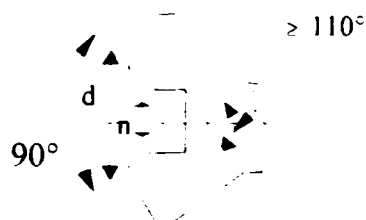


Figura A.2 Cap în formă de cruce

Tabelul A.2. Dimensiuni ale capului în formă de cruce





$d$	$b$ max	$n$
5,0	3,8	1,4

## Anexa 4.B

Relaționările Standardelor Internaționale care se referă la șuruburi pentru oase, plăci pentru oase și unelte necesare

S-a hotărât ca Standardele Internaționale care se referă la șuruburi pentru oase, plăci pentru oase și unelte necesare să fie împărțite în două serii paralele. Motivul acestei divizări este constituit de diferențele esențiale de proiectare ale filetelor șuruburilor (tipurile de șuruburi HA și HB în opoziție cu tipurile HC și HD). Figura B.1 prezintă, schematic, relaționările celor două serii de Standarde Internaționale.

Anexa 4

Șuruburi	Filet		
	Partea îngropată a capului	HA HB	HC HD 80° 90°
	Cap (conexiune)	Sferică 	Conică  Fantă singulară    Fantă încrucișată    Cap cu lăcaș în cruce
		Conexiuni combinate   Fantă singulară și cap cu lăcaș în cruce    Fantă încrucișată și cap cu lăcaș în cruce	
	Cerințe mecanice	ISO 6475 Cuplu de rupere / unghi de rotație.	În pregătire
Piulițe	Găuri și caneluri	ISO 5836	ISO 9269

	Cerințe mecanice	ISO 9585	ISO 9585
Unelte de asamblare	Chei și șurubelnițe	ISO 8319-1  Chei hexagonale	ISO 8319-2  Șurubelnițe
	Burghie, freze, freze conice	ISO 9714-1	În pregătire

#### Anexa 4.C

Bibliografie: Standardele Internaționale la care se fac referiri în tabelul din Anexa 4.B

- [A4.1] ISO 5835: 1990, Implante pentru chirurgie — Șuruburi metal os cu cap hexagonal, cu circumferința capului sferică, îngropată, dimensiuni asimetrice pentru filet.
- [A4.2] ISO 5836: 1988, Implante pentru chirurgie — Piulițe metal os — Găuri corespunzătoare șuruburilor cu filet asimetric și cu partea îngropată a capului sferică.
- [A4.3] ISO 6475: 1989, Implante pentru chirurgie — Șuruburi metal os cu filet asimetric și cu partea îngropată a capului sferică. Cerințe mecanice și metode de testare.
- [A4.4] ISO 8319-1: 1986, Instrumente ortopedice — Capete de șuruburi (forma conexiunii). Partea 1: Chei folosite pentru șuruburi al căror cap are lăcaș hexagonal.

- [A4.5] ISO 8319-2: 1986, Instrumente ortopedice — Capete de șuruburi (forma conexiunii). Partea 2: Chei folosite pentru șuruburi al căror cap are lăcaș hexagonal. Șurubelnițe pentru șuruburi care au capul prevăzut cu fantă singulară, cu fantă încrucișată și cu lăcaș în formă de cruce.
- [A4.6] ISO 9268: 1988, Implante pentru chirurgie — Șuruburi metal os cu partea îngropată a capului conică. Dimensiuni.
- [A4.7] ISO 9269: 1988, Implante pentru chirurgie — Șaibe metal os. Găuri și caneluri corespunzătoare șuruburilor cu partea îngropată a capului conică.
- [A4.8] ISO 9585: 1990, Implante pentru chirurgie — Determinarea rezistenței la încovoiere și a durității plăcilor pentru os.
- [A4.9] ISO 9714-1: 1990, Instrumente ortopedice pentru perforare. Partea 1: Burghie, freze, freze conice.





## Anexa 5

### A.5.1. Funcționarea motoarelor pas cu pas

Motoarele pas cu pas sunt alcătuite dintr-un ax (magnet permanent) care se rotește, numit rotor, și electromagneți poziționați în zona staționară care înconjoară motorul, numită stator. Figura A.5.1 [211] prezintă o rotație completă a unui motor pas cu pas. În poziția 1, rotorul este orientat către electromagnetul de sus, activ în acel moment (i s-a aplicat o tensiune). Pentru a mișca rotorul în sensul acelor de ceasornic, electromagnetul de sus este dezactivat, urmat de activarea electromagnetului din dreapta. Acest proces are ca urmare mișcarea rotorului cu 90 de grade, care se va alinia cu magnetul activ. În aceeași manieră, procesul se repetă pentru electromagneții de jos și din stânga până se atinge poziția de start [246].

În realitate, rezoluția folosită în exemplul anterior nu este practică. Rezoluția motoarelor pas cu pas (numărul de grade la o rotație per pas) este mult mai mare. Spre exemplu, un motor cu o rezoluție de 5 grade își va muta rotorul cu 5 grade pe pas, astfel necesitând 72 de pași pentru o rotație completă de 360 de grade.

La anumite motoare, această rezoluție poate fi dublată prin procesul numit înjumătățirea pasului (*half-stepping*). În acest caz, rotorul nu se va mai alinia cu câte un electromagnet la fiecare mișcare, deoarece, la un moment dat, doi electromagneți vor fi activi, determinând între ei o atracție egală, dublând, astfel, rezoluția. Figura A.5.2 [211] este exemplificatoare pentru această situație. În prima poziție, doar electromagnetul de sus este activ și, ca urmare, rotorul este aliniat cu acesta. În poziția 2, atât electromagnetul de sus, cât și cel din dreapta, sunt activi, determinând rotorul să se poziționeze între cei doi poli activi. În poziția 3, electromagnetul de sus este dezactivat, iar rotorul este atras doar de către cel din dreapta. Prin repetarea procesului descris mai sus se obține o rotație completă de 360 de grade [251].



Fig. A.5.1 Rotația completă a unui motor pas cu pas

În Tabelul A.5.1 [212] este descris modul în care se activează cei patru electromagneți.

Tabelul A.5.1 Modul de activare a celor patru magneți

Pas	EM1	EM2	EM3	EM4
1	+	-	-	-
2	+	+	-	-
3	-	+	-	-
4	-	+	+	-
5	-	-	+	-
6	-	-	+	+
7	-	-	-	+
8	+	-	-	+



Fig. A.5.2 Procedul *half stepping*

Există mai multe tipuri de motoare pas cu pas. Cele cu patru fire conțin doi electromagneți, dar folosirea lor este mult mai complicată decât a motoarelor cu trei sau patru electromagneți deoarece circuitul de comandă trebuie să fie capabil să inverseze sensul curentului după fiecare pas [74], [246].

Pentru a crește rezoluția, motoarele pas cu pas reale folosesc o serie de minpoli pe stator și pe rotor. Deși, la o primă privire, s-ar putea spune că procesul de comandă a unui astfel de motor este foarte complicat, operarea este identică celei prezentate în figura A.5.1. Figura A.5.3 [211] prezintă un exemplu de funcționare a unui motor multipol. În poziția 1, polul N (nord) al rotorului este aliniat cu polul S (sud) al statorului. Se poate observa că mai multe poziții sunt aliniate în același timp. În poziția 2, electromagnetul de sus este dezactivat și este activat următorul din partea dreaptă, determinând rotorul să se miște cu un număr bine definit de grade. În exemplul prezentat, după opt pași procesul se va relua [248].

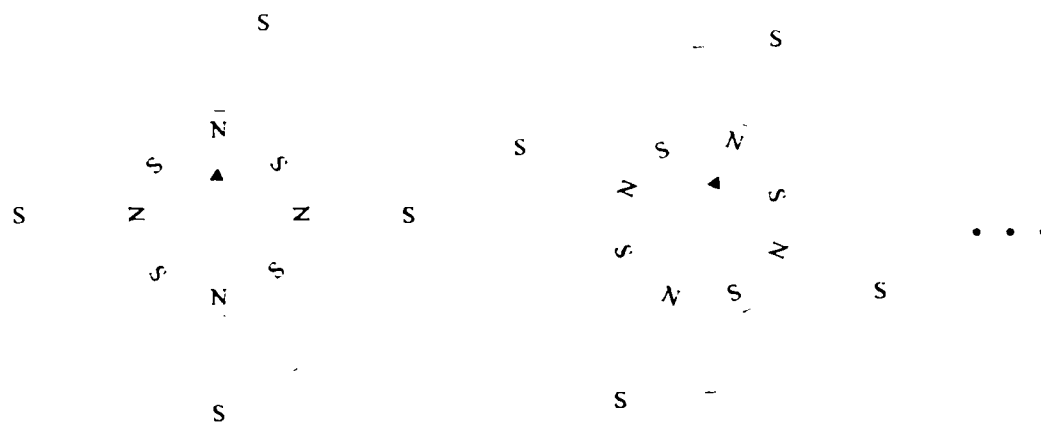


Fig. A.5.3 Funcționarea unui motor multipol

În figura A.5.4 [211] este prezentat echivalentul electric al unui motor pas cu pas în patru timpi, cu șase fire pentru comandă. Se poate observa că la fiecare jumătate a bobinelor merg câte trei fire și că înfășurările sunt conectate în perechi.

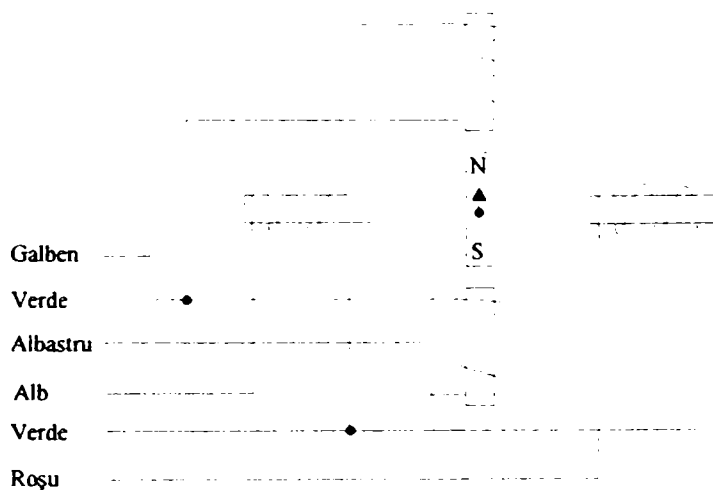


Fig. A.5.4 Echivalent electric al unui motor pas cu pas în patru timpi, cu șase fire pentru comandă

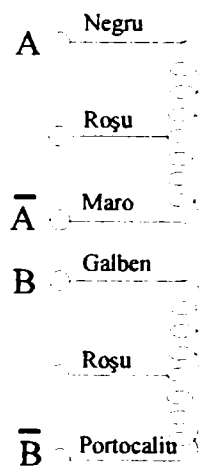
### A.5.2. Conductori electrici

În cele ce urmează vor fi prezentate câteva caracteristici ale conductorilor standard, și anume: culoarea conductorului, grosimea, direcția de rotire a motorului pas cu pas, precum și alte aspecte.

#### A.5.2.1 Culori standard și direcții de rotire (excitație în două faze) [213]

A) Tipul standard 1 (Direcția de rotire, în sensul acelor de ceasornic sau invers, este considerată față de rotor)

— Modul unipolar



Roșu	+	+	+	+
Roșu	+	+	+	+
Negru	-	-		
Maro			-	-
Galben	-			-
Portocaliu		-	-	

— Modul bipolar

A Negru  
 $\bar{A}$  Maro  
 B Galben  
 $\bar{B}$  Portocaliu

Negru	-	-	+	+
Maro	+	+	-	-
Galben	-	+	+	-
Portocaliu	+	-	-	+

B) Tipul standard 2 (Direcția de rotire în sensul acelor de ceasornic sau în sens invers al acelor de ceasornic este considerată față de rotor)

— Modul unipolar

A Albastru  
 Verde  
 $\bar{A}$  Galben  
 B Roșu  
 Verde  
 $\bar{B}$  Alb

Verde	+	+	+	+
Verde	+	+	+	+
Albastru	-	-		
Galben			-	-
Roșu	-			-
Alb		-	-	

— Modul bipolar

A					
$\bar{A}$ Galben	Albastru	-	-	+	+
B Roșu	Galben	+	+	-	-
$\bar{B}$ Alb	Roșu	-	+	+	-
	Alb	+	-	-	+

A.5.2.2 Conductori standard [213]

Tabelul A.5.2 Exemplu de constructori standard

Tipul	Conductori standard de tip UL							
	Numărul modelului						Diametrul conductorului	
	UL 1007	UL 1061	UL 1685	UL 3265	UL 1430	UL 1571	echivalent AWG 28	echivalent AWG 26
SMJ20		○	○			●	●	
SMP20		○	○			●	●	
SMR30		○	○			●	●	
SMB35	●	○	○	○	○	○	●	
SMB40	●			○	○	○	●	○
SMJ40	●			○	○	○	●	○

SMP42	○			○	○	○	●	○
SMJ35	●			○	○	○	●	
SMH42	○			○		●	●	○

Simbolurile din Tabelul A.5.2 au următoarea semnificație:

● — standard;

○ — semistandard.

### A.5.2.3 Standarde pentru conductori electrici de tipul UL [213]

Tabelul A.5.3 Standarde pentru conductori electrici de tipul UL

Numărului modelului	Valori nominale		Încapsulare		Observații
	Temperatură	Tensiune	Materiale	Grosimi minime (mm)	
UL1571	80°C	30V	PVC, PVC răsucit	0,05~2,54	
UL1061	80°C	300V	PVC semidur	0,229	CSA AWN
UL1685	105C	30V	PVC răsucit	0,05~2,54	
UL1007	80°C	300V	PVC termorezistent	0,381	CSA TR 64 (90°C)
UL1430	105°C	300V	PVC răsucit	0,4	CSA REW
UL3265	125°C	150V	PE răsucit	0,254	CSA AWN

### A.5.3 Terminologie caracteristică motoarelor pas cu pas

Acest paragraf descrie termenii specifici motoarelor pas cu pas, împreună cu semnificația lor [214].



- cuplul de menținere (*holding torque*): cuplul maxim generat pentru a se opune unui cuplu extern, care este aplicat axului când motorul este în stare staționară de excitație;
- cuplul de detentă (*detent torque*): cuplul maxim generat pentru a se opune unui cuplu extern, aplicat axului, cu motorul în stare staționară, neexcitat;
- caracteristica  $\theta - T$  (rigiditatea): relația dintre unghiul de deviație și cuplu când este aplicat un cuplu extern rotorului, iar motorul se află în stare staționară de excitație.

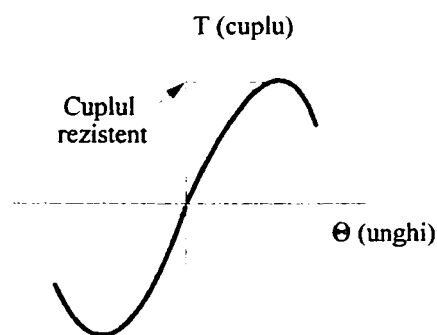


Fig. A.5.5 Rigiditatea

- caracteristicile dinamice (cuplu-frecvență): relațiile dintre frecvența de comandă și cuplu, reprezentate de curbele  $A$  și  $B$  din graficul de mai jos:

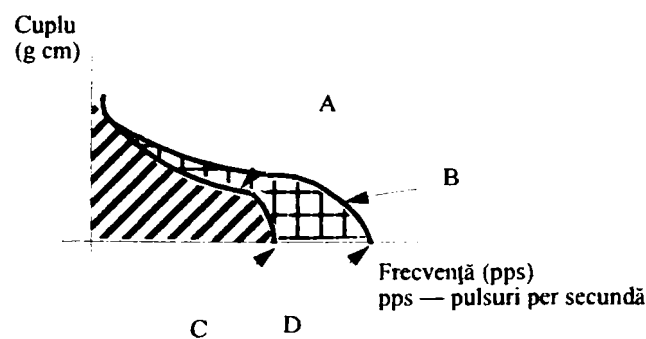


Fig. A.5.6 Caracteristicile dinamice

- caracteristica de anclanșare (de start) (*pull-in characteristics*): relația dintre frecvența de intrare și cuplul maxim (de anclanșare) necesar pentru a porni motorul la acest nivel al frecvenței de intrare (curba *A* din figura A.5.6);
- caracteristica de tracțiune (de rotație) (*pull-out characteristics*): relația dintre frecvența de intrare și cuplul maxim, care poate fi obținut prin sincronizarea rotirii motorului cu această frecvență de intrare, care a fost mărită gradual după pornirea motorului (curba *B* din figura A.5.6);
- domeniul de anclanșare (*pull-in range*): motoarele pas cu pas pot fi utilizate fără probleme atâta timp cât caracteristicile de operare se află în acest domeniu (suprafața din graficul prezentat în figura A.5.6 hașurată cu linii înclinate);
- domeniul de tracțiune (*pull-out range*): în cazul în care caracteristicile de operare se află în acest domeniu, viteza motorului trebuie ajustată în mod corespunzător (suprafața din graficul prezentat în figura A.5.6 hașurată cu pătrățele);
- panta de accelerare (*maximum starting rate*): frecvența cea mai ridicată la care motorul fără sarcină poate fi pornit și oprit, sincronizat cu semnalele de intrare (indicată de punctul *C* de pe graficul din figura A.5.6);
- rata maximă de rotație (*maximum slewing rate*): frecvența cea mai ridicată la care motorul fără sarcină poate fi rotit sincron, când frecvența de pornire este mărită gradual (indicată de punctul *D* de pe graficul din figura A.5.6);
- eroarea de poziționare a pasului (*step position error*): eroarea maximă, pozitivă sau negativă, determinată atunci când motorul s-a rotit cu un pas dintr-o poziție de cuplare în următoarea poziție și este exprimată în măsură unghiulară:

$$\text{Eroarea de poziționare a pasului} = [\text{Unghiul măsurat al pasului}] - [\text{Unghiul teoretic al pasului}]$$

- eroarea de poziționare (*position error*): motorul realizează  $N$  pași (unde  $N = 360^\circ / \text{unghiul pasului}$ ) din orice poziție inițială, iar unghiul față de poziția inițială este măsurat. Această procedură este repetată pentru orice poziție inițială. Dacă în poziția  $N$  unghiul măsurat este  $\theta_N$ , iar eroarea este  $\Delta \theta_N$ , atunci:

$$\Delta \theta_n = \theta_N - (\text{unghiul pasului}) \times N$$

Eroarea de poziție este diferențialul dintre  $\Delta \theta_N$  maxim și minim:

$$\text{Eroarea de poziție} = \frac{1}{2} |\Delta \theta(\text{max}) - \Delta \theta(\text{min})|$$

- eroare de poziție cu histerezis (*hysteresis position error*): valorile obținute pentru erorile de poziție de mai sus, când măsurătorile sunt făcute în ambele sensuri de rotație;
- momentul de inerție: inerția unei materii care se rotește în jurul unui ax se exprimă astfel:

$$J = \int \rho r^2 dv$$

unde:  $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] — densitatea;

$r$  [ $\text{m}$ ] — distanța de la ax;

$dv$  — factor cubic.

Inerția unui cilindru care se rotește în jurul propriei axe este:

$$J = \frac{\pi}{32} \rho l (D_1^2 - D_2^2)$$

unde:  $l$  [m] — înălțimea cilindrului;

$D_1$  [m] — diametrul exterior;

$D_2$  [m] — diametrul interior;

Deși motorul are inerție proprie, caracteristicile sale de anclanșare se schimbă dacă sarcina are o inerție mare. Cu cât inerția sarcinii este mai mare, cu atât suprafața de anclanșare este mai mică, așa cum se poate observa în graficul următor:

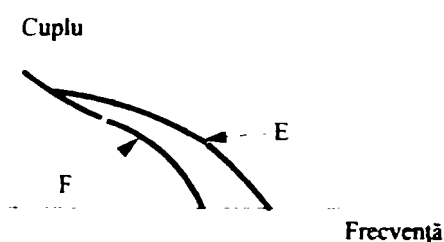


Fig. A.5.7 Caracteristici de anclanșare

Pentru graficul din figura A.5.7, cele două simboluri au următoarea semnificație:

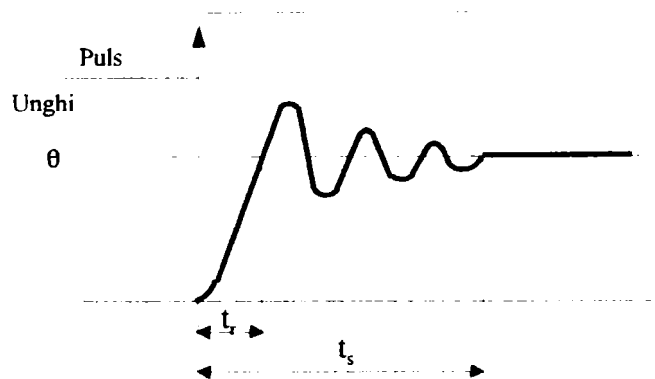
$E$  — caracteristica de anclanșare pentru cazul când sarcina nu are inerție;

$F$  — caracteristica de anclanșare pentru cazul când sarcina are inerție foarte mare.

- funcția treaptă de transfer (*indicial response*): motorul pas cu pas funcționează atâta timp cât condiția de excitație este activă. El se va opri complet abia după atenuarea vibrațiilor.
- viteza de rotire (*revolving speed*): este exprimată în pulsuri pe secundă (*pps*), sau în numărul de pași pe secundă. Relația dintre frecvența comenzii și viteza de rotație este următoarea:

$$\text{Viteza de rotație [rps : rotații pe secundă]} = \text{frecvența [pps]} + \left( \frac{360^\circ}{\text{unghiul unui pas}} \right)$$

$$\text{Viteza de rotație [rpm : rotații pe minut]} = \text{rps} \times 60$$



**Fig. A.5.8** Funcția treaptă de transfer

