

CAP. 1.1 MOTORUL PAS CU PAS. CARACTERISTICI GENERALE.

O definiție simplă a motorului pas cu pas este: „*un dispozitiv electromecanic care convertește impulsurile electrice în mișcări mecanice discrete*”. [3,17,22]

Axul motorului pas cu pas execută o mișcare de rotație în pași incrementali discreți când este aplicată în secvența corectă o comandă electrică în pulsuri. Rotația motorului este strâns legată de caracteristicile acestor impulsuri electrice. Astfel direcția de rotație a motorului este direct legată de secvența în care sunt aplicate pulsurile electrice, de asemenea și viteza de rotație este direct dependentă de frecvența impulsurilor electrice iar deplasarea unghiulară este direct dependentă de numărul de pulsuri electrice aplicate.[3,17]

În comparație cu alte tipuri de motoare (motoarele de curent continuu sau motoarele de curent alternativ asincrone și sincrone) motorul pas cu pas are o serie de avantaje:

- Rotația unghiulară a motorului este proporțională cu pulsul electric aplicat;
- Motorul are moment maxim în poziția oprit dacă bobinele sunt alimentate;
- Poziționare precisă, cu o eroare de 3-5% la un pas, care nu se cumulează de la un pas la altul;
- Răspunsuri excelente la pornit/oprit/schimbarea direcției de rotație;
- Fiabilitate excelentă deoarece nu există perii de contact la motor, deci durata de funcționare depinde de rulment;
- Posibilitatea de a obține viteze foarte mici cu sarcina legată direct pe axul motorului;
- O gamă foarte largă de viteze de rotație;

dar există și unele dezavantaje:

- Rezonanța poate apărea în cazul unui control deficitar;
- Controlul greoi la viteze foarte mari.[1,16,24,25]

Fiecare revoluție a axului motorului este alcătuită dintr-o serie de pași discreți. Un pas este definit ca fiind rotația unghiulară a axului motorului la aplicarea unui impuls de comandă. Fiecare impuls face ca axul să se rotească cu un anumit număr de grade caracteristic fiecărui tip de motor. Un „pas unghiular” reprezintă rotația axului motorului la fiecare pas, și se măsoară în grade. În funcție de acest pas unghiular se poate face o clasificare a motoarelor pas cu pas. În figura 1.1 este prezentată dependența poziției unghiulare a axului (figura 1.1 (b)) de secvența de alimentare a bobinelor (figura 1.1 (a)). [5,17,25]

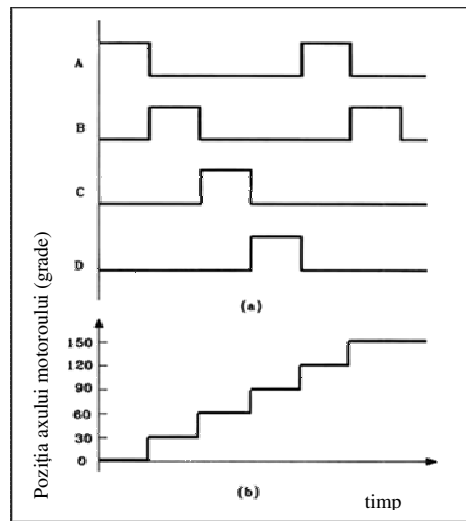


Fig. 1.1

Există trei tipuri de motoare pas cu pas din punct de vedere al configurație electrice.

Acestea sunt:

- Cu reluctanță variabilă
- cu magnet permanent
- Hibrice.

Aceste tipuri vor fi descrise pe larg în subcapitolul 1.2.

Pe lângă aceste tipuri „clasice” de motoare pas cu pas există un tip de motor cu un design special. Acesta este motorul cu rotorul format dintr-un disc din magnet permanent (figura 1.2). [16,18]

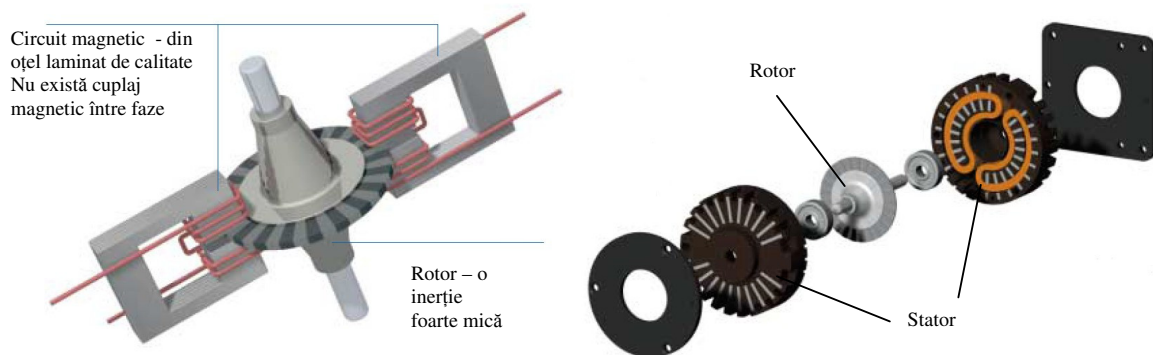


Fig. 1.2

Acest tip de motor oferă avantajul unei inerții foarte mici, precum și un flux magnetic optim deoarece nu există nici o legătură între cele două bobine ale statorului.

O altă caracteristică importantă a motoarelor, după care ele sunt și clasificate este mărimea lor. Clasificarea după mărime se face în funcție de diametrul corpului motorului, în timp ce lungimea motorului poate varia în interiorul aceleiași clase de mărime.

Nivelul de putere al motoarelor pas cu pas variază, de la motoarele foarte mici cu un consum de ordinul mW, la motoarele mai mari cu un consum de ordinul zecilor de wați.

Modul de funcționare al motorului pas cu pas este simplu. În momentul când o bobină este alimentată apare un flux magnetic în stator. Direcția fluxului poate fi determinată folosind „regula mâinii drepte”. Prin „energizarea” în secvența corectă a bobinelor statorului, motorul va efectua rotația dorită, dar mai mult despre modul de funcționare a motorului pas cu pas în subcapitolul 1.3.

De obicei motoarele pas cu pas au două faze, dar există și motoare cu trei sau cinci faze. Un motor bipolar cu două faze are o bobină/fază iar un motor unipolar are o bobină cu priză centrală/fază. De multe ori motorul unipolar este catalogat ca fiind un motor cu patru faze deși el are numai două faze. Există și motoare care au două bobine separate/fază – acestea pot fi conduse fie ca un motor bipolar sau ca un motor unipolar.

Pentru a putea înțelege mai bine structura unui motor pas cu pas trebuie menționat faptul că un pol este considerat acea regiune din corpul magnetizat în care densitatea de flux magnetic este concentrată. Atât statorul cât și rotorul unui motor pas cu pas au poli. Cel mai simplu motor poate avea doi poli (o pereche de poli) pentru fiecare din cele două faze pe stator și 2 poli (o pereche) pe rotor. În realitate sunt prezente mai multe perechi de poli atât pe stator cât și pe rotor, acest lucru ducând la creșterea numărului de pași la o rotație completă a motorului. Motorul pas cu pas cu magnet permanent are un număr egal de poli pe rotor și stator. Cele mai întâlnite tipuri de motoare pas cu pas cu magnet permanent au 12 perechi de poli. Statorul are 12 poli/fază. Motorul pas cu pas hibrid are rotorul prevăzut cu dinți, acesta fiind împărțit în două părți de un magnet permanent – rezultă că jumătate din dinți sunt poli sud iar cealaltă jumătate poli nord. De asemenea și statorul este prevăzut cu dinți.

Rezoluția unghiulară sau pasul unghiular al unui motor pas cu pas este dat de relația dintre numărul de poli pe rotor și numărul de poli pe stator, și numărul de faze.[18]

$$\text{Pas unghiular} = 360 / (N_{\text{Ph}} \times \text{Ph}) = 360/N \quad [1.1]$$

,unde

N_{Ph} – numărul de poli echivalenți /fază= numărul de poli pe rotor,

Ph – numărul de faze,

N – numărul total de poli pentru toate fazele.

În cazul în care numărul de poli de pe rotor și stator nu este egal, această relație nu mai este valabilă.

În funcție de modul de alimentare a fazelor există mai multe tipuri de conducere a motoarelor pas cu pas. Cele mai comune moduri sunt:

- pas întreg;
- jumătate de pas;
- micropășire.

Motivele pentru care motorul pas cu pas a ajuns să fie folosit într-o gamă mare de aplicații este acuratețea și repetabilitatea. În mod normal eroarea este cuprinsă între 3-5%/pas. Acuratețea unui motor pas cu pas depinde în mare parte de părțile sale mecanice și nu de părțile electrice. Există mai multe tipuri de erori prin care se exprimă diferența dintre poziția reală și poziția teoretică a motorului (figura 1.3). Astfel:

- Eroarea de poziționare la sfârșitul unui pas. Este eroarea pozitivă sau negativă de poziție care apare când motorul a efectuat un pas, adică s-a rotit cu un pas unghiular de la poziția anterioară.
- Eroarea de poziție. Dacă motorul a efectuat N pași față de poziția inițială ($N=360^\circ/\text{pas unghiular}$) iar unghiul față de poziția inițială este măsurat după fiecare pas, astfel după N pași o să avem un unghi Θ_N , avem următoarea relația: $\Delta\Theta_N = \Theta_N - (\text{unghi_corespunzator_unui_pas}) \times N$ [1.2]
- Histerezis de poziție. Este valoarea obținută prin măsurarea erorii de poziție în ambele direcții.[16]

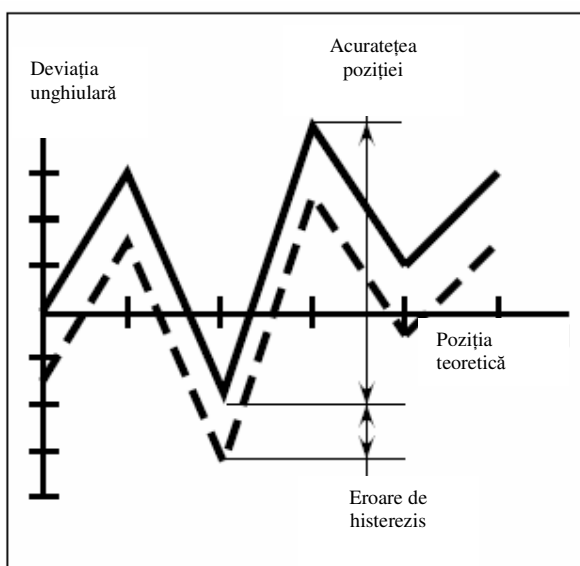


Fig. 1.3

După cum am menționat mai sus, foarte important într-un motor pas cu pas este partea mecanică. Astfel pentru a putea exprima performanța unui motor pas cu pas trebuie să se țină cont și de parametri mecanici: sarcină, frecare și inerție.[16]

Performanța unui motor pas cu pas depinde foarte mult de parametrii mecanici ai sarcinii. Sarcina este definită ca acel lucru pe care motorul trebuie să-l acționeze. Sarcina (sau încărcarea) motorului apare de obicei datorită frecării sau inerției precum și o combinație a celor două.

Frecarea este rezistența opusă mișcării datorată asperității suprafețelor care se ating una de alta. Frecarea este proporțională cu viteza. Pentru a efectua un pas este nevoie de un moment cel puțin egal cu frecarea. Odată cu creșterea sarcinii, crește și frecarea, deci viteza scade, deci accelerația crește și totodată crește eroarea de poziție. Astfel trebuie să se țină cont în alegerea motorului pas cu pas de sarcina pe care trebuie să o acționeze și de condițiile tehnologice care trebuie îndeplinite (viteză, accelerație, poziționare cu eroare cât mai mică etc.)

Inerția poate fi definită ca fiind opoziția la schimbările de viteză. O sarcină cu inerție mare are nevoie de un moment inerțial mare la pornire dar și la oprire. O sarcină inerțială mare va crește stabilitatea vitezei, dar va crește și timpul necesar ajungerii la viteza dorită și va scădea rata de porniri/opriri pe unitatea de timp.

Rotorul va oscila odată cu creșterea/scăderea sarcinii inerțiale și/sau frecării. Această relație nedorită între oscilația rotorului, inerție și frecare poate fi redusă prin amortizare mecanică dar mai simplu este eliminarea (sau mai bine zis amortizarea, căci aceste oscilații nu pot fi eliminate complet) acestor oscilații nedorite pe cale electrică prin schimbarea din modul de pășire întreg în modul de pășire jumătate de pas.

O caracteristică importantă a unui motor pas cu pas este răspunsul unghiular la efectuarea unui pas.

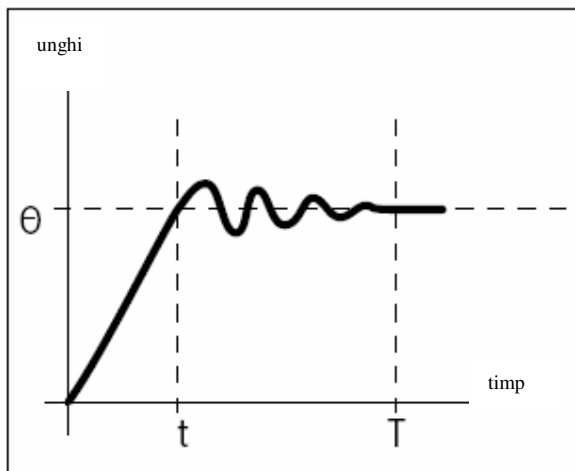


Fig.1.4

Când este aplicat un impuls electric motorului pas cu pas, rotorul are o mișcare unghiulară cum se vede în figura 1.4. Timpul t este timpul necesar rotorului să se rotească cu un pas odată ce un impuls electric a fost aplicat. Acest timp este dependent de raportul dintre moment și sarcină. Din moment ce cuplul este o funcție de deplasare rezultă că accelerația va fi și ea dependentă de deplasare. De aceea, când un motor efectuează pași mari (adică pășire întreagă, nu jumătate de pas sau micropășire) o dată cu un moment mare apare și o accelerație mare. Acest lucru poate cauza răspunsul din fig.1.4. Timpul T este timpul necesar acestor oscilații pentru a se amortiza. În unele aplicații care necesită o mare precizie și un răspuns cât mai rapid aceste oscilații nu sunt dorite. Este posibil să se reducă și chiar să fie eliminate prin micropășire.[16]

Fenomenul de rezonanță poate apărea la anumite viteze de pășire. El se manifestă prin pierderi de cuplu care au ca urmare faptul că motorul poate „sări” (sunt pierduți) pași și automat apare o desincronizare. Acest fenomen apare când impulsurile de intrare au aceeași frecvență cu frecvența naturală de oscilație a motorului (frecvența de rezonanță). Acest fenomen de rezonanță apare datorită construcției de bază a motoarelor pas cu pas și nu poate fi eliminat complet, doar redus prin micropășire și, de asemenea, este dependent de sarcina pe care o acționează.[16]

S-a încercat o prezentare generală a motorului pas cu pas din punct de vedere electric, dar și din punct de vedere al relației dintre partea mecanică, răspunsul acesteia la aplicarea unui impuls electric și partea electrică ce generează comanda.

1.2. TIPURI DE MOTOARE PAS CU PAS

Dacă ar fi să facem o clasificare a motoarelor pas cu pas cea mai edificatoare ar fi clasificarea lor în :

- Motoare pas cu pas cu reluctanță variabilă;
- Motoare pas cu pas cu magnet permanent;
- Motoare pas cu pas hibride.

1.2.1. Motoare pas cu pas cu reluctanță variabilă

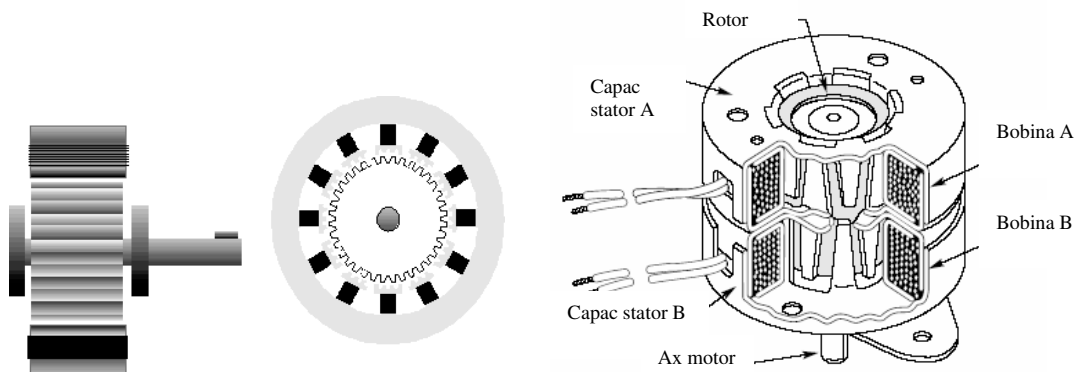


Fig. 1.5

Acest tip de motor este cunoscut de foarte mult timp [15]. În fig.1.5 este prezentată o secțiune printr-un motor pas cu pas cu reluctanță variabilă tipic. Motorul este alcătuit dintr-un rotor și un stator, fiecare cu număr diferit de dinți. Poate fi diferențiat ușor de un motor cu magnet permanent deoarece „se învâрте ușor”, fără nici o reținere, în momentul rotirii rotorului cu mâna.[1,5,11]

Statorul motorului este alcătuit dintr-un miez magnetic construit din lamele din oțel. Rotorul este construit din fier moale nemagnetizat cu dinți și sanțuri.

Relația dintre unghiul de pășire, dinții rotorului și dinții statorului este următoarea:

$$\Psi = \left(\frac{N_S - N_R}{N_S \times N_R} \right) \times 360^\circ \quad [1.3]$$

unde Ψ – pas unghiular,

N_S – numărul de dinți pe stator,

N_R – numărul de dinți pe rotor.[17]

1.2.2. Motoare pas cu pas cu magnet permanent

Principiul de funcționare al motorului pas cu pas cu magnet permanent este foarte simplu și constă în reacția dintre rotorul din magnet permanent și un câmp magnetic creat de stator.

În figura 1.6 este prezentat statorul motorului cu bobinele și polii acestuia precum și statorul din magnet permanent.

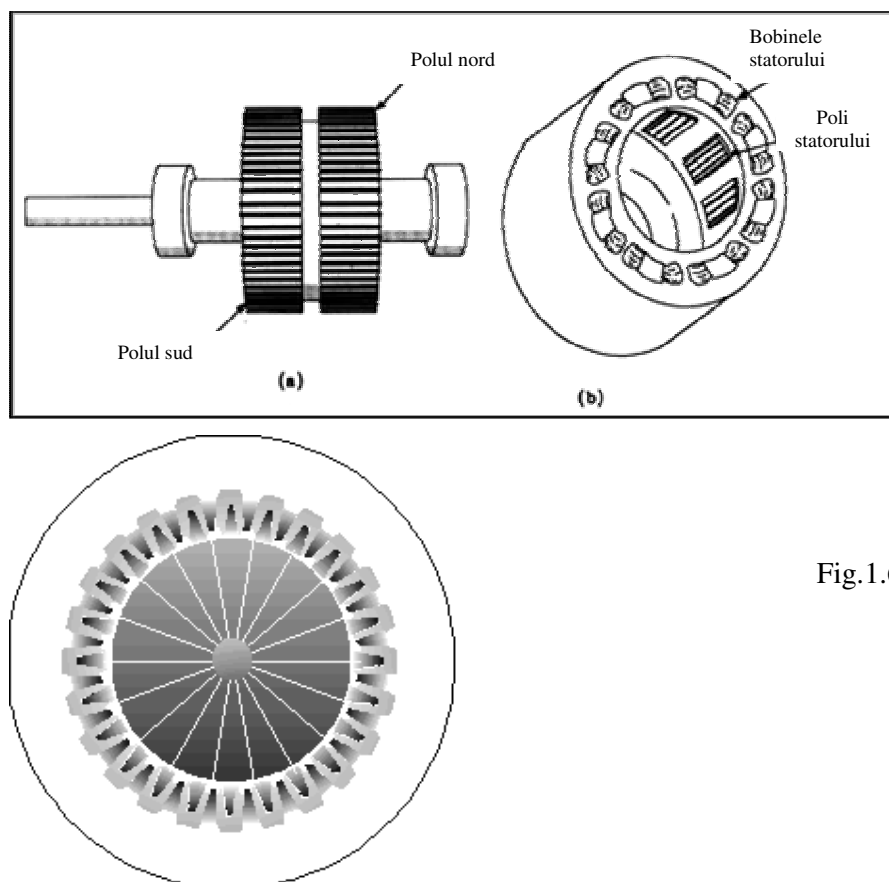


Fig.1.6

Acest tip de motoare pas cu pas se poate împărți la rândul său, în mai multe categorii în funcție de modul de conectare al bobinelor:

- Motoare pas cu pas cu magnet permanent unipolare;
- Motoare pas cu pas cu magnet permanent bipolare;
- Motoare pas cu pas cu magnet permanent multifază (sunt mai rar întâlnite).

De menționat că și motoarele pas cu pas cu reluctanță variabilă sunt de tipul unipolar și bipolar, iar construcția lor este exact ca cea a motoarelor pas cu pas cu magnet permanent. Am ales să prezentăm aceste tipuri de motoare în clasificarea motoarelor pas cu pas cu magnet permanent pentru că sunt mai des întâlnite.[5,15,17]

1.2.3. Motoare pas cu pas hibride

Motoarele pas cu pas probabil sunt cele mai des utilizate și răspândite tipuri de motoare. La început au fost create ca motoare sincrone cu magnet permanent de viteză mică. Ele sunt o combinație dintre un motor cu reluctanță variabilă și un motor cu magnet permanent, de unde și denumirea de motoare hibride.

Motorul hibrid este alcătuit dintr-un rotor format din doi poli separați de un magnet permanent axial, cu dintele opus deplasat față de dintele corespunzător cu o distanță egală cu jumătate din înălțimea unui dinte pentru a permite o rezoluție mai mare la pășire (figura 1.7 motorul hibrid în secțiune și un detaliu al modului de amplasare al dinților).[1,15]

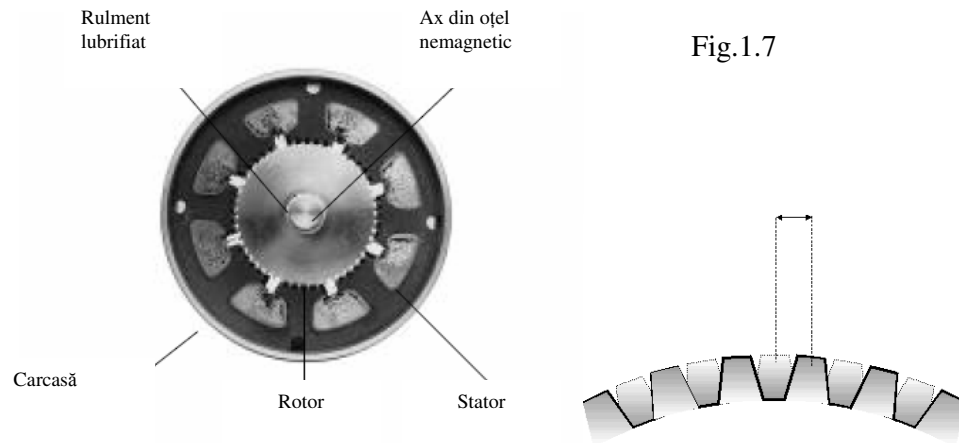


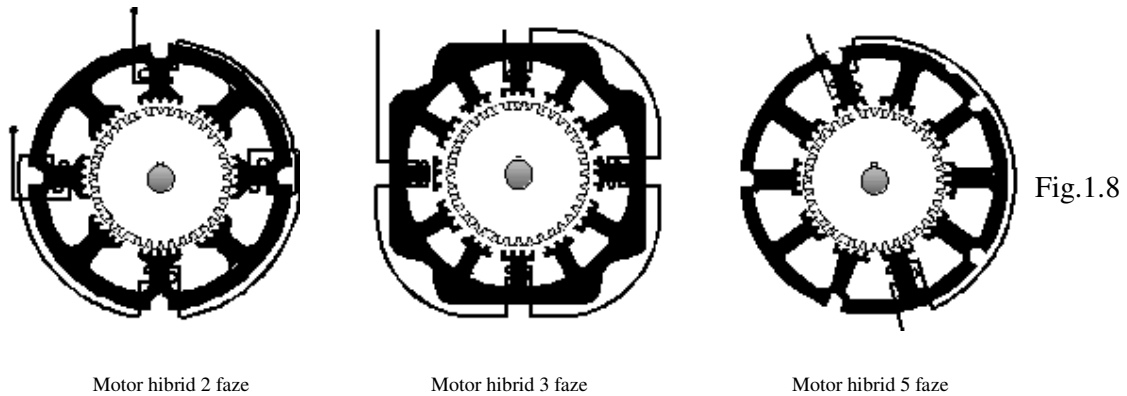
Fig.1.7

Cererea tot mai mare de motoare pas cu pas cu performanțe remarcabile și un zgomot redus a dus la apariția a două tipuri de motoare hibride:

- Motoarele hibride cu 2 (4) faze - folosite în aplicații obișnuite;
- Motoarele hibride cu 5 faze - folosite în aplicații speciale deoarece oferă următoarele avantaje față de alte tipuri de motoare: rezoluție mare, zgomot mic în timpul funcționării, moment de reținere mic.

Deși toate aceste avantaje fac din el un motor foarte performant, acest lucru atrage după sine și un cost semnificativ mai mare al driver-elor. Deci în alegerea unui motor pas cu pas, de orice tip ar fi el, trebuie să se țină cont în primul rând de cerințele aplicației în care va fi folosit și în al doilea rând, de prețul motorului.

În figura 1.8 sunt prezentate secțiuni transversale prin motoare hibride cu 2, 3 și 5 faze.[13,15]



În cazul motoarelor pas cu pas hibride un număr de faze mai mare însemna un cost mai mare. Odată cu implementarea tehnologiei de conducere sinusoidală în 3 faze a fost posibilă scăderea numărului de faze ale motorului, deci și costul de producție, rezoluția motorului (numărul de pași/rotație) fiind determinată de numărul de perechi de poli în rotor.

Astăzi cel mai răspândit tip de motor pas cu pas hibrid este cel cu 3 faze. Odată cu progresul tehnologiei de conducere un motor cu 3 faze poate egala, din punct de vedere al performanțelor, un motor cu 5 faze.[5,15]

1.2.4. alte tipuri de motoare

Un tip special de motoare sunt motoarele liniare care folosesc forța motorului pentru a roti și a extinde un șurub. Unul din marile avantaje ale acestui tip de motor (figura 1.9) este faptul că ocupă un loc foarte mic și mișcarea este direct liniară.[22]

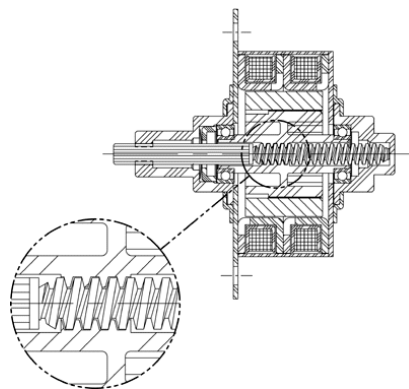


Fig.1.9

Există și tipuri de motoare dinamice cum ar fi cele piezoelectrice sau cele electrostrictive. Materialele electrostrictive sunt la fel ca materialele piezoelectrice, adică amândouă materialele sunt cristale feroelectrice care se contractă sau se alungesc în funcție de tensiunea aplicată.[7,10]

Totuși, față de materialele piezoelectrice, materialele electrostrictive nu sunt polarizate, adică indiferent de polaritatea tensiunii aplicate, materialul se va alungi pe direcția câmpului aplicat. De asemenea curgerea, materialelor electrostrictive este de doar 3% față de cea a materialelor piezoelectrice care este de 16%. [10]

În figura 1.10 este prezentată structura de bază a unui motor pas cu pas piezoelectric. Părțile notate cu A și B reprezintă două grupuri de inele grupate împreună și care sunt folosite ca și gheare de prindere. C este un tub ceramic, și reprezintă partea de conducere, iar D este osia de suport și este din oțel. Principiul de funcționare este simplu, se aplică o tensiune pe ghearele A și B și dimensiunea tuburilor ceramice se schimbă. Controlul se realizează cu ajutorul unui sistem digital, care generează trei trenuri de impulsuri pentru a controla motorul în secvența dorită. Prin schimbarea frecvenței se schimbă și viteza motorului. Deși rezoluția este mare și în sisteme de control în buclă deschisă, precizia într-un sistem de control în buclă închisă este mult mai mare.[6,8,10]

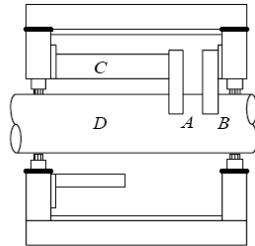


Fig. 1.10

Deși motoarele piezoelectrice sunt excelente pentru poziționarea submicronică, ele nu au o repetabilitate bună, datorită histerezisului mare și proprietății fizice a materialului de curgere lentă (în timp materialul își schimbă forma). Motoarele electrostrictive au fost dezvoltate pentru a elimina neajunsurile motoarelor piezoelectrice. Acest tip de motoare au un increment de mișcare de ordinul micrometrilor, cel mai fin fiind de 0,04 micrometri. Există și motoare ultraperformante care pot realiza un pas de 2,5 angstrom.[9]

Un alt tip de motoare care pot fi conduse pas cu pas sunt motoarele de curent continuu fără perii, cunoscute mai ales ca motoare de curent continuu „brushless”. Simplist, acest motor este de fapt un motor de curent continuu cu perii „întors pe dos”. Avantajul față de un motor de curent continuu cu perii este evident, lipsa periiilor ducând la o viață mai lungă a motorului și automat la o întreținere mai ușoară. Astfel, după cum se observă în figura 1.11, rotorul este alcătuit din bobine, iar statorul este alcătuit dintr-un magnet permanent. Din moment ce nu există nici o comutație mecanică, ca și în cazul motorului de curent continuu cu perii, mișcarea se va obține prin rotirea câmpului magnetic. Din acest motiv acționarea unui motor „brushless” este mult mai complexă decât a unui motor de curent continuu cu perii. Rolul comutatorului de la motorul de curent continuu cu perii este luat de către senzorii Hall care „simt” (magnetul din rotor trecând prin dreptul senzorului Hall îl face să-și schimbe starea) poziția rotorului din magnet permanent și excită bobina corespunzătoare prin circuitul logic și apoi prin circuitul de alimentare.[19,20]

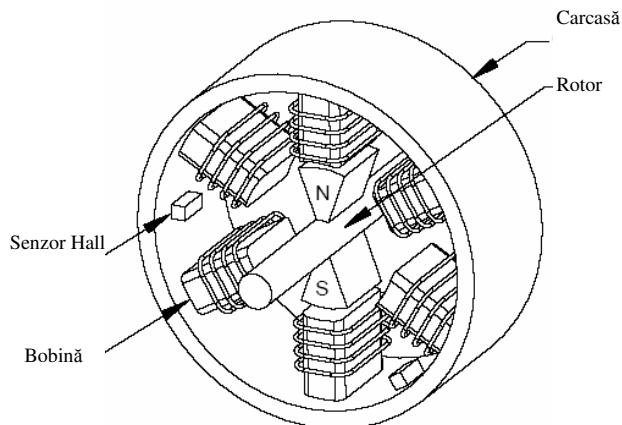


Fig. 1.11

Se întâlnesc două tipuri de motoare “brushless”:

➤ motorul trapezoidal, denumirea vine de la caracteristica trapezoidală a motorului; în acest fel se încearcă reducerea pulsațiilor momentului prin aplatizarea caracteristicii (figura 1.12). În practică acest lucru este mai greu de obținut, deoarece un grad de neliniaritate se păstrează. În plus, se observă la viteze mai mici o “zvâcnitură” în momentul comutației.[20]

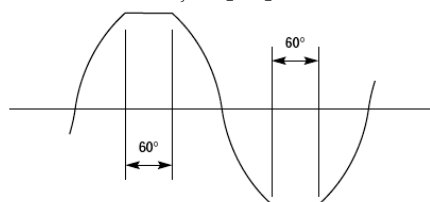


Fig. 1.12

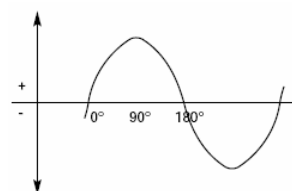


Fig. 1.13

➤ Motorul sinusoidal, este denumit așa deoarece caracteristica sa nu a fost modificată (figura 1.13). Un asemenea tip de motor, numit și servomotor de curent alternativ „brushless”, poate fi alimentat cu curent alternativ aplicat pe fiecare bobină. Dacă avem un motor cu 3 bobine, defazajul între curenți trebuie să fie de 120° . În acest caz este nevoie de un dispozitiv de control mai precis, și anume un encoder optic de mare rezoluție.[19,20]

1.3. Funcționarea motorului pas cu pas

În continuare vom prezenta modul de funcționare al tipurilor de motoare pas cu pas prezentate în capitolul 1.2.

Motorul pas cu pas cu reluctanță variabilă

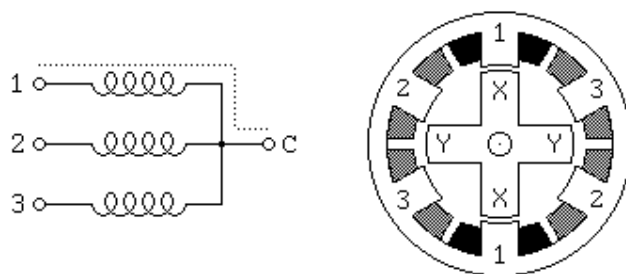


Fig. 1.14

Dacă motorul are trei înfășurări legate așa cum se vede în figura 1.14, cu un terminal comun la toate înfășurările, atunci este probabil ca el să fie un motor pas cu pas cu reluctanță variabilă. Borna comună este legată în general la potențialul pozitiv al sursei de alimentare și înfășurările sunt alimentate în secvență.

Când bobinele statorului sunt alimentate cu un curent continuu, polii acestuia se magnetizează. Rotația are loc în momentul în care dintele rotorului este atras de către polii statorului care au fost magnetizați.

În secțiune se observă că motorul face o rotire de 30° la un pas. Rotorul acestui motor are 4 dinți iar statorul are 6 poli, cu fiecare bobină înfășurată în jurul a doi poli. De exemplu la oprirea curentului din înfășurarea 1 și alimentarea înfășurării 2 rotorul va efectua o rotație de 30° în sensul acelor de ceasornic în așa fel încât polul marcat Y va ajunge în dreptul polului marcat 2. Pentru o obține o rotație continuă a motorului se alimentează înfășurarea 3 concomitent cu oprirea alimentării înfășurării 2.[5,21]

Dacă considerăm logica pozitivă, adică 1 înseamnă că prin bobină trece curent, iar 0 înseamnă că bobina nu este alimentată, secvența de mai jos va face motorul să efectueze 24 de pași, adică 2 revoluții, în sensul acelor de ceasornic:

Bobina 1	1001001001001001001001
Bobina 2	0100100100100100100100100
Bobina 3	0010010010010010010010010

timp --->

Mai trebuie să menționăm că există motoare pas cu pas cu reluctanță variabilă cu 4 sau 5 înfășurări care necesită 5 sau 6 fire pentru conexiuni exterioare (alimentare). Principiul de funcționare și implicit de conducere a acestor tipuri este asemănător cu modul de conducere pentru motoarele cu trei înfășurări, dar și în acest caz este foarte important modul de alimentare în secvență a înfășurărilor pentru a putea face motorul să funcționeze corect.

Privitor la geometria motorului în fig. 1.14 se observă la fiecare pas acesta realizează o rotație de 30 de grade. Acest exemplu de motor are un număr mic de dinți pe rotor și de poli pe stator și este satisfăcător pentru aplicațiile în care nu este nevoie de o finețe mare. Folosind însă

un motor cu mai mulți poli și dinți pe stator se poate obține la un pas al motorului o rotație de câteva grade (la unele motoare foarte performante la un pas corespunde o rotație de o zecime de grad).[5]

MOTOARE PAS CU PAS UNIPOLARE

În această categorie intră atât motoarele pas cu pas cu magnet permanent cât și cele hibride cu 5 sau 6 fire. Ele au legăturile interne în general după cum se observă în figura 1.15 , cu 6 fire, sau ca în figura 1.16, cu 5 fire.[3,5,22]

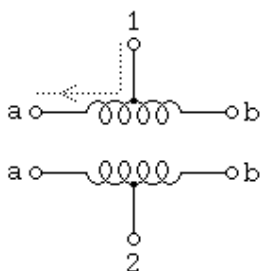


Fig. 1.15

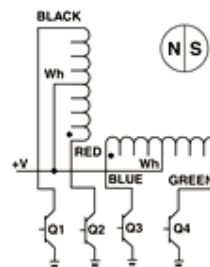


Fig. 1.16

În general firele 1 și 2 sau +V sunt legate la pozitivul sursei de alimentare, iar celelalte fire sunt legate alternativ la negativul sursei pentru a schimba direcția câmpului produs de bobină.[5]

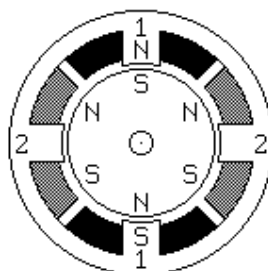
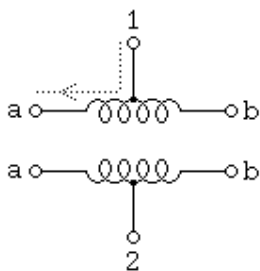


Fig. 1.17

În figura 1.17 este o secțiune transversală printr-un motor pas cu pas cu magnet permanent sau hibrid (diferența dintre cele două tipuri de motoare nu este relevantă la acest nivel de abstractizare), a cărei bobine sunt prezentate alăturat. Astfel, bobina 1 este distribuită pe polii de sus și de jos ai statorului, pe când bobina 2 este distribuită pe polii din stânga și din dreapta ai statorului. Rotorul are 6 poli.

După cum se observă în figură, curentul circulă din firul central la terminalul „a” lucru care face ca polul de sus al statorului să devină polul nord, iar cel de jos polul sud. Acest lucru

face ca rotorul să fie atras în poziția prezentată. Dacă curentul prin bobina 1 este oprit și bobina 2 este alimentată rotorul va efectua o rotire cu 30° , adică un pas.[5,21]

Dacă dorim să rotim motorul continuu se va aplica curentul pe cele două bobine conform secvenței de mai jos (la fel se consideră logica pozitivă, adică 1 înseamnă că bobina este străbătută de un curent, iar 0 înseamnă că bobina nu este alimentată):

Bobina 1a	100010001000100010001
Bobina 1b	0010001000100010001000100
Bobina 2a	0100010001000100010001000
Bobina 2b	0001000100010001000100010

timp --->

Bobina 1a	1100110011001100110011001
Bobina 1b	0011001100110011001100110
Bobina 2a	0110011001100110011001100
Bobina 2b	1001100110011001100110011

timp --->

Este foarte important de reținut că cele două jumătăți ale aceleiași bobine nu sunt alimentate în același timp. În prima secvență de mai sus, se observă că bobinele sunt alimentate pe rând, deci consumul este mai mic. În cea de-a doua secvență bobinele sunt alimentate în același timp și are ca rezultat creșterea momentului produs de motor de 1,4 ori față de modul de alimentare din prima secvență, dar cu un consum dublu.[5,21]

Prin combinarea celor două secvențe se obține modul de pășire jumătate de pas.

Bobina 1a	11000001110000011100000111
Bobina 1b	00011100000111000001110000
Bobina 2a	01110000011100000111000001
Bobina 2b	00000111000001110000011100

timp --->

Dacă avem nevoie de o rezoluție unghiulară mai mare avem nevoie de un număr mai mare de poli. Motorul folosit în descrierea funcționării motoarelor unipolare are o rezoluție de $30^\circ/\text{pas}$. [5]

Motoarele pas cu pas cu magnet permanent pot ajunge la o rezoluție de $1,8^\circ/\text{pas}$, pe când motoarele pas cu pas hibride sunt normal construite cu o rezoluție de $3,6^\circ$ și $1,8^\circ/\text{pas}$, dar cele mai performante pot ajunge până la o rezoluție de $0,72^\circ/\text{pas}$.

MOTOARELE PAS CU PAS BIPOLARE

În această categorie, ca și în categoria motoarelor unipolare intră atât motoarele pas cu pas cu magnet permanent cât și cele hibride. Diferența dintre motoarele unipolare și cele bipolare este lipsa legăturii centrale la bobine. Din acest motiv motoarele bipolare sunt mai simple din punct de vedere constructiv, dar driver-ele folosite sunt mai complexe, ele trebuind să inverseze polaritatea fiecărei perechi de poli.[3,5,22]

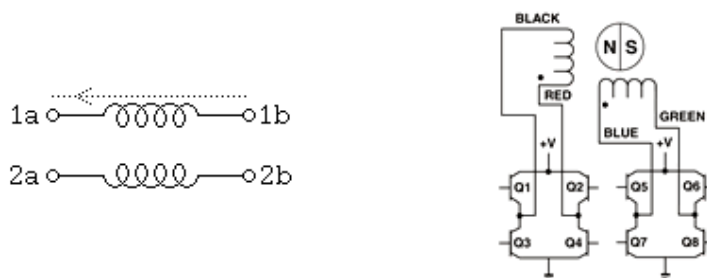


Fig.1.18

După cum se observă în figura 1.18 motorul are 4 fire, spre deosebire de cele unipolare care au 5 sau 6 fire. Pentru a putea recunoaște un motor pas cu pas bipolar de alte motoare cu 4 fire se măsoară rezistența dintre terminale.

Secțiunea transversală a motorului pas cu pas bipolar (figura 1.19), este la fel ca secțiunea transversală prin motorul pas cu pas unipolar (figura 1.17).

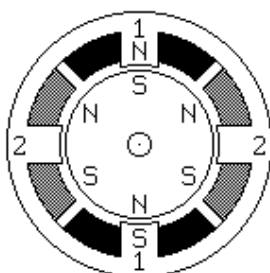


Fig. 1.19

Circuitul de comandă pentru aceste motoare este alcătuit dintr-o punte H pentru fiecare bobină; pe scurt o punte H permite ca polaritatea tensiunii aplicate la capetele fiecărei bobine să fie controlată independent. Secvența de control pentru acest tip de motor este prezentată mai jos, folosind simbolurile – și + pentru a indica polaritatea tensiunii aplicate la terminalele bobinelor:

Terminal 1a	+---+---+---+---	++---++---++---++
Terminal 1b	--++---++---++	--++---++---++
Terminal 2a	--++---++---++	--++---++---++

Terminal 2b ---+---+---+---+ +---+---+---+---+
 timp --->

Pe lângă aceste tipuri cunoscute de motoare pas cu pas mai există și alte tipuri de motoare pas cu pas cum ar fi motorul bifilar și motorul multifază.

Motorul bifilar are aceeași structură internă ca și motorul bipolar, dar diferența este că este alcătuit din 4 bobine, de unde și explicația că motorul are 8 fire în loc de 4.

În practică, motoarele bifilare sunt alimentate fie ca un motor unipolar fie ca un motor bipolar. În figura 1.20 este prezentat modul de conectare a bobinelor într-un motor bifilar. Tot în această figură (reprezentat cu linie punctată la bobina 1) este prezentată folosirea motorului bifilar ca și un motor unipolar. Astfel firele unei bobine sunt legate în serie cu cea aflată în paralel cu ea, iar punctul de conexiune este folosit ca și o bornă de intrare. Pentru a folosi motorul bifilar ca pe un motor bipolar este nevoie să conectăm firele fie în paralel, cum se vede la bobina 2, fie ca și la bobina 1, dar alimentarea se va face pe la bornele *c*, respectiv *d*.

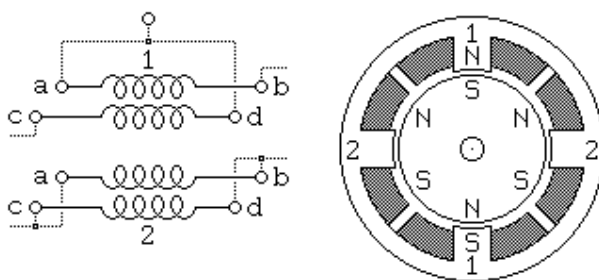


Fig. 1.20

Este bine de știut că motoarele cu 6 fire vândute ca motoare pas cu pas bipolare sunt de fapt motoare bifilare conectate ca în figura 1.20, bobina 1.[5]

O clasă mai puțin obișnuită de motoare este motorul pas cu pas multifază. Acesta are legate bobinele ciclic în serie (figura 1.21), cu un punct de conexiune între fiecare pereche de bobine.

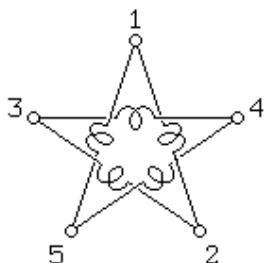


Fig. 1.21

Acest tip de motor oferă un cuplu foarte mare deoarece în orice moment toate sau toate fără una dintre bobine sunt alimentate în orice punct al ciclului de funcționare. Unele motoare cu 5 faze pot avea o rezoluție ungiulară de $0.72^\circ/\text{pas}$, adică 500 pași/revoluție.[5]

Mai jos este prezentată o secvență de alimentare a bobinelor pentru a face motorul să funcționeze:

Terminal 1	+++-----+++++-----++
Terminal 2	--+++++-----+++++---
Terminal 3	+-----+++++-----++++
Terminal 4	+++++-----+++++-----
Terminal 5	----+++++-----+++++-
	timp --->

Se observă că, la fiecare pas se schimbă doar polaritatea unui singur terminal. Această schimbare face ca tensiunea să fie zero, deoarece bornele au aceeași polaritate, și aplică tensiune bobinei care era în această stare. Secvența de control prezentată mai sus va face ca motorul în cauză, cu 5 faze va efectua două revoluții.[5]

Pentru a putea deosebi un motor multifază, cu 5 faze de alte motare cu 5 fire, vom măsura rezistența dintre două terminale consecutive, valoarea măsurată este, o valoare R , iar valoarea dintre două terminale neconsecutive va fi $1,5R$.

Există unele motoare cu 5 bobine separate, adică au 10 fire. Acestea pot fi conectate în configurația de stea, și folosind $\frac{1}{2}$ dintr-o punte H ca și circuit de comandă, putem comanda aceste tipuri de motoare.

Pentru a nu face greu de înțeles modul de funcționare a diferitelor tipuri de motoare prezentate mai sus, am ales să prezint funcționarea lor doar în modul de funcționare „pas întreg” care reprezintă modul intrinsec de pășire al motoarelor, și în unele cazuri modul de funcționare „jumătate de pas”, unde era ușor de explicat și era o derivație a modului de funcționare „pas întreg”.

Există, după cum am menționat și mai sus, modul de pășire „jumătate de pas” care reprezintă alături de micropășire moduri aparte de funcționare al motoarelor pas cu pas, care permit reducerea dezavantajelor acestor tipuri de motoare. Totuși realizarea acestor moduri de pășire necesită controller-e și driver-e specializate, ale căror costuri sunt ridicate, aceste moduri de pășire fiind folosite doar în aplicații speciale.[2,4,22]

Astfel un mod aparte de funcționare a motoarelor pas cu pas este micropășirea. Micropășirea este modul de funcționare al motorului care constă în variația fluxului și care produce mișcarea rotorului, într-un mod cât mai lin, față de modul „pas întreg” sau „jumătate de pas”. Acest lucru are ca rezultat scăderea vibrațiilor și obținerea unei mișcări nezmotoase. De asemenea se obține o rezoluție unghiulară mai mare și automat o eroare de poziționare mai mică.[3,5]

Există mai multe moduri de micropășire, cu „lungimi” de pași pornind de la 1/3 dintr-un pas întreg și până la 1/32 dintr-un pas întreg și în unele aplicații speciale și mai puțin.

Un motor pas cu pas este un motor sincron. Aceasta înseamnă că poziția de echilibru a rotorului este sincronizată cu fluxul statorului. Rotorul este făcut să se rotească cu ajutorul câmpului învârtitor spre următoarea poziție de echilibru. Cuplul dezvoltat de motor, T este o funcție de cuplul rezistiv T_H și distanța dintre fluxul prin stator, f_s , și poziția rotorului f_r .

Această relație este:

$$T = T_H \cdot \sin(f_s - f_r) \quad [1.4]$$

unde f_s și f_r sunt date în „grade electrice”. Relația dintre „gradele electrice” și „gradele mecanice” este dată de formula:

$$f_{el} = \left(\frac{n}{4}\right) \cdot f_{mec} \quad [1.5]$$

unde n este numărul de pași pe revoluție.

În figura 1.22 sunt prezentate dependențele dintre modul de pășire, viteză (pași/ms), cuplul motorului și unghiul de încărcare al motorului. Se observă variațiile puternice în timpul modului de pășire „pas întreg” și variația în trepte mici a cuplului și unghiului de încărcare în cazul micropășirii. De asemenea se observă că viteza rămâne aproximativ constantă în timpul micropășirii.[14]

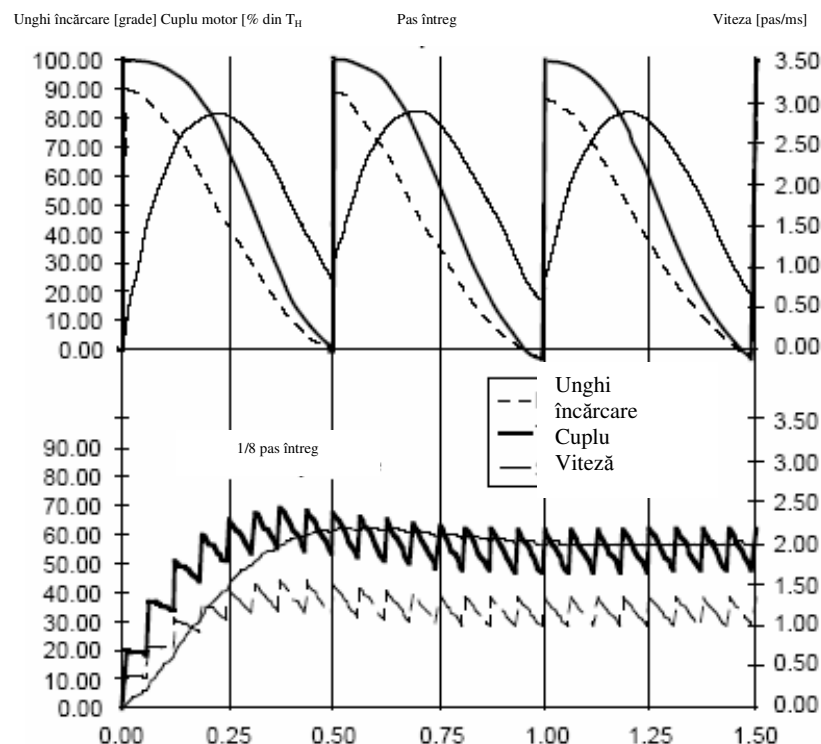


Fig. 1.22

De asemenea se poate observa din figura 1.23 că, consumul energetic scade exponențial odată cu micropășirea.[14]

% din energia la un pas întreg

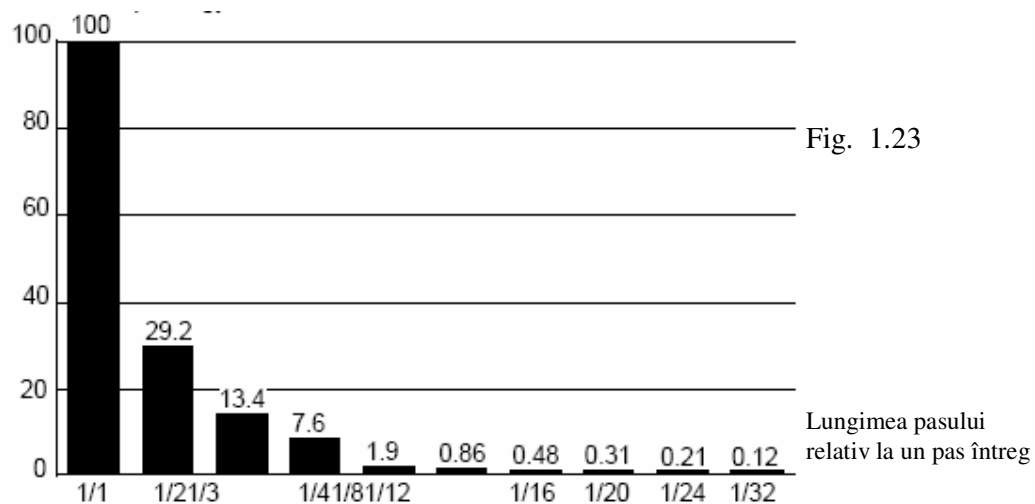


Fig. 1.23

După cum a fost prezentat în subcapitolul 1.1. răspunsul unghiular în modul de pășire „pas întreg”, motorul până să atingă poziția corespunzătoare efectuării unui pas efectuează o pendulare în jurul aceluși punct, cu amplitudine mare la început care mai apoi scade după un timp. Spre deosebire în timpul micropășirii răspunsul unghiular este mai precis, motorul având o

foarte mică deviație de la poziția teoretică în care trebuie să ajungă deoarece energia sa cinetică este mult mai mică decât în momentul efectuării unui pas întreg. Diferența dintre răspunsul unghiular în cele două moduri de pășire este rezentată în figura 1.24.[14]

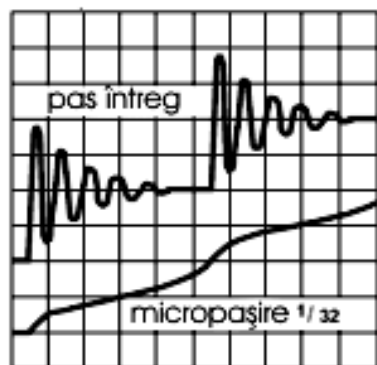


Fig. 1.24

Deși există atâtea avantaje ale micropașirii față de modul de pășire „pas întreg” totuși există unele considerații care limitează utilitatea micropașirii. Astfel în primul rând, dacă în sistemul din care face parte motorul există frecare statică atunci precizia unghiulară obținută în cazul micropașirii va fi limitată.

Al doilea motiv este legat de geometria dinților statorului și rotorului, care în cele mai multe cazuri nu este perfectă, și duce la apariția erorii de poziționare (datorită imperfecțiunii dinților câmpul creat nu este perfect și deci nici poziția în care este rotorul nu este cea teoretică). În figura 1.25 este prezentată diferența dintre poziția actuală și cea teoretică.

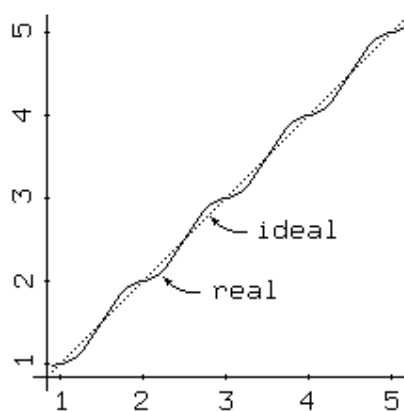


Fig. 1.25

Al treilea motiv este legat de faptul că micropașirea necesită sisteme de control digitale, deci curentul prin fiecare bobină este cuantificat, fiind controlat de un convertor digital-analog. Mai mult, datorită limitării curentului prin PWM, curentul prin fiecare bobină nu este menținut perfect constant, mai mult el oscilează în jurul unei valori, astfel, în cel mai bun caz curentul poate fi aproximat cu o eroare cât mai mică.

Efectul cuantificării poate fi ușor văzut în figura 1.26, unde pe axa X avem curentul disponibil printr-o bobină a motorului, iar pe axa Y curentul disponibil prin cealaltă bobină.

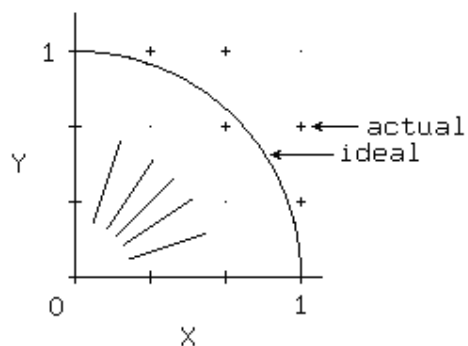


Fig. 1.26

Toate aceste limitări reduc performanțele obținute de micropășire. Totuși ele pot fi reduse, dar nu eliminate, prin folosirea unor convertoare digital analogice de o mare precizie.

Toate aceste elemente, împreună, dau natura electrică dar și mecanică a motorului pas cu pas. Pentru a putea folosi în aplicații motorul pas cu pas, indiferent de tipul sau mărimea sa trebuie să ținem cont în egală măsură de cerințele sale electrice, pentru o funcționare optimă, dar și de proprietățile sale mecanice, adică motorul să fie folosit în parametri săi mecanici nominali nu la limita acestora.