

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Școala Doctorală de Inginerie Electrică

REZUMAT EXTINS
TEZĂ DE DOCTORAT

Contribuții la dezvoltarea actuatorilor electromagnetice

Autor,
Ing. Dragoș-Ștefan NICOLESCU

Conducător științific,
Prof. Univ. Dr. Ing. Florea Ioan HĂNȚILĂ

BUCUREȘTI
2025

Cuprins

1. Introducere	4
2. Stadiul actual al actuatorilor electromagnetici cu magneți permanenți	6
2.1. Considerente generale relative la stadiul actual în domeniu	6
2.2. Soluții constructive de actuatori electromagnetici dezvoltate până în prezent.....	6
3. Dezvoltarea unui nou model de actuator electromagnetic cu magneți permanenți.....	12
3.1. Descrierea modelului de actuator electromagnetic cu magneți permanenți	12
3.2. Principiul de funcționare al modelului de actuator electromagnetic liniar cu magneți permanenți.....	12
3.2.1. Asemănări și deosebiri cu soluții constructive clasice	12
3.2.2. Pozițiile de funcționare ale actuatorului electromagnetic liniar	13
4. Dimensionarea analitică a subansamblurilor actuatorului electromagnetic.....	16
5. Modelarea numerică a actuatorului electromagnetic alimentat în curent.....	22
5.1. Considerente generale	22
5.2. Modelarea actuatorului electromagnetic în cele 4 stări de funcționare	23
5.2.1. Poziția de repaus la întrefier maxim.....	23
5.2.2. Închiderea actuatorului electromagnetic	24
5.2.3. Poziția de repaus la întrefier minim	25
5.2.4. Deschiderea actuatorului electromagnetic.....	26
6. Analiza cinematică a actuatorului electromagnetic alimentat în curent.....	27
6.1. Analiza cinematică a actuatorului electromagnetic fără sarcină mecanică la anclanșare.....	27
6.2. Analiza cinematică a actuatorului electromagnetic cu sarcină mecanică.....	29
6.2.1. Analiza cinematică a actuatorului electromagnetic cu sarcină mecanică la anclanșare	29
6.2.2. Analiza cinematică a actuatorului electromagnetic cu sarcină mecanică la declanșare	31
7. Implementarea modelului experimental de actuator electromagnetic.....	34
7.1. Considerente generale relative la implementarea fizică a modelului experimental	34
7.2. Implementarea fizică a circuitului feromagnetic fix	35
7.3. Implementarea fizică a circuitului feromagnetic auxiliar.....	36
7.4. Implementarea fizică a circuitului feromagnetic mobil.....	37
7.5. Implementarea fizică a bobinei de excitație	37
7.6. Modelul experimental al actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți.....	38
8. Implementarea sursei de energie a actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți	40
8.1. Considerente generale	40

Contribuții la dezvoltarea actuatorilor electromagnetice

8.2.	Motivarea alegerii sursei de energie a actuatorului electromagnetice	40
8.3.	Componentele principale ale sursei de energie a actuatorului electromagnetice	40
8.4.	Principiul de funcționare al sursei de energie a actuatorului electromagnetice	42
8.4.1.	Încărcarea bateriei de condensatoare.....	42
8.4.2.	Descărcarea condensatoarelor pe rezistența de descărcare a circuitului auxiliar	42
8.4.3.	Descărcarea condensatoarelor pe bobina de excitație a actuatorului electromagnetice	43
9.	Cercetări experimentale realizate pentru analiza actuatorului electromagnetice	44
9.1.	Considerente generale relative la cercetarile realizate cu modelul experimental de actuator electromagnetice	44
9.2.	Măsurarea inducției magnetice în întrefierul actuatorului electromagnetice	44
9.3.	Oscilografierea formei de undă a curentului electric prin bobină și a deplasării circuitului feromagnetic mobil	45
9.3.1.	Considerente generale relative la montajul experimental	45
9.3.2.	Oscilografierea formei de undă a curentului electric prin bobină și a deplasării circuitului feromagnetic mobil în timpul manevrei de închidere a actuatorului electromagnetice	46
9.3.3.	Oscilografierea formei de undă a curentului electric prin bobină și a deplasării circuitului feromagnetic mobil în timpul manevrei de deschidere a actuatorului electromagnetice	47
9.4.	Măsurarea forței exercitate asupra circuitului feromagnetic mobil.....	48
10.	Concluzii	50
11.	Bibliografie	52

1. Introducere

Actuatoarele electromagnetice reprezintă un domeniu aparte al electrotehnicii, fiind una din ramurile ingineriei în care teoria câmpului electromagnetic a găsit aplicații imediate care să își demonstreze utilitatea.

În esență, noțiunea de actuator face referire la un dispozitiv care realizează conversia energiei de natură electromagnetică în energie cinetică [1][2]. Acestea pot fi rotative, printre care se enumeră mașinile rotative de curent continuu sau curent alternativ, sau liniare, cele mai răspândite fiind electromagneții de curent continuu sau alternativ și chiar suspensiile și propulsiile electromagnetice.

Modelul de actuator electromagnetic cu magneți permanenți propus în prezenta teză se aseamănă din punct de vedere al funcționării, precum și prin subansamblele principale, cu celelalte soluții constructive, dar spre deosebire de cele din urmă, poziționarea, dimensiunile, și circulația câmpului magnetic prin diferitele componente este optimizată, în vederea obținerii unor performanțe cinetice superioare.

Prezentarea temei de doctorat

Noutatea prezentei lucrări constă în realizarea unei noi structuri geometrice a circuitului feromagnetic, astfel încât forța dezvoltată de actuatorul electromagnetic să fie maximă în poziție de repaus la întrefier minim, cât și în decursul manevrei de anclanșare, pentru un volum dat. În acest sens, încă din stadiul de proiectare, dimensionarea actuatorului a ținut cont de limitările tehnologice și de material, fiind obținută o structură optimă. Modelarea numerică a actuatorului electromagnetic în cele 4 stări de funcționare ale acestuia (respectiv, în repaus la întrefier maxim și minim, precum și manevrele de închidere și deschidere) a validat dimensionarea actuatorului electromagnetic și principiul de funcționare.

Scopul tezei de doctorat

Prezenta teză de doctorat abordează probleme științifice relative la actuatoarele electromagnetice liniare, care au incluse în componența lor magneți permanenți. Obiectivul general al prezentei teze a fost dezvoltarea unui actuator electromagnetic liniar cu magneți permanenți, cu o nouă structură geometrică și cu înaltă performanță a parametrilor electromagnetici și mecanici. Acest lucru a fost posibil prin analiza principalelor soluții constructive adoptate până în prezent pe plan internațional, ale căror avantaje și dezavantaje au fost prezentate în stadiul actual al prezentei teze de doctorat.

Obiectivele secundare ale prezentei lucrări au fost realizate în vederea validării obiectivului general, respectiv: analiza cinematică a actuatorului electromagnetic, pentru a determina principalii parametri mecanici ai acestuia; implementarea unui model experimental, pentru a valida soluția obținută analitic și pe cea numerică; dezvoltarea unei surse de energie a actuatorului electromagnetic liniar cu magneți permanenți, pentru a putea utiliza dispozitivul în diferite locații, și nu în ultimul rând, cercetările experimentale realizate cu acesta, pentru a valida performanțele prin verificarea parametrilor electromagnetici și mecanici obținuți numeric.

Rezultatele cercetării au fost diseminate în cadrul unor articole științifice publicate în prestigioase publicații naționale și internaționale de specialitate. Rezultatul principal al prezentei lucrări este reprezentat de modelul numeric și modelul experimental de actuator electromagnetic

liniar cu magneți permanenți. De asemenea, un rezultat important îl reprezintă modelul experimental al sursei de energie a actuatorului, realizat pentru a utiliza dispozitivul în diverse locații.

Teza de doctorat deschide noi perspective în cercetarea și dezvoltarea actuatorilor electromagnetice liniare cu magneți permanenți, în special în structurile geometrice ale circuitelor feromagnetice ale acestora.

Conținutul tezei de doctorat

În cadrul capitolului 2, este realizat stadiul actual în domeniu, respectiv sunt prezentate diferite soluții constructive de actuator electromagnetice cu magneți permanenți, ținând cont de avantajele și dezavantajele acestora.

În cadrul capitolului 3, este prezentată dezvoltarea noului model de actuator electromagnetice cu magneți permanenți. În acest capitol sunt prezentate diverse aspecte relative la principiul de funcționare al actuatorului cu magneți permanenți, atât din punct de vedere al fenomenelor de natură electromagnetică, cât și de natură cinetică, făcând referire la corelarea electromecanică a dispozitivului.

Dimensionarea analitică a principalelor subansamble ale actuatorului electromagnetice este realizată în capitolul 4, în care sunt determinate principalele dimensiuni geometrice ale circuitului feromagnetic, cât și principalii parametri ai bobinei de excitație a acestuia.

Analiza numerică a actuatorului electromagnetice alimentat în curent este prezentată detaliat în cadrul capitolului 5, în care a fost realizat un model numeric al dispozitivului, implementat în programul de calcul al elementului finit FEMM, printr-o geometrie 2D.

În cadrul capitolului 6 a fost realizată analiza cinematică a actuatorului electromagnetice, în care a fost calculată forța dezvoltată de acesta, accelerația imprimată, energia cinetică și viteza obținută de armătura mobilă, în vederea determinării performanțelor mecanice ale dispozitivului.

Implementarea modelului experimental de actuator electromagnetice este prezentată în cadrul capitolului 7, în care sunt realizate diferite desene tehnice, precum și poze cu subansamblele principale ale dispozitivului.

Capitolul 8 face referire la calculul, modelarea numerică și implementarea sursei de energie a actuatorului electromagnetice.

Capitolul 9 al prezentei teze de doctorat face referire la diferite cercetări experimentale realizate cu actuatorul electromagnetice, fiind studiate diferite mărimi de natură electromagnetică și cinetică, în vederea analizei performanțelor obținute de către dispozitiv în funcționarea acestuia.

Într-un final, capitolul 10 este destinat observațiilor și concluziilor privitoare la întreg procesul de dezvoltare al actuatorului electromagnetice cu magneți permanenți, precum și a sursei de energie a acestuia.

2. Stadiul actual al actuatorilor electromagnetici cu magneți permanenți

2.1. Considerente generale relative la stadiul actual în domeniu

La nivel global, cât și la nivel național, au fost dezvoltate diferite modele de actuator electromagnetice liniare cu magneți permanenți cu diferite forme constructive și performanțe cinetice. Astfel, în funcție de dimensiunea actuatorilor electromagnetici dezvoltate, cât și în funcție de materialele utilizate în construcția acestora, au fost dezvoltate dispozitive care produc forțe de ordinul (1 ... 10) N până la mii de kN [3]. În general, actuatorii electromagnetici cu magneți permanenți au impuse anumite performanțe din stadiul de proiectare, respectiv forța dezvoltată de actuator la întrefier maxim, forța dezvoltată la întrefier minim, cursa armăturii mobile, volumul, masa, etc.

2.2. Soluții constructive de actuator electromagnetice dezvoltate până în prezent

Primul model de actuator electromagnetice cu magneți permanenți

Primul model de actuator electromagnetice cu magneți permanenți prezentat în cadrul stadiului actual are o construcție relativ simplă, simetrică atât în plan longitudinal, cât și în plan transversal, așa cum se poate observa în figura următoare:

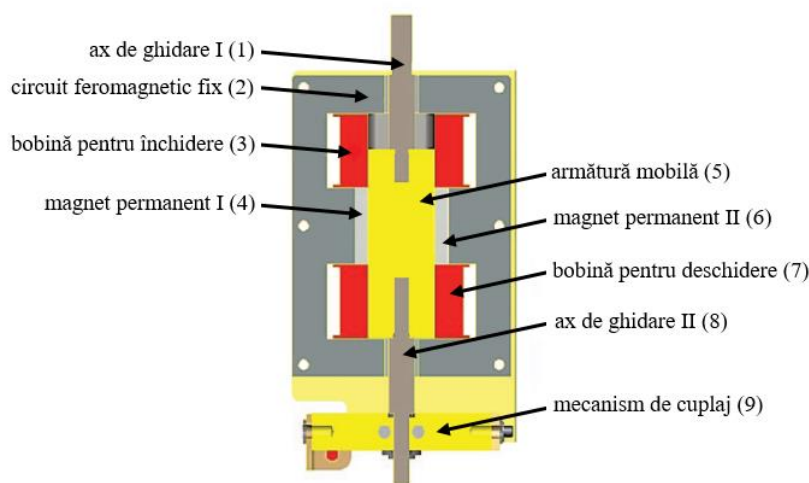


Fig. 2.1. Desen de principiu al primului model de actuator electromagnetice cu magneți permanenți din stadiul actual în domeniu [4]

Componentele acestui actuator electromagnetice sunt axul de ghidare I și axul de ghidare II (1 și 8), circuitul feromagnetic fix (2), bobina pentru închidere (3), magneții permanenți I și II (4 și 6), armătura mobilă (5), bobina pentru deschidere (7) și mecanismul de cuplaj (9), așa cum sunt ele descrise conform lucrării [4].

Sursele de câmp magnetic sunt reprezentate de magneții permanenți I și II (4 și 6), bobina pentru închidere (3) și bobina pentru deschidere (7). Aceste componente produc câmpul magnetic necesar funcționării actuatorului electromagnetice în cele două poziții de repaus și în timpul manevrei de anclanșare și de declanșare, așa cum se poate observa în figura 2.2.

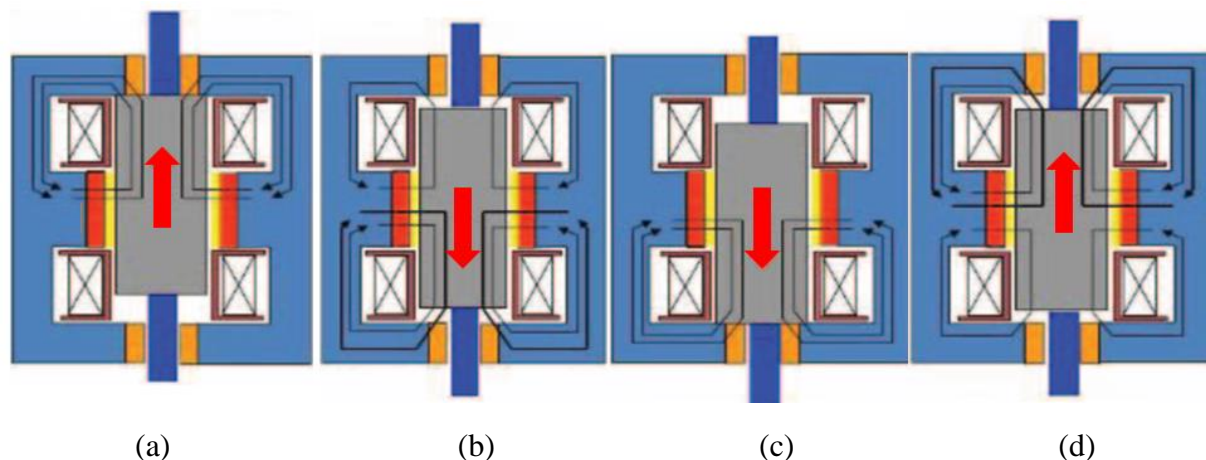


Fig. 2.2. Circulația câmpului magnetic în circuitul magnetic al actuatorului în prima poziție de repaus (a), în decursul manevrei de anclanșare (b), în a doua poziție de repaus (c) și în timpul manevrei de declanșare (d) [4]

Această soluție constructivă prezintă mai multe dezavantaje, printre care se enumeră prezența a două bobine (una pentru efectuarea manevrei de anclanșare și una pentru efectuarea manevrei de declanșare), și de asemenea, cursa limitată a plonjorului, dată de forma constructivă a circuitului feromagnetic fix.

Al doilea model de actuator electromagnetic cu magneți permanenți

Al doilea actuator electromagnetic cu magneți permanenți prezentat în cadrul stadiului actual este realizat din două părți distincte montate în aceeași carcasă, respectiv subansamblul de acționare, care este reprezentat de un electromagnet clasic, cu plonjor, și subansamblul de clichetare magnetică și deschidere, așa cum se poate observa în figura 2.3.

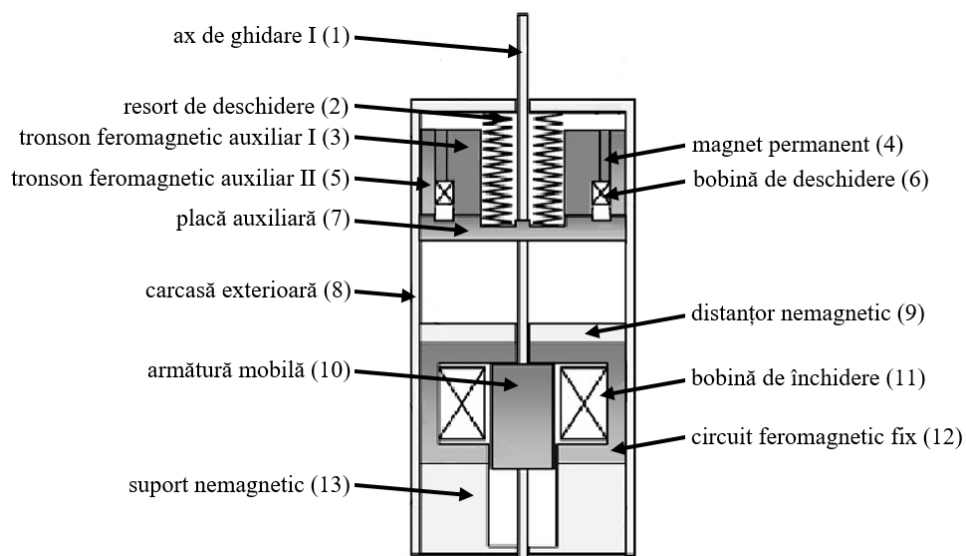


Fig. 2.3. Desen de principiu al celui de-al doilea model de actuator electromagnetic cu magneți permanenți (poziție de repaus superioară) din stadiul actual [5]

Conform figurii 2.3, structura poate să fie delimitată din punct de vedere funcțional în două subansamble distincte, respectiv subansamblul de acționare și cel de clichetare magnetică și deschidere, așa cum sunt ele prezentate în [5]. Subansamblul de acționare este format din circuitul feromagnetic fix (12), armătura mobilă (10) și bobina de închidere (11), acesta fiind poziționat pe suportul nemagnetic (13). Subansamblul de clichetare magnetică și deschidere este format din tronsoanele feromagnetice auxiliare I (3) și II (5), resortul de deschidere (2), magnetul permanent (4), bobina de deschidere (6) și placa auxiliară (7).

Cele două subansamble sunt poziționate într-o carcasă exterioară (8) și sunt delimitate prin distanțorul nemagnetic (9). Axul de ghidare I (1) este solidar mecanic atât cu armătura mobilă (10), cât și cu placa auxiliară (7), astfel încât forța dezvoltată asupra unei componente se exercită și asupra celeilalte componente.

A doua soluție constructivă prezintă mai multe dezavantaje, printre care se enumeră prezența a două bobine și totodată, o dimensiune relativ ridicată a actuatorului electromagnetic. Având în vedere faptul că toate componentele sunt poziționate de-a lungul axului de ghidare, lungimea actuatorului electromagnetic este relativ ridicată. Un alt dezavantaj îl reprezintă numărul ridicat de componente, lucru care poate conduce la o durată de viață și o fiabilitate redusă.

Al treilea model de actuator electromagnetic cu magneți permanenți

Al treilea model de actuator electromagnetic cu magneți permanenți prezentat în cadrul stadiului actual are o construcție axisimetrică [6], și totodată, include anumite aspecte tehnologice care nu se regăsesc în cadrul celorlalte soluții constructive existente.

Subansamblele principale ale actuatorului electromagnetic sunt circuitul feromagnetic fix, cel mobil, bobina de excitație și două circuite feromagnetice auxiliare, regăsite în figura 2.4.

Circuitul feromagnetic fix este format din tronsonul superior (2), tronsonul lateral (6) și cel inferior (9). Cel de-al doilea subansamblu, respectiv circuitul feromagnetic mobil, este format din axul de ghidare (1), coloana centrală (10) și placa inferioară (11). În partea superioară a actuatorului electromagnetic, sub tronsonul superior (2), se regăsește circuitul auxiliar superior, care are în componența acestuia tronsonul auxiliar I (4) și magnetul permanent I (3). În partea inferioară a actuatorului electromagnetic, deasupra tronsonului inferior (9), se regăsește circuitul auxiliar inferior, care are în componența acestuia tronsonul auxiliar II (7) și magnetul permanent II (8).

Funcționarea actuatorului electromagnetic este asemănătoare ca la celelalte soluții constructive, dar o modificare importantă se regăsește în decursul menținerii în poziția de repaus superioară. Atunci când actuatorul electromagnetic este închis, fluxul magnetic circulă atât prin întrefierul format de coloana centrală (10) și tronsonul feromagnetic superior (2), cât și prin întrefierul format de placa inferioară (11) și tronsonul inferior (9).

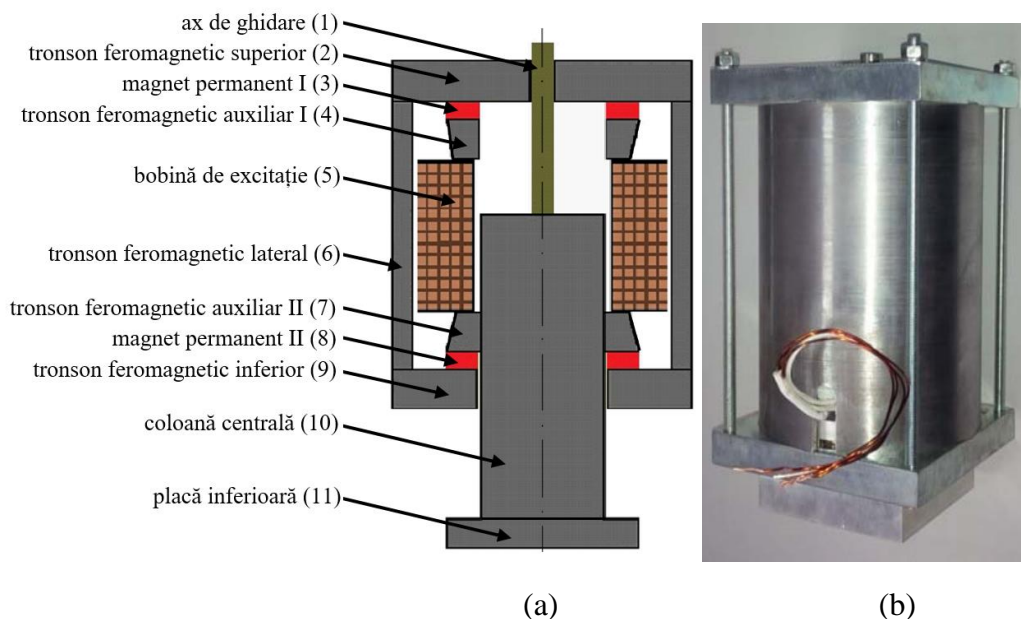


Fig. 2.4. Desen de principiu al celui de-al treilea actuator electromagnetice cu magneți permanenți din stadiului actual (a) și modelul experimental al dispozitivului (b) [6]

În poziția de repaus inferioară, bobina de excitație (5) este nealimentată, iar câmpul magnetic este produs strict de magneții permanenți. Conform autorilor, inducția magnetică are o valoare nesemnificativă în întrefierul dintre coloana centrală (10) și tronsonul feromagnetic superior (2), lucru care conduce la o forță neglijabilă, insuficientă pentru a deplasa armătura mobilă.

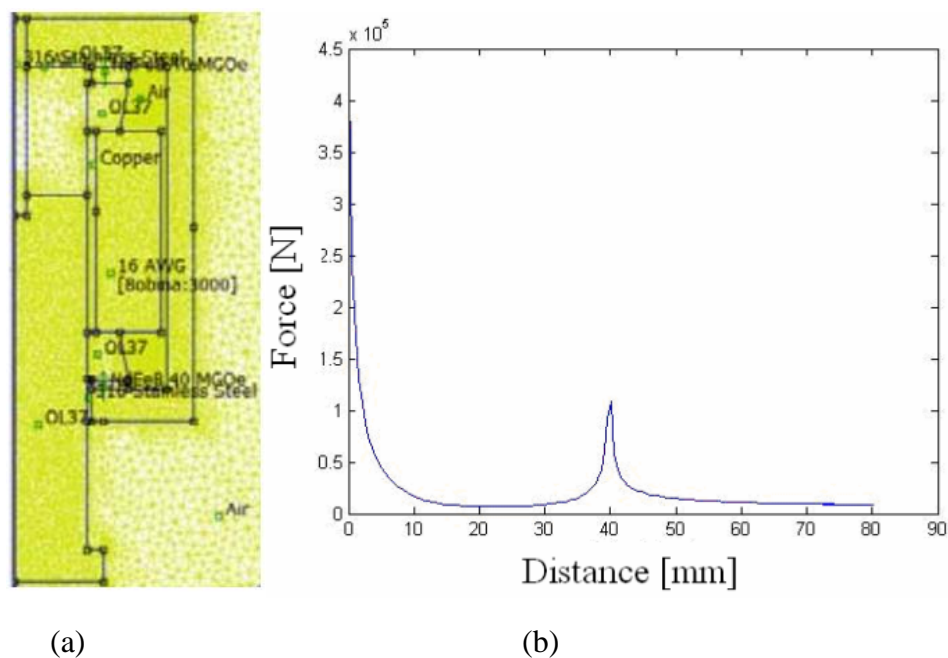


Fig. 2.5. Modelarea numerică a celui de-al treilea actuator electromagnetice (a) prezentat în stadiul actual și variația forței dezvoltate de actuator în funcție de întrefier în decursul manevrei de închidere (b) [6]

Geometria actuatorului electromagnetic conduce la un flux magnetic de scăpări și dispersii semnificative, cauzate de poziționarea circuitului feromagnetic auxiliar superior în proximitatea tronsonului lateral, conform figurii 2.5, care constituie un dezavantaj net al acestei soluții constructive. Forța dezvoltată în decursul manevrei de închidere are o valoare redusă, așa cum se poate observa și din graficul prezentat în figura precedentă.

Al patrulea model de actuator electromagnetic cu magneti permanenți

Al patrulea model de actuator electromagnetic cu magneti permanenți prezentat în cadrul stadiului actual are o structură relativ simplă, simetrică de-a lungul axei de simetrie a dispozitivului, așa cum se poate observa în figura 2.6.

Subansamblele principale ale actuatorului electromagnetic prezentat în figura următoare sunt circuitul feromagnetic fix, armătura mobilă (2), cele două bobine de excitație (3) și circuitul feromagnetic auxiliar [7]. Circuitul feromagnetic fix este format din tronsonul feromagnetic superior (1) și lateral (4), iar circuitul feromagnetic auxiliar este format din tronsonul feromagnetic auxiliar I (5), II (7) și magnetii permanenți (6), așa cum se poate observa în figura 2.6.

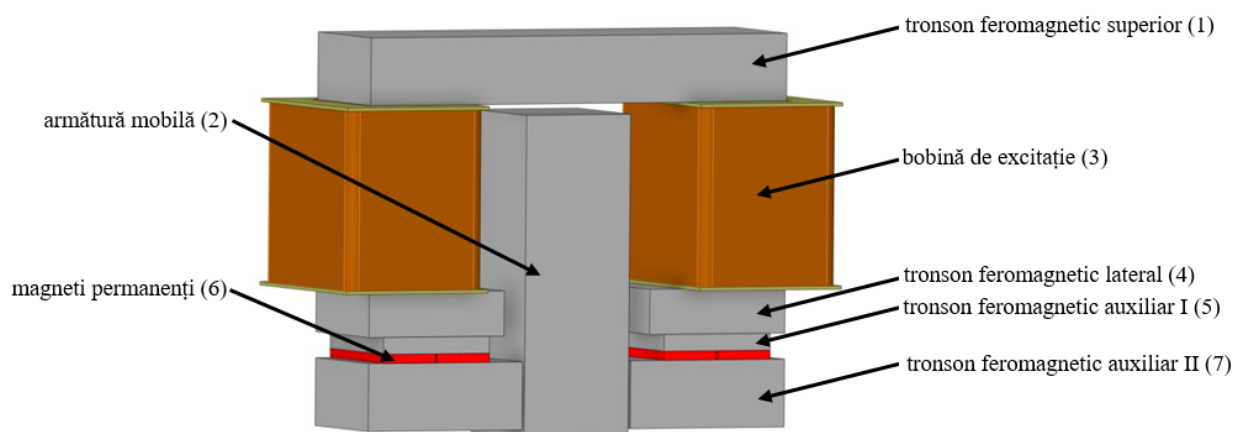


Fig. 2.6. Desen de principiu al celui de-al patrulea model de actuator electromagnetic cu magneti permanenți din stadiul actual [7]

Al cincilea model de actuator electromagnetic cu magneti permanenți

Al cincilea model de actuator electromagnetic cu magneti permanenți are o structură diferită față de modelele prezentate anterior. Spre deosebire de a doua soluție, în care magnetii permanenți sunt regăsiți în interiorul actuatorului electromagnetic, această soluție constructivă poate fi împărțită în două subansamble distincte, respectiv cel de clichetare magnetică și cel de acționare, așa cum se poate observa în figura 2.7.

Subansamblul de acționare (cel inferior) este format din circuit feromagnetic fix (9), armătură mobilă (13), bobină pentru închidere (10) și deschidere (12), precum și distanțorul nemagnetic II (11).

Subansamblul de clichetare magnetică este format din două circuite feromagnetice auxiliare, respectiv unul pentru închidere (4) și altul pentru deschidere (6), în interiorul cărora se regăsesc

magneții permanenți I (3) și II (7), iar între acestea se află placa auxiliară (5), de asemenea feromagnetică [8]. În circuitul feromagnetic auxiliar pentru închidere se regăsește resortul (2), care are rol în cadrul manevrei de deschidere.

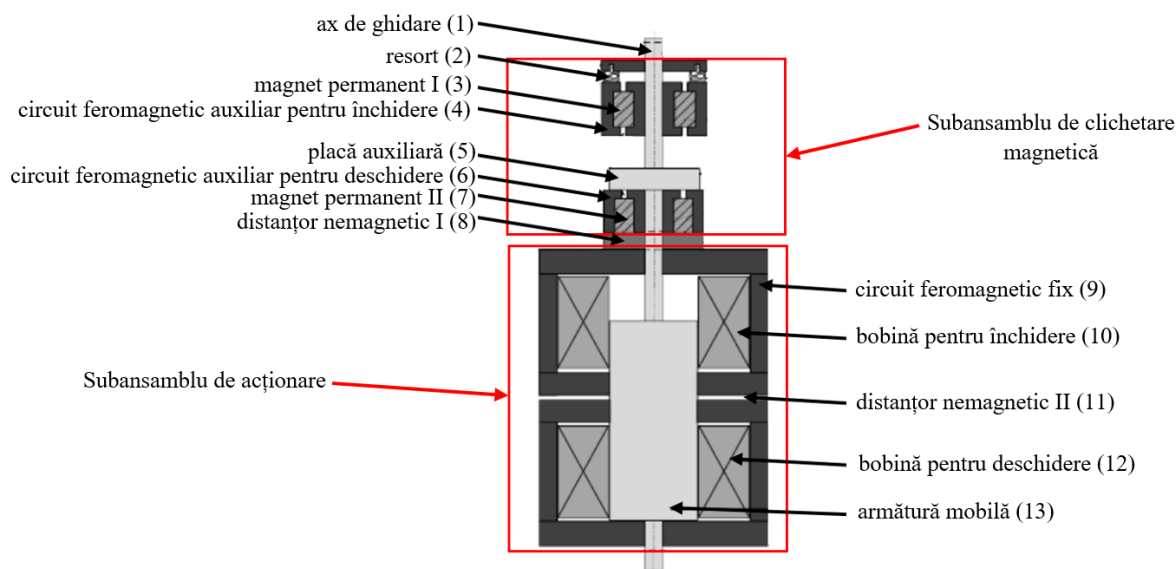


Fig. 2.7. Desen de principiu al celui de-al cincilea model de actuator electromagnetic cu magneți permanenți din stadiul actual [8]

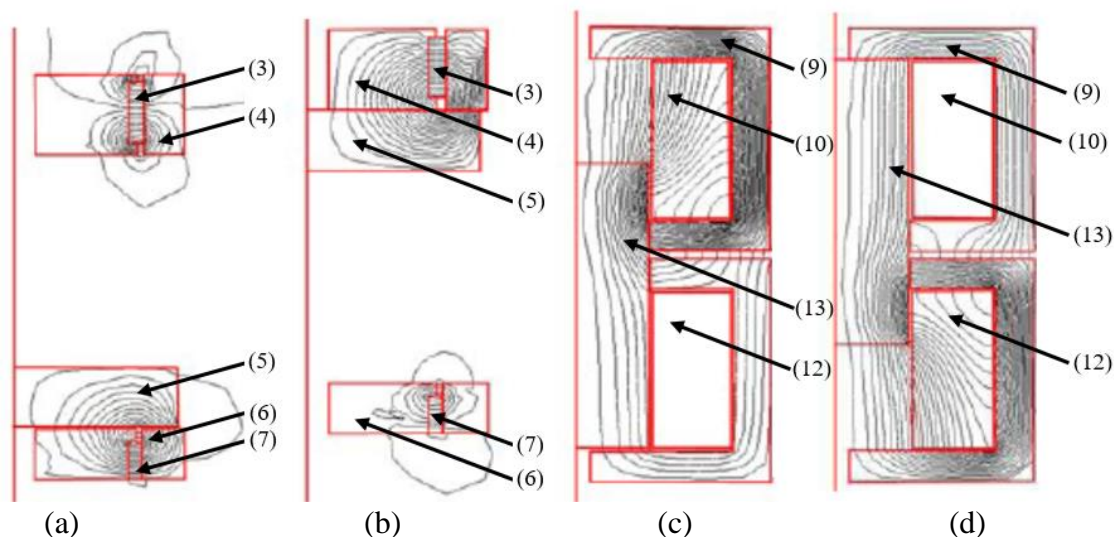


Fig. 2.8. Câmpul magnetic în interiorul subansamblelor actuatorului electromagnetic în poziția de repaus inferioară (a), în poziția de repaus superioară (b), în decursul manevrei de închidere (c) și în decursul manevrei de deschidere (d) [8]

De asemenea, cele două subansambluri sunt delimitate prin distanțorul nemagnetic I (8), iar energia cinetică obținută de armătura mobilă (13) în decursul manevrelor de închidere și deschidere este transmisă la placa auxiliară (5) prin intermediul axului de ghidare (1), așa cum se observă în figura 2.8.

Dezavantajul acestei soluții constructive este reprezentat de numărul ridicat de componente, fapt care conduce la o fiabilitate scăzută.

3. Dezvoltarea unui nou model de actuator electromagnetic cu magneți permanenți

3.1.Descrierea modelului de actuator electromagnetic cu magneți permanenți

Actuatorul electromagnetic liniar dezvoltat are în componența acestuia un circuit feromagnetic fix, unul auxiliar, doi magneți permanenți, o bobină de excitație și o armătură feromagnetică mobilă (regăsită în lucrare și sub denumirea de circuit feromagnetic mobil) [9], sub forma unui plonjor, așa cum se poate observa în figura următoare:

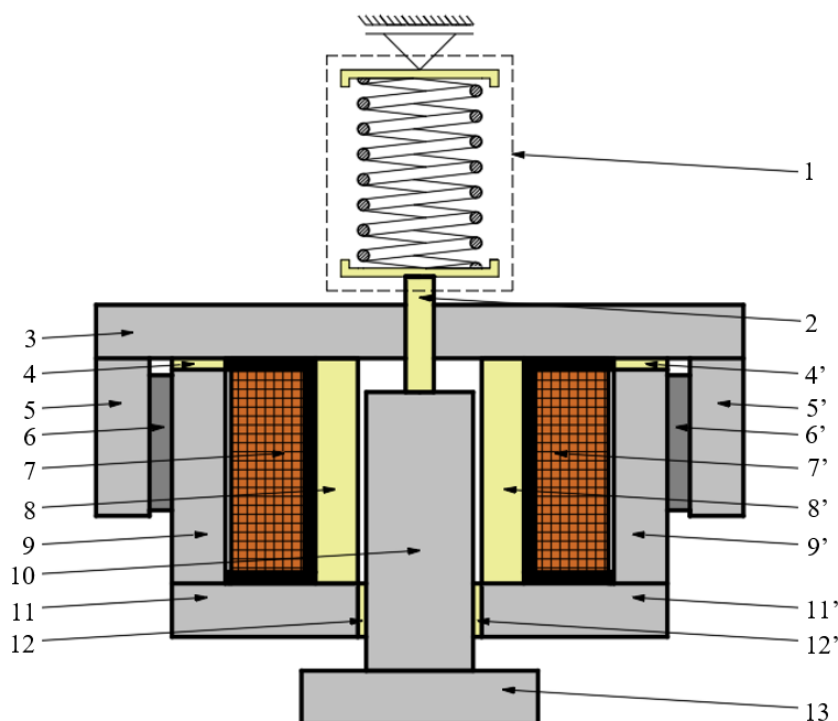


Fig. 3.1. Vedere în secțiune a primului model de actuator electromagnetic cu componentele principale evidențiate [9]

Componentele principale ale actuatorului electromagnetic sunt următoarele: 1 – mecanism de deschidere cu resort; 2 – percutor; 3 – tronson feromagnetic superior; 4, 4' – distanțoare superioare; 5, 5' – tronsoane feromagnetice auxiliare; 6, 6' – magneți permanenți; 7, 7' – bobină de excitație; 8, 8' – suporti interiori; 9, 9' – tronsoane feromagnetice laterale; 10 – coloană centrală; 11, 11' – tronsoane feromagnetice inferioare; 12, 12' – distanțoare inferioare; 13 – talpă polară.

3.2.Principiul de funcționare al modelului de actuator electromagnetic liniar cu magneți permanenți

3.2.1.Asemănări și deosebiri cu soluții constructive clasice

Actuatorul electromagnetic liniar cu magneți permanenți dezvoltat în cadrul prezentei teze are un principiu de funcționare asemănător cu cel al unui electromagnet clasic. Rolul acestui dispozitiv este de a produce o forță de natură electromagnetică, care duce la deplasarea armăturii mobile în raport cu cea fixă, în sensul apropierei celor două prin reducerea întrefierului existent între acestea.

Spre deosebire de un electromagnet clasic, care necesită alimentare în regim permanent pentru a produce o forță utilă, actuatorul liniar dezvoltat este capabil să exercite o forță magnetică la întrefier minim fără consum de energie electrică. Acest lucru este datorat magneților permanenți din componența acestuia, care produc un câmp magnetic static, dirijat spre întrefier prin intermediul circuitului magnetic auxiliar.

3.2.2. Pozițiile de funcționare ale actuatorului electromagnet liniar

3.2.2.1. Considerente generale relative la pozițiile de funcționare ale actuatorului electromagnet liniar cu magneți permanenți

Din punct de vedere al principiului de funcționare al unui actuator electromagnet liniar cu magneți permanenți, se pot distinge patru stări de operare ale acestui dispozitiv, care se pot clasifica în funcție de poziția armăturii mobile a acestuia (așa cum se poate observa în figura 3.2), precum și de alimentarea cu energie electrică a bobinei de excitație din componența sa, după cum urmează:

- actuatorul este deschis și bobina acestuia nu este alimentată (poziția de repaus la întrefier maxim), în care dispozitivul este menținut în repaus, la întrefier maxim, fără consum de energie electrică;
- actuatorul este deschis și bobina acestuia este alimentată cu energie electrică în vederea închiderii (denumită în continuare manevră de anclanșare sau de închidere);
- actuatorul este închis și bobina de excitație nu este alimentată (poziția de repaus la întrefier minim), în care dispozitivul este menținut în repaus, la întrefier minim, fără consum de energie electrică;
- actuatorul este închis și bobina acestuia este alimentată cu energie electrică în vederea deschiderii (denumită în continuare manevră de declanșare sau deschidere).

3.2.2.2. Poziția de repaus la întrefier maxim

În poziția de repaus la întrefier maxim, resortul este precomprimat, iar acesta exercită o forță de stabilitate care garantează capacitatea actuatorului de a rămâne deschis, în cazul în care se aplică o forță accidentală în sensul închiderii acestuia. În poziție de repaus, când actuatorul electromagnet se află deschis, întrefierul are valoare maximă δ_{\max} [mm], iar comprimarea resortului este k [mm]. Resortul de deschidere exercită forța de precomprimare $\bar{F}_{\text{res},k}$ [N] asupra suprafeței S_1 , respectiv nu este comprimat suplimentar și se regăsește în poziția inițială în interiorul mecanismului, așa cum se poate observa în figura 3.2.

În această stare de funcționare, ecuația mecanică se poate scrie în modul următor:

$$\vec{G} + \vec{F}_{\text{res},k} + \vec{F}_{r_1} = 0 \quad (3.1)$$

unde \vec{G} este greutatea componentelor în mișcare, iar \vec{F}_{r_1} este forța de reacție, egală cu suma și de semn contrar a celorlalte două forțe, exercitată pe suprafața S_1 ; dacă se ține cont de sensul de exercitare al forțelor, ecuația precedentă devine:

$$G + F_{\text{res},k} - F_{r_1} = 0 \quad (3.2)$$

3.2.2.3. Manevra de anclanșare

În timpul manevrei de închidere (anclanșare) a actuatorului electromagnet, atât forța dezvoltată de acesta, cât și forța dezvoltată de resortul de deschidere crește. Pentru a putea finaliza manevra de închidere, respectiv de reducere a întrefierului dintre armătura mobilă și cea fixă, este

necesar ca actuatorul electromagnetic să producă o forță mai mare decât cea antagonistă, care se opune deplasării corpului în mișcare. Acest fapt se poate exprima matematic prin relația:

$$|\vec{F}_{\text{elmg}}| > |\vec{F}_{\text{res},k}| + |\vec{G}| \quad (3.3)$$

unde \vec{F}_{elmg} [N] este forța dezvoltată de actuator pentru un întrefier δ [mm], $\vec{F}_{\text{res},k}$ [N] este forța dezvoltată de resortul de deschidere, corespunzătoare întrefierului precizat anterior, iar \vec{G} este greutatea armăturii mobile, mărimi reprezentate în figura 3.2.

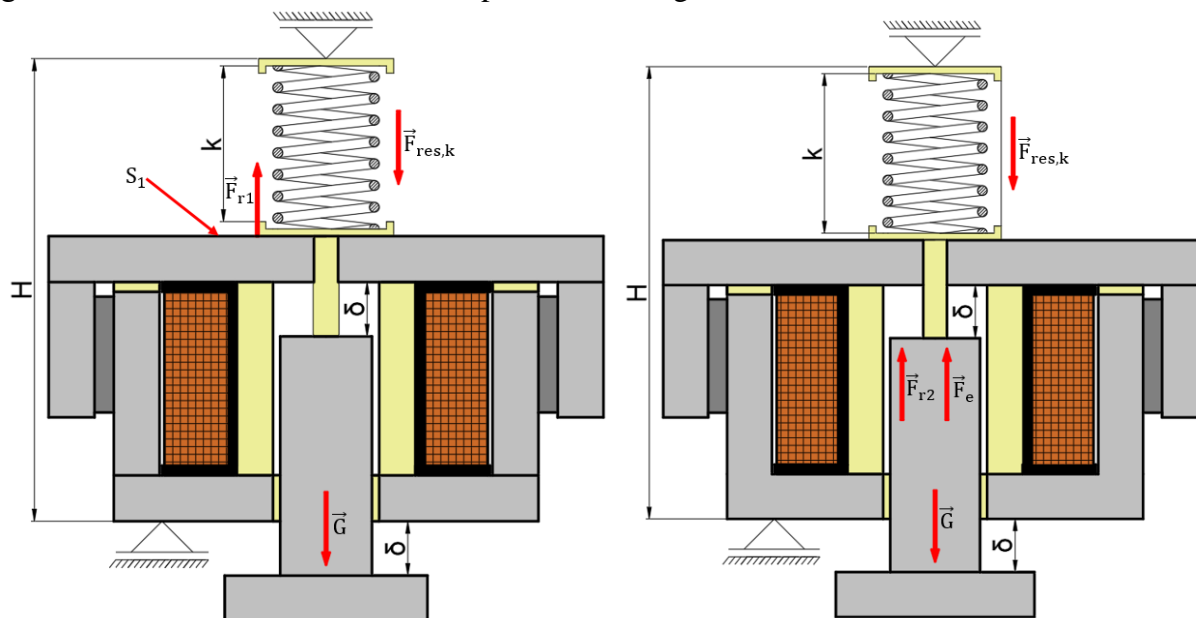


Fig. 3.2. Relativ la forțele dezvoltate în poziția de repaus (stânga) la întrefier maxim a actuatorului electromagnetic și în timpul manevrei de anclanșare (dreapta)

3.2.2.4. Poziția de repaus la întrefier minim

În timpul poziției de repaus la întrefier minim, după ce a fost efectuată manevra de anclanșare, pentru a putea menține în poziția de întrefier minim armătura mobilă, este necesar ca forța electromagnetică de menținere în poziția închis, produsă de magneții permanenți, să fie mai mare decât suma tuturor forțelor antagoniste, respectiv:

$$|\vec{F}_{\text{elmg}}| > |\vec{F}_{\text{res},k-\delta}| + |\vec{G}| \quad (3.4)$$

unde \vec{F}_{elmg} [N] este forța de natură electromagnetică dezvoltată de actuator în timpul în care acesta se află în poziție de repaus la întrefier minim și este datorată strict magneților permanenți aflați în componența acestuia, $\vec{F}_{\text{res},k-\delta}$ [N] este forța dezvoltată de resortul de deschidere în momentul în care acesta are alungirea $k - \delta$, respectiv se regăsește comprimat suplimentar de către dispozitiv, iar \vec{G} [N] este greutatea componentelor în mișcare, mărimi regăsite în figura 3.3.

3.2.2.5. Manevra de declanșare

În timpul manevrei de declanșare, actuatorul electromagnetic are inițial întrefier minim, iar bobina de excitație este alimentată astfel încât fluxul magnetic produs de aceasta să aibă sens contrar celui produs de magneții permanenți la circulația acestuia prin circuitul magnetic. În actuatorul electromagnetic există un câmp magnetic rezultat, datorat câmpului magnetic produs de bobină și

a celui produs de magnetii permanenți. Inducția magnetică are o valoare neglijabilă în întrefier, ceea ce conduce la o forță redusă dezvoltată de actuatorul electromagnetic, ce poate fi neglijată în bilanțul de forțe.

Având în vedere că forța de natură electromagnetică produsă de actuator este neglijabilă, forțele antagoniste menținerii în poziția închis a dispozitivului conduc la deschiderea acestuia, respectiv la depărtarea armăturii mobile față de cea fixă. Cele două forțe care conduc la deschiderea actuatorului electromagnetic sunt greutatea armăturii mobile \vec{G} și forța dezvoltată de resortul de deschidere $\vec{F}_{res,k-\delta}$, care are alungirea $k - \delta$ la începutul manevrei de declanșare, așa cum se poate observa în figura 3.3.

În ceea ce privește manevra de declanșare a actuatorului electromagnetic, din punct de vedere al ecuației mecanice, aceasta se poate scrie vectorial în modul următor:

$$\vec{G} + \vec{F}_{res,k-\delta} = \vec{F}_{r4} \quad (3.5)$$

unde \vec{F}_{r4} este forța rezultantă în decursul declanșării și este direct proporțională cu masa componentelor în mișcare și accelerația obținută de armătura mobilă în timpul acestei manevre.

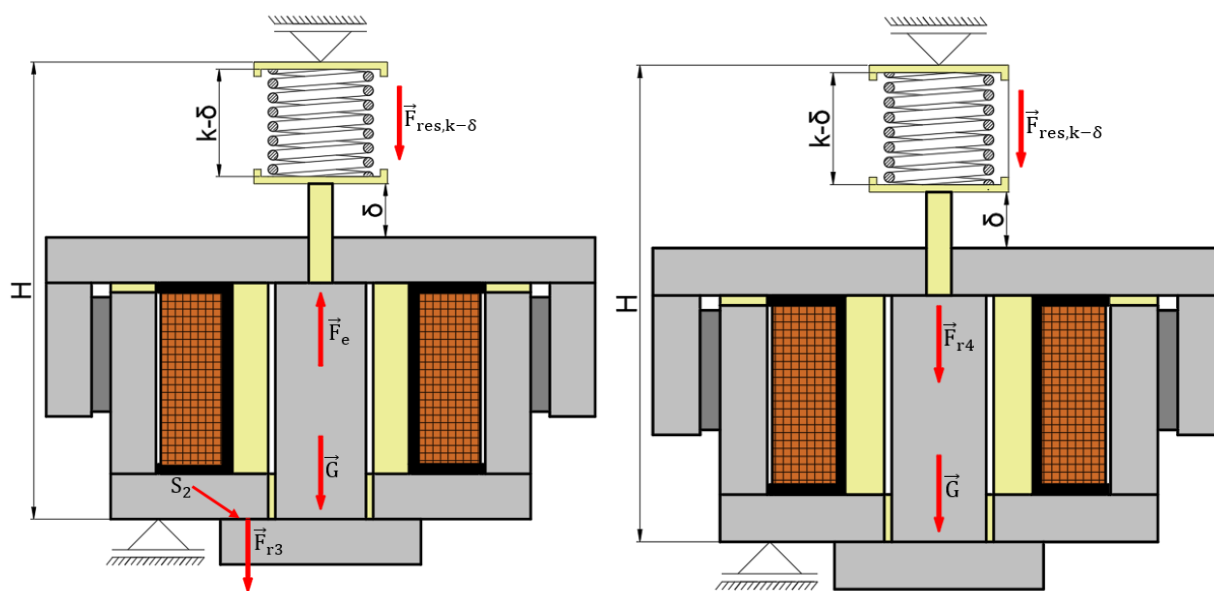


Fig. 3.3. Relativ la forțele dezvoltate în poziția de repaus la întrefier minim (stânga) a actuatorului electromagnetic și la manevra de declanșare (dreapta)

4. Dimensionarea analitică a subansamblelor actuatorului electromagnetic

Dimensionarea analitică a subansamblelor actuatorului electromagnetic presupune determinarea anumitor dimensiuni geometrice pentru fiecare componentă a acestuia, și totodată determinarea parametrilor de natură electromagnetică care se regăsesc în funcționarea dispozitivului.

Calculul principalelor dimensiuni ale actuatorului electromagnetic a pornit de la impunerea anumitor performanțe, cote și limite tehnice, printre care se enumeră următoarele:

- întrefierul maxim între armătura mobilă și cea fixă este $\delta_{\max} = 22 \text{ mm}$;
- forța dezvoltată de electromagnet la întrefier maxim este $F_{\delta_{\max}} = 4900 \text{ N}$;
- forța dezvoltată de electromagnet la întrefier minim este $F_{\delta_{\min}} = 7500 \text{ N}$;
- inducția maximă în tronsoanele circuitului feromagnetic nu depășește $B_{\max} = 1.6 \text{ T}$.

Pentru a putea dimensiona actuatorul electromagnetic astfel încât acesta să dezvolte forța impusă la anclanșare trebuie ținut cont de faptul că dispozitivul are două surse de câmp magnetic, respectiv bobina de excitație și magneții permanenți incluși în acesta.

Un model aproximativ de calcul al câmpului magnetic din actuator poate fi cel de circuit magnetic. Deoarece problema de câmp magnetic este complicată, în lucrare se acordă atenție deosebită determinării numerice a soluției câmpului electromagnetic, utilizând un program specializat, bazat pe metoda elementelor finite.

Având în vedere faptul că fluxul magnetic poate să parcurgă tronsoanele magnetice atât longitudinal, cât și transversal, este necesară modelarea reluctanțelor acestora în funcție de direcția de propagare a câmpului magnetic. Atât magneții permanenți, cât și bobina de excitație sunt modelați printr-o sursă de câmp magnetic, fiecare producând o anumită forță magnetomotoare, într-un mod asemănător fiind realizată simularea celor două surse de câmp magnetic în [10].

Pentru a putea analiza reluctanțele care se pot distinge în circuitul magnetic al actuatorului, acestea se pot modela în funcție de tronsonul de circuit, cât și în funcție de orientarea fluxului magnetic prin acestea [11].

Circuitul magnetic echivalent conține următoarele elemente componente:

- $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R'_1, R'_2, R'_3, R'_4, R'_5, R_6$ – reluctanțe în tronsonul feromagnetic superior;
- $R_7, R_{11}, R'_7, R'_{11}$ – reluctanțe în tronsoanele feromagnetice auxiliare;
- $R_9, R_{13}, R_{14}, R'_9, R'_{13}, R'_{14}$ – reluctanțe în tronsoanele feromagnetice laterale;
- $R_{15}, R_{17}, R_{18}, R_{21}, R'_{15}, R'_{17}, R'_{18}, R'_{21}$ – reluctanțe în tronsoanele feromagnetice inferioare;
- $R_{16}, R_{20}, R'_{20}, R_{23}$ – reluctanțe în coloana centrală;
- $R_{24}, R'_{24}, R_{25}, R_{26}, R'_{26}$ – reluctanțe în talpa polară;
- R_{12}, R'_{12} – reluctanțe în magneții permanenți;
- R_{10} – reluctanța întrefierului format de către coloana centrală și tronsonul feromagnetic superior (variabil în funcție de poziția circuitului feromagnetic mobil);
- R_{22}, R'_{22} – reluctanțele întrefierurilor formate de către talpa polară și tronsoanele feromagnetice inferioare (variabile în funcție de poziția circuitului feromagnetic mobil);

- R_8, R'_8 – reluctanța magnetică a întrefierului format de către tronsonul feromagnetic lateral și cel superior;
- R_{19}, R'_{19} – reluctanța magnetică a întrefierului format de către tronsonul feromagnetic inferior și coloana centrală;
- R_D, R'_D – reluctanța magnetică prin care dispersează fluxul produs de magnetii permanenți;
- $u_{mg,MP}$ – tensiunea magnetică produsă de un magnet permanent;
- $u_{mg,B}$ – tensiunea magnetică produsă de bobina de excitație.

Ținând cont de modelarea reluctanțelor din circuitul magnetic al actuatorului, se poate realiza schema echivalentă din figura 4.1, în care sunt incluse sursele de câmp magnetic.

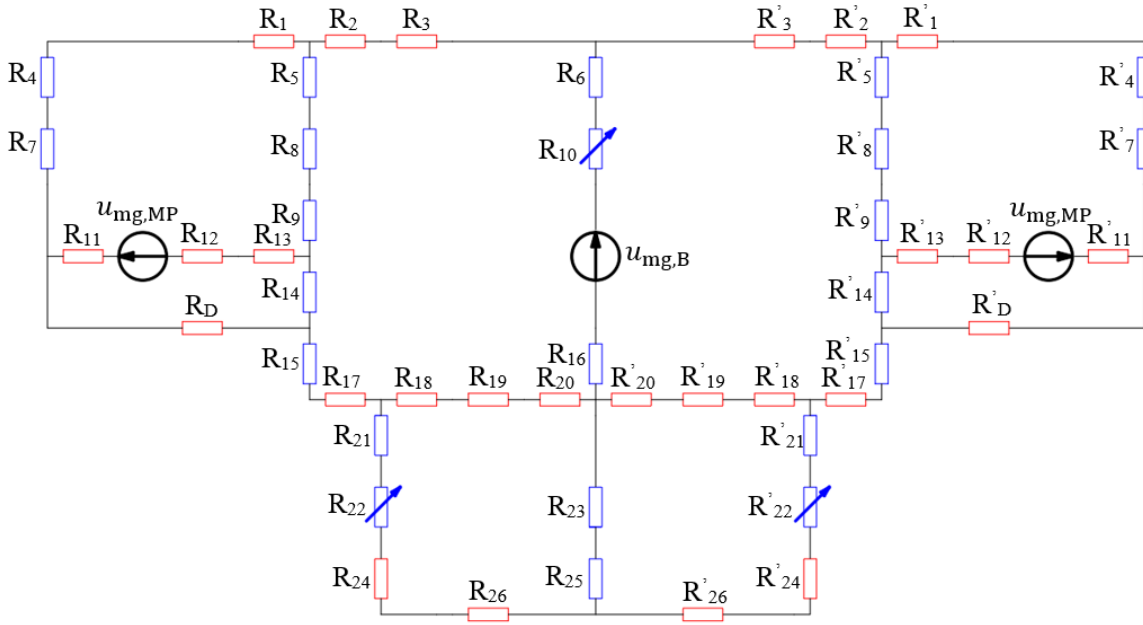


Fig. 4.1. Modelarea circuitului magnetic echivalent al actuatorului electromagnetic ținând cont de orientarea fluxului magnetic care parcurge tronsoanele feromagnetice

La întrefier maxim, se poate considera faptul că reluctanța echivalentă a circuitului magnetic este egală cu reluctanța întrefierurilor parcurse de fluxul magnetic, respectiv:

$$R_{ech} \approx R_{\text{întrefier}} \quad (4.1)$$

Neglijând câmpul magnetic de scăpări, fluxul magnetic prin întrefier la anclanșare, respectiv la întrefier maxim se poate aproxima prin relația următoare:

$$\varphi_{ancl} = \frac{\theta_{bobin\acute{a}}}{R_{\text{întrefier}}} = \frac{\theta_{bobin\acute{a}}}{\frac{L_{k,ech}}{\mu_0 A_{k,ech}}} = \frac{\mu_0 \theta_{bobin\acute{a}} A_{k,ech}}{L_{k,ech}} \quad (4.2)$$

unde $\theta_{bobin\acute{a}}[A]$ este solenația (forța magnetomotoare) produsă de bobină.

În acest sens, inducția magnetică în întrefier la anclanșare se poate aproxima cu ajutorul relației 4.3.

$$B_{\text{ancl}} = \frac{\varphi_{\text{ancl}}}{A_{k,\text{ech}}} = \frac{\mu_0 \theta_{\text{bobină}}}{L_{k,\text{ech}}} \quad (4.3) \quad [12]$$

unde B_{ancl} [T] este inducția magnetică în întrefierul principal în timpul manevrei de anclanșare, respectiv cel delimitat de coloana centrală și tronsonul feromagnetic, iar φ_{ancl} [Wb] este fluxul magnetic prin secțiunea acestuia. Forța se poate aproxima cu ajutorul următoarei formule:

$$F_{\delta_{\text{max}}} = \frac{B_{\text{ancl}}^2 A_c}{2\mu_0} = \frac{\varphi_{\text{ancl}}^2}{2\mu_0 A_c} \quad (4.4) \quad [12][13]$$

unde A_c reprezintă secțiunea întrefierului delimitat de coloana centrală și tronsonul feromagnetic superior. Ținând cont de expresia fluxului magnetic, forța dezvoltată la anclanșare se poate rescrie în modul următor:

$$F_{\delta_{\text{max}}} = \frac{\left(\frac{\mu_0 \theta_{\text{bobină}} A_{k,\text{ech}}}{L_{k,\text{ech}}}\right)^2}{2\mu_0 A_c} = \frac{\mu_0 A_{k,\text{ech}} \theta_{\text{bobină}}^2}{2L_k^2} \quad (4.5)$$

Din expresia (4.3), se poate determina solenația necesară pentru a produce inducția magnetică în întrefier la anclanșare:

$$\theta_{\text{bobină}} = \frac{B_{\text{ancl}} L_{k,\text{ech}}}{\mu_0} \quad (4.6)$$

Având în vedere faptul că lungimea echivalentă a întrefierului se consideră aproximativ egală cu 29 mm, iar inducția în întrefier să nu depășească valoarea la care începe să se satureze circuitul feromagnetic (respectiv, $B_{\text{ancl}} \cong 1.6$ T), solenația are următoarea valoare:

$$\theta_{\text{bobină}} = \frac{1.6 \cdot 0.029}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 36900 \text{ Asp} \quad (4.7)$$

Considerând o rezervă de solenație de 8-10%, solenația produsă de bobină este aproximativ $\theta_{\text{bobină}} = 40 \text{ kAsp}$.

Din relația (4.5), se poate determina secțiunea prin care circulă fluxul magnetic, știind celelalte mărimi mecanice și electromagnetice, respectiv:

$$A_{k,\text{ech}} = \frac{2L_k^2 F_{\delta_{\text{max}}}}{\mu_0 \theta_{\text{bobină}}^2} = \frac{2 \cdot 0.029^2 \cdot 4900}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 40000^2} = 4.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (4.8)$$

Din relația (4.2), se poate determina fluxul magnetic prin întrefier la anclanșare, respectiv:

$$\varphi_{\text{ancl}} = \frac{\mu_0 \theta_{\text{bobină}} A_{k,\text{ech}}}{L_{k,\text{ech}}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 40000 \cdot 4.1 \cdot 10^{-3}}{0.029} = 7.1 \text{ mWb} \quad (4.9)$$

Pentru a păstra un raport optim între dimensiunile geometrice generale ale dispozitivului, se consideră coloana centrală realizată din oțel masiv cu secțiunea 120 mm x 38 mm, iar restul

tronsoanelor circuitului feromagnetic sunt realizate din oțel masiv cu secțiunea 120 mm x 19 mm, unde dimensiunea de 120 mm reprezintă adâncimea actuatorului electromagnetic.

Având în vedere faptul că bobina trebuie să producă câmpul magnetic necesar funcționării actuatorului electromagnetic, principalul parametru de la care se pornește în proiectarea acesteia este solenația produsă astfel încât actuatorul să funcționeze la parametri nominali, respectiv $\theta = 40 \text{ kAsp}$. Dacă se pornește de la o densitate de curent preliminară în întreaga fereastră a bobinei $J_p = 25 \text{ A/mm}^2$, secțiunea prin întreaga fereastră a bobinei (inclusiv carcasa acesteia) este aproximativ $A_b = 1600 \text{ mm}^2$.

Dacă se consideră o rezervă de spațiu de 10%, înălțimea bobinajului este:

$$h_b = 0.9 \cdot (h_{\text{tronson,lateral}} + l_{\text{distanțor}}) - 2g \quad (4.10)$$

Ținând cont de faptul că înălțimea maximă a ferestrei în care poate fi introdusă bobina este de 80 mm, rezultă că înălțimea bobinajului este $h_b = 0.9 \cdot 80 - 2 \cdot 4 = 64 \text{ mm}$.

Ținând cont de faptul că se cunoaște întreaga fereastră a bobinei și că aceasta este egală cu produsul dintre înălțimea bobinajului și grosimea acestuia, rezultă că grosimea bobinajului este

$$g_b = \frac{A_b}{h_b} - g = \frac{1600}{64} - 4 = 25 \text{ mm} \quad (4.11)$$

Dacă se ține cont de o rezervă de 2 mm (pentru izolația de pe carcasă și izolaia finală a bobinei), grosimea reală a întregului bobinaj este $g_b = 27 \text{ mm}$.

Pentru a putea determina parametrii de natură electrică, este necesară determinarea lungimii spirei medii a bobinei, care este reprezentată în figura următoare:

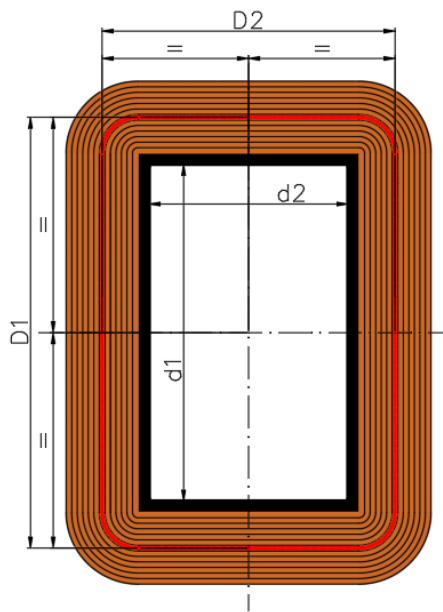


Fig. 4.2. Relativ la spira de lungime medie a bobinei actuatorului electromagnetic

Prin analiza figurii (4.2), se poate determina lungimea medie a unei spire, care depinde de dimensiunile coloanei centrale a armăturii fixe, de grosimea carcusei bobinei și de celelalte dimensiuni generale ale acesteia, respectiv:

$$l_{spmed} \cong 2 \cdot D1 + 2 \cdot D2 = 2(d1 + g_b + 2g) + 2(d2 + g_b + 2g) = 2 \cdot d1 + 2 \cdot d2 + 4g_b + 8g$$

$$\rightarrow l_{spmed} = 2 \cdot 122 + 2 \cdot 74 + 4 \cdot 27 + 8 \cdot 4 \rightarrow l_{spmed} \cong 532 \text{ mm} = 0.532 \text{ m} \quad (4.12)$$

Secțiunea conductorului se poate calcula ținând cont de relația:

$$S_{cond} = \frac{\pi d_{neiz}^2}{4} = \frac{\pi(d_{iz} - g_{iz})^2}{4} \quad (4.13)$$

unde d_{neiz} este diametrul conductorului de cupru fără izolație, g_{iz} este grosimea izolației, respectiv a stratului de email de pe acesta, iar $d_{iz} = d_{iz} + g_{iz}$ reprezintă diametrul conductorului cu izolație.

Rezistența bobinei se poate exprima în următorul mod:

$$R_b = \frac{4 \cdot \rho_{Cu} \cdot A_b \cdot l_{spmed}}{\pi(d_{iz} - g_{iz})^2 d_{iz}^2} \quad (4.14)$$

Din legea circuitului magnetic, se poate calcula curentul electric preliminar care circulă prin înfășurare, ținând cont de numărul de spire și solenația produsă de bobină:

$$I_b = \frac{\theta_{bobin\acute{a}} \cdot d_{iz}^2}{A_b} \quad (4.15)$$

Având în vedere că se cunosc atât curentul electric, cât și rezistența electrică a bobinei, se poate calcula tensiunea electrică de la bornele acesteia, utilizând relațiile (4.14) și (4.15):

$$U_b = R_b \cdot I_b = \frac{4 \cdot \rho_{Cu} \cdot A_b \cdot l_{spmed}}{\pi(d_{iz} - g_{iz})^2 d_{iz}^2} \cdot \frac{\theta_{bobin\acute{a}} \cdot d_{iz}^2}{A_b} \rightarrow U_b = \frac{4 \cdot \rho_{Cu} \cdot \theta_{bobin\acute{a}} \cdot l_{spmed}}{\pi \cdot (d_{iz} - g_{iz})^2} \quad (4.16)$$

Având în vedere că se cunoaște atât tensiunea electrică aplicată la bornele bobinei, cât și solenația produsă de aceasta, se poate determina diametrul conductorului:

$$d_{neiz} = d_{iz} - g_{iz} = \sqrt{\frac{4 \cdot \rho_{Cu} \cdot \theta_{bobin\acute{a}} \cdot l_{spmed}}{\pi \cdot U_b}} \quad (4.17)$$

Înlocuind cu valori numerice, se obține:

$$d_{neiz} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1.724 \cdot 10^{-8} \cdot 40 \cdot 10^3 \cdot 0.532}{\pi \cdot 230}} \rightarrow d_{neiz} = 14.25 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 1.425 \text{ mm} \quad (4.18)$$

Din tabelele standardizate, dacă se alege valoarea imediat superioară, respectiv $d_{neiz} = 1.5 \text{ mm}$, se poate identifica grosimea izolației de email $g_{iz} = 0.08 \text{ mm}$, precum și diametrul conductorului cu tot cu izolație, respectiv $d_{iz} = 1.58 \text{ mm}$. În acest caz, secțiunea conductorului este:

$$S_{\text{cond}} = \frac{\pi d_{\text{neiz}}^2}{4} = \frac{\pi(d_{\text{iz}} - g_{\text{iz}})^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1.5^2}{4} = 1.767 \text{ mm}^2 = 1.767 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (4.19)$$

Având în vedere că sunt cunoscute dimensiunile generale ale ferestrei bobinei, se poate determina numărul de spire al acesteia, ținând cont de diametrul conductorului izolat, cât și de așezarea spirelor. Numărul de spire pe strat se poate determina cu ajutorul expresiei:

$$N_{\text{spire/strat}} = \frac{h_b}{d_{\text{iz}}} = \frac{64}{1.58} \rightarrow N_{\text{spire/strat}} = 40 \text{ spire/strat} \quad (4.20)$$

Numărul total de straturi se poate determina în mod asemănător, ținând cont de diametrul conductorului izolat, cât și de așezarea spirelor:

$$N_{\text{straturi}} = \frac{g_b}{d_{\text{iz}}} = \frac{27}{1.58} \rightarrow N_{\text{straturi}} = 17 \text{ straturi} \quad (4.21)$$

Ținând cont de cele două mărimi determinate anterior, numărul total de spire se poate calcula cu ajutorul relației:

$$N_{\text{spire}} = N_{\text{spire/strat}} \cdot N_{\text{straturi}} = 40 \cdot 17 \rightarrow N_{\text{spire}} = 680 \text{ spire} \quad (4.22)$$

Rezistența electrică se poate calcula ținând cont de numărul de spire, lungimea spirei medii și secțiunea conductorului:

$$R_b = \frac{\rho \cdot N_{\text{spire}} \cdot l_{\text{spmed}}}{S_{\text{cond}}} = \frac{1.724 \cdot 10^{-8} \cdot 680 \cdot 0.532}{1.767 \cdot 10^{-6}} \rightarrow R_b = 3.53 \Omega \quad (4.23)$$

Curentul electric care circulă prin bobină se poate calcula ținând cont de tensiunea nominală aplicată la bornele acesteia, cât și de rezistența electrică:

$$I_b = \frac{U_b}{R_b} = \frac{230}{3.53} \rightarrow I_b = 65.16 \text{ A} \quad (4.24)$$

Solenația produsă de bobină la anclanșare se poate calcula ținând cont de numărul de spire și curentul prin bobină:

$$\theta_{\text{bobină}} = N \cdot I_b = 680 \cdot 65.16 \rightarrow \theta_{\text{bobină}} = 44300 \text{ Asp} \quad (4.25)$$

Valoarea obținută pentru solenație este cu aproximativ 10% mai mare decât cea rezultată prin calculul analitic în faza de dimensionare a circuitului magnetic și de determinare a parametrilor de natură electromagnetică, respectiv 40 kAsp. În orice caz, dacă se consideră o reducere de 10% a tensiunii la bornele bobinei (specific rețelelor electrice de joasă tensiune), solenația produsă este aproximativ egală cu cea impusă.

5. Modelarea numerică a actuatorului electromagnetic alimentat în curent

5.1. Considerente generale

Analiza modelului de actuator electromagnetic constă în studiul funcționării dispozitivului din punct de vedere al fenomenelor electromagnetice în cele două poziții de repaus și în timpul manevrelor de anclanșare și declanșare.

În mod evident, pentru a explica funcționarea actuatorului electromagnetic este necesară evidențierea influenței parametrilor de natură electromagnetică, precum și a celor cinetici.

În acest sens, pentru a studia influența dimensiunilor geometrice asupra parametrilor cinetici și a celor de natură electromagnetică, pentru actuator a fost implementat un model numeric 2D în programul de calcul de element finit FEMM [14]. Problema implementată este de tip plan – paralel, adâcimea modelului fiind de 120 mm, iar frecvența impusă în cadrul rezolvării modelului numeric este nulă. Astfel, se poate realiza analiza actuatorului electromagnetic ținând cont de un regim staționar al câmpului magnetic.

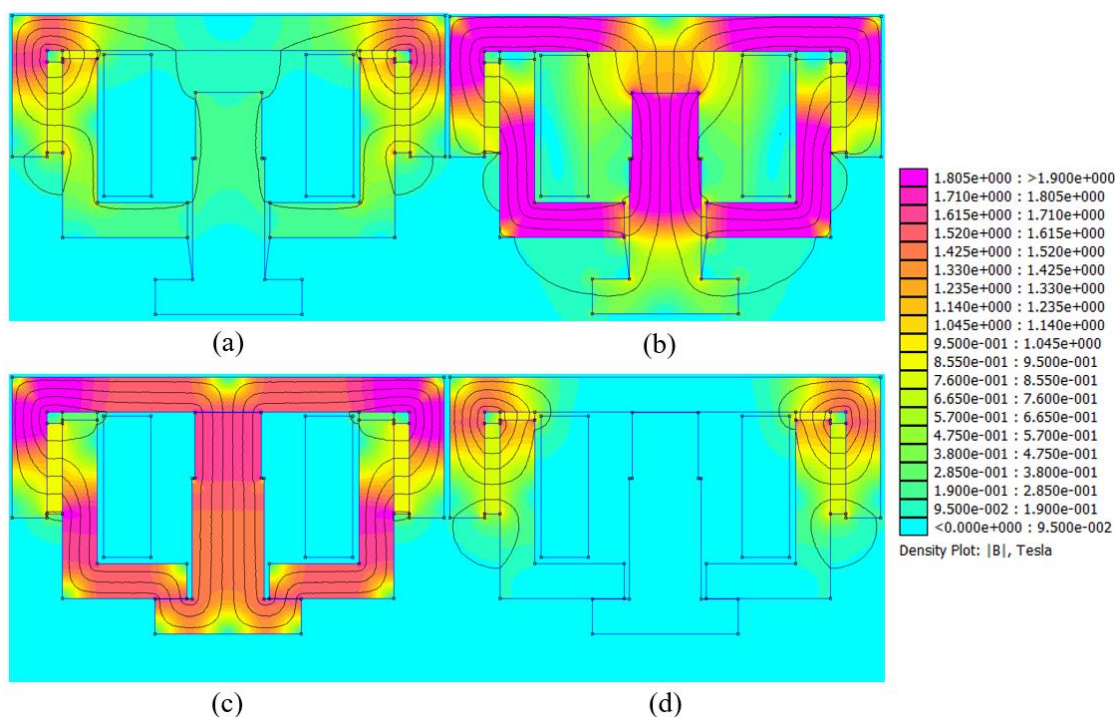


Fig. 5.1. Câmpul magnetic în interiorul circuitului magnetic al actuatorului în cele 4 stări de funcționare ale acestuia, respectiv în poziție de repaus la întrefier maxim (a), manevra de anclanșare (b), poziția de repaus la întrefier minim (c), și manevra de declanșare (d)

Așa cum se poate observa în figura precedentă, fluxul magnetic tinde să parcurgă toate reluctanțele circuitului feromagnetic, în funcție de poziția de funcționare. Pentru a explica influența parametrilor de natură geometrică și a celor de natură electromagnetică asupra forței dezvoltate de actuator, se pornește de la Teorema 2 a lui Kirchhoff pentru circuite magnetice.

Dirijarea câmpului magnetic se face prin intermediul circuitului feromagnetic fix, care are o geometrie ce permite circulația liniilor de câmp atât prin tronsoanele principale, cât și prin cele auxiliare.

De asemenea, trebuie evidențiat faptul că armătura mobilă conține în partea inferioară a acesteia talpa polară (13) (evidențiată în fig. 3.1), care are rolul de a dirija câmpul magnetic la întrefier minim. Forma geometrică a armăturii mobile permite ca fluxul magnetic să circule printr-o suprafață mai mare, spre deosebire de un electromagnet clasic, la care câmpul magnetic este dirijat strict prin coloana centrală.

Dacă la un electromagnet clasic forța dezvoltată la menținere este dependentă de suprafața întrefierului delimitată de coloana centrală (10) și tronsonul feromagnetic superior (3), precum și de fluxul magnetic din aceasta, în cazul actuatorului nou dezvoltat, circulația fluxului produs de magneții permanenți se face prin trei suprafețe distincte.

Majorarea suprafeței utile a armăturii mobile în acest mod se face cu un consum redus de material, iar gabaritul circuitului feromagnetic fix rămâne nemodificat, ceea ce constituie o noutate în construcția actuatorilor electromagnetice cu magneți permanenți.

5.2. Modelarea actuatorului electromagnetic în cele 4 stări de funcționare

5.2.1. Poziția de repaus la întrefier maxim

În timpul poziției de repaus la întrefier maxim, actuatorul este deschis și nealimentat. Bobina actuatorului electromagnetic nu este alimentată, motiv pentru care câmpul magnetic produs de aceasta este nul. Având în vedere faptul că actuatorul nu consumă energie electrică, se consideră că acesta se află în poziție de repaus.

În timpul acestei poziții, câmpul magnetic este produs strict de către magneții permanenți aflați pe circuitul feromagnetic fix, așa cum se poate observa în figura următoare:

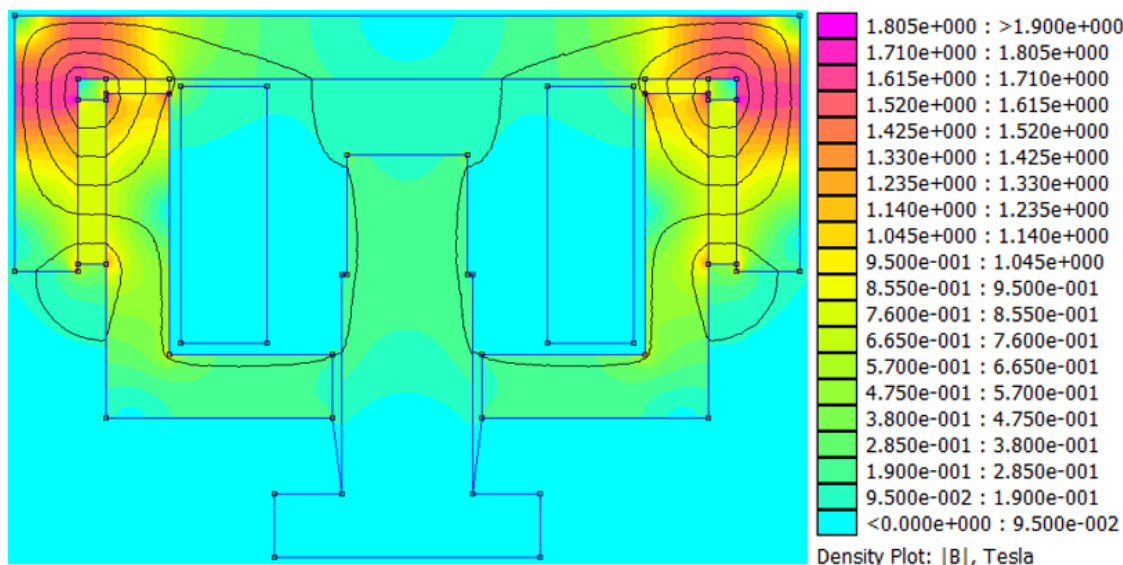


Fig. 5.2. Circulația câmpului magnetic în interiorul circuitului magnetic al actuatorului atunci când acesta se află în repaus în poziția deschis

În această poziție de funcționare, câmpul magnetic produs de magneții permanenți este dirijat astfel încât inducția magnetică în întrefierul util dintre armătura mobilă și cea fixă să aibă o valoare redusă (de ordinul mT) iar forța dezvoltată de actuator în această poziție să fie neglijabilă.

Pentru această poziție de funcționare, actuatorul produce o forță de natură electromagnetică de valoare redusă, ce depinde de valoarea inducției magnetice medie din întrefierul delimitat de armătura mobilă și cea fixă.

Resoartele de deschidere exercită o forță relativ redusă, respectiv cea de precomprimare, $F_{res,k}$, necesară pentru a menține distanța maximă între armătura fixă și cea mobilă.

5.2.2. Închiderea actuatorului electromagnetic

În timpul manevrei de anclanșare (închidere), actuatorul electromagnetic are întrefier variabil, pornind de la o valoare maximă a acestuia $\delta_{max} = 22$ mm până la întrefierul minim, respectiv cel tehnologic. Pentru a putea deplasa armătura mobilă, bobina de excitație este alimentată în vederea producerii unui câmp magnetic staționar, a cărui energie este dirijată prin intermediul circuitului magnetic fix, a celui mobil și auxiliar către întrefier, unde este produsă forța de natură electromagnetică necesară închiderii actuatorului la anumiți parametri cinematici.

În cadrul acestei manevre, câmpul magnetic care circulă prin bobina de excitație are același sens ca cel produs de magnetii permanenți, în ceea ce privește parcurgerea circuitului feromagnetic.

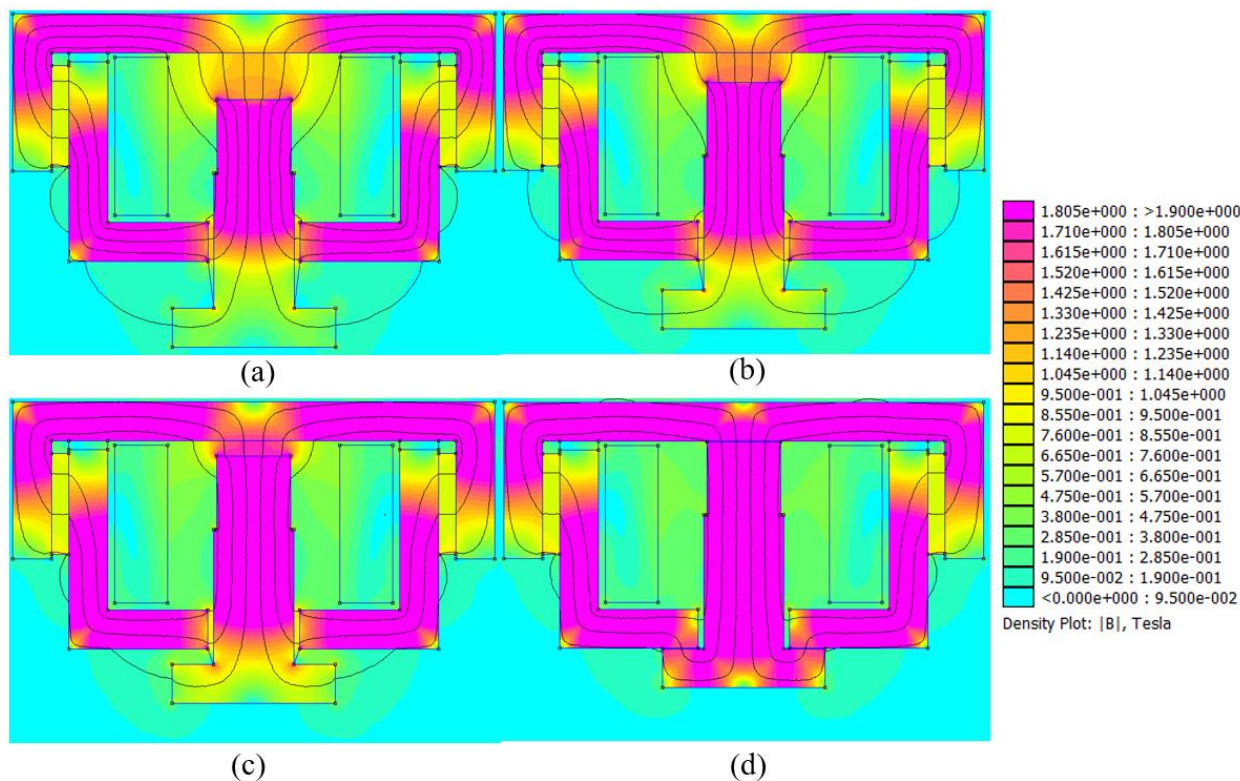


Fig. 5.3. Câmpul magnetic în interiorul circuitul feromagnetic al actuatorului și în întrefierul acestuia pentru diferite distanțe între armătura mobilă și cea fixă, respectiv 22 mm (a), 14 mm (b), 7 mm (c) și 0.1 mm (d)

Așa cum se poate observa în figura precedentă, în timpul manevrei de anclanșare, fluxul magnetic tinde să circule predominant prin întrefierul delimitat de coloana centrală a armăturii

mobile și placa superioară a circuitului feromagnetic fix, iar în zona delimitată de talpa polară și tronsoanele inferioare inducția magnetică are valori neglijabile.

În mod evident, odată cu majorarea inducției magnetice, se majorează și forța dezvoltată asupra armăturii mobile [15]. În acest sens, odată cu deplasarea corpului mobil, forța dezvoltată asupra acestuia crește, maximul fiind atins la întrefierul minim (respectiv, cel tehnologic).

Exercitarea forței de atracție dintre armătura mobilă și cea fixă conduce la reducerea întrefierului dintre acestea, fapt ce duce la micșorarea reluctanței magnetice. Pentru același curent în bobinele de excitație și aceeași tensiune magnetomotoare produsă de acestea, fluxul magnetic în interiorul circuitului magnetic crește, lucru care conduce la majorarea inducției magnetice în întrefier.

5.2.3. Poziția de repaus la întrefier minim

În timpul menținerii în poziția închis, actuatorul electromagnetic are întrefier minim, iar bobina de excitație nu este alimentată, ceea ce corespunde unei poziții de repaus, în care dispozitivul nu consumă energie electrică. În timpul acestei manevre, câmpul magnetic este produs strict de către magnetii permanenți aflați în circuitul feromagnetic fix.

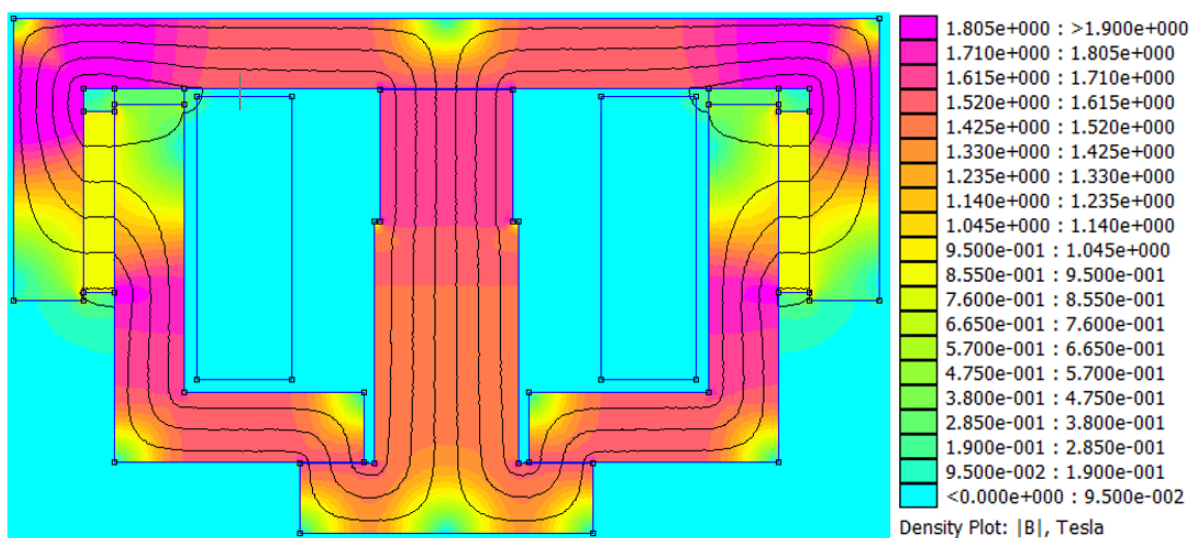


Fig. 5.4. Circulația câmpului magnetic în interiorul circuitului magnetic al actuatorului în timpul manevrei de menținere în poziția închis

Din punct de vedere al circulației câmpului magnetic, actuatorul electromagnetic prezintă o noutate față de celelalte dispozitive dezvoltate până în prezent. În acest sens, circuitele magnetice ale dispozitivelor deja dezvoltate prezintă un singur întrefier prin care circulă fluxul magnetic produs de magnetii permanenți atunci când electromagnetul este închis. Noua soluție constructivă majorează forța dezvoltată de actuator în poziția închis prin prezența a trei întrefieruri utile prin care circulă fluxul magnetic. Acest lucru este posibil prin modificarea formei constructive a armăturii mobile, astfel încât suprafața prin care circulă fluxul magnetic să fie majorată.

5.2.4. Deschiderea actuatorului electromagnetic

Deschiderea actuatorului electromagnetic se realizează sub acțiunea unor resoarte de compresiune, ulterior reducerii câmpului magnetic produs de magneții permanenți.

În timpul manevrei de declanșare, bobina de excitație se alimentează iar aceasta produce un câmp magnetic, care parcurge circuitul feromagnetic și întrefierul în sens opus celui produs de magneții permanenți. În acest sens, apare un câmp magnetic rezultat, care depinde la rândul său de câmpul magnetic produs de magneții permanenți și cel produs de bobina de excitație.

Câmpul magnetic rezultat în circuitul magnetic depinde de curentul produs de bobina de excitație, așa cum se poate observa în figura 5.5. Conform acestei figuri, se observă faptul că odată cu majorarea curentului din bobina de excitație în timpul manevrei de declanșare, câmpul magnetic în interiorul plonjorului și din întrefier scade. În mod evident, odată cu majorarea curentului din bobina de excitație, câmpul magnetic propriu produs de aceasta se majorează, iar pentru un anumit curent, acesta are o valoare apropiată de cel produs de magneții permanenți.

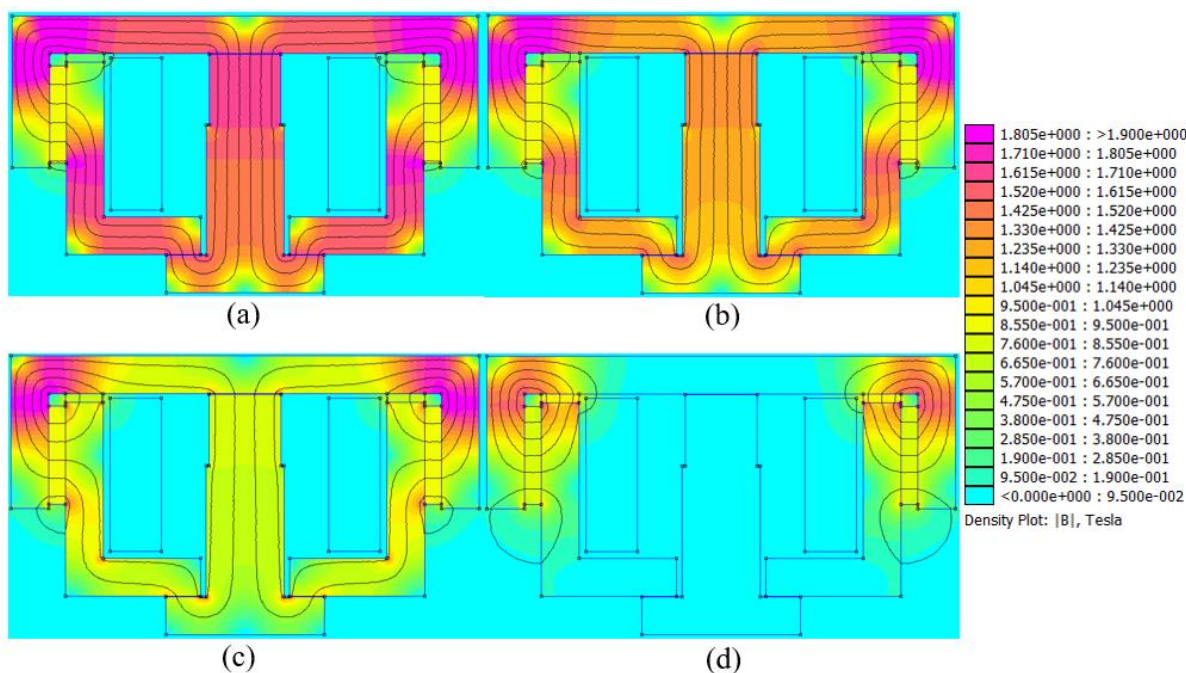


Fig. 5.5. Câmpul magnetic rezultat în circuitul feromagnetic pentru diferite solenații produse de bobina de excitație, respectiv 0 Asp (a), 1000 Asp (b), 2000 Asp (c) și 3040 Asp (d)

Având în vedere faptul că cele două câmpuri magnetice (respectiv, cel produs de bobină și cel produs de magneții permanenți) sunt aproximativ egale și parcurg reluctanțele în sens opus [16], câmpul magnetic rezultat este neglijabil prin tronsoanele feromagnetice principale. În acest caz, forța electromagnetică datorată câmpului magnetic rezultat are o valoare redusă, iar aceasta este mai mică decât suma forțelor antagoniste (respectiv, produse de resortul de deschidere și greutatea componentelor în mișcare), iar drept consecință, actuatorul se deschide.

6. Analiza cinematică a actuatorului electromagnet alimentat în curent

6.1. Analiza cinematică a actuatorului electromagnet fără sarcină mecanică la anclanșare

Analiza cinematică a actuatorului electromagnet fără sarcină mecanică presupune determinarea parametrilor cinetici de interes ai acestuia, în vederea stabilirii performanțelor dispozitivului la funcționarea acestuia în afara sistemului în care poate fi implementat.

În mod evident, analiza cinematică se poate realiza pentru manevrele în care actuatorul electromagnet consumă energie electrică și se produce un anumit lucru mecanic, respectiv atunci când armătura mobilă se deplasează în raport cu cea fixă.

Considerând actuatorul electromagnet necuplat la o sarcină mecanică (inclusiv resortul de deschidere) în timpul manevrei de anclanșare ecuația de mișcare se poate scrie în modul următor:

$$m \cdot \vec{a}_{\text{ancl}} + \vec{F}_{\text{elmg}} + \vec{G} = 0 \rightarrow m \cdot \vec{a}_{\text{ancl}} + \vec{F}_{\text{elmg}} + m\vec{g} = 0 \quad (6.1)$$

unde m [kg] este masa componentelor în mișcare, a_{ancl} [m/s²] este accelerația, iar F_{elmg} [N] este forța dezvoltată de actuatorul electromagnet la întrefierul δ ; dacă se ține cont de sensul de exercitare al forțelor, ecuația precedentă se poate scrie în modul următor:

$$m \cdot a_{\text{ancl}} = F_{\text{elmg},\delta} - m \cdot g = F_{r2} \quad (6.2)$$

unde F_{r2} este forța rezultantă în timpul manevrei de anclanșare și are același sens cu accelerația armăturii mobile.

De-a lungul cursei armăturii mobile, asupra acesteia se exercită forța rezultantă utilă F_{r2} , care conduce la o anumită energie cinetică înmagazinată de corpul în mișcare, respectiv:

$$E_c = \int_{\Gamma} \mathbf{F}_{r2} \cdot d\mathbf{l} = \int_{d_i}^{d_f} \mathbf{F}_{r2} \cdot d\mathbf{l} = \int_{d_i}^{d_f} (F_{\text{elmg}} - m \cdot g) d\mathbf{l} \quad (6.3)$$

unde E_c [J] este energia cinetică înmagazinată în armătura mobilă, Γ este traiectoria pe care se deplasează aceasta, d_i și d_f reprezintă capătul inițial și final al traiectoriei, iar $d\mathbf{l}$ este elementul de lungime al acesteia; F_e este forța de natură electromagnetică dezvoltată asupra armăturii mobile, m [kg] este masa acesteia, iar g [m/s²] este accelerația gravitațională.

Viteza armăturii mobile se poate determina ținând cont de expresia energiei cinetice, care depinde inclusiv de masa corpului în mișcare, respectiv:

$$E_c = \frac{m \cdot v_a^2}{2} \rightarrow v_a = \sqrt{\frac{2 \cdot E_c}{m}} \quad (6.4)$$

unde E_c [J] este energia cinetică acumulată de armătura mobilă, iar v_a [m/s] este viteza obținută de proiectil ca urmare a acumulării energiei cinetice E_c , vizibilă în figura 6.1.

$$v_a = \sqrt{\frac{2}{m}} \cdot \sqrt{E_c} = \sqrt{\frac{2}{m}} \cdot \sqrt{\int_{d_i}^{d_f} (F_{\text{elmg},\delta} - m \cdot g) d\mathbf{l}} \quad (6.5)$$

unde v_a [m/s] reprezintă viteza suplimentară obținută de armătura mobilă după ce a parcurs distanța dintre d_i și d_f și a acumulat energia cinetică E_c , iar m [kg] este masa corpului în mișcare. Considerând cele precizate anterior, caracteristicile vitezei obținute de armătura mobilă în funcție de distanța parcursă de aceasta (pentru diferite solenații produse de bobina de excitație) sunt prezentate în figura 6.2.

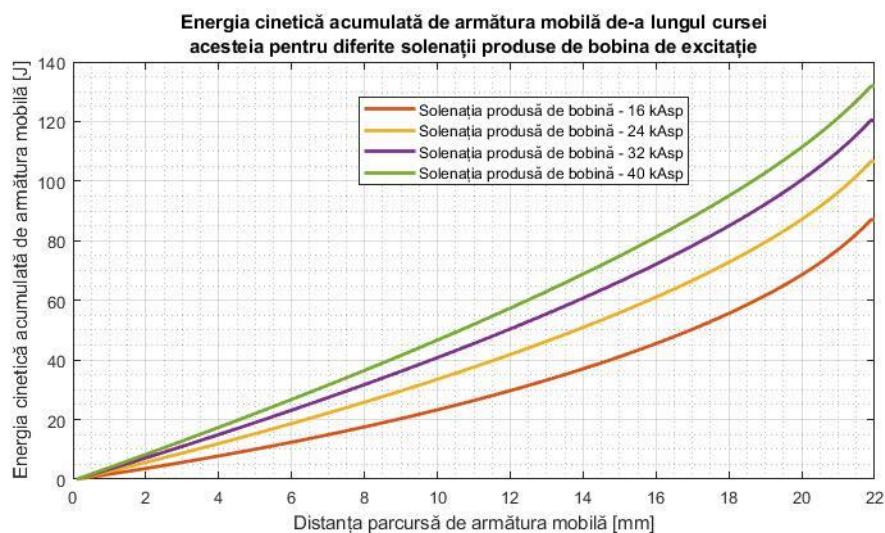


Fig. 6.1. Energia cinetică acumulată de armătura mobilă la anclanșare în decursul deplasării acesteia pentru diferite solenații produse de bobina de excitație (fără sarcină mecanică)

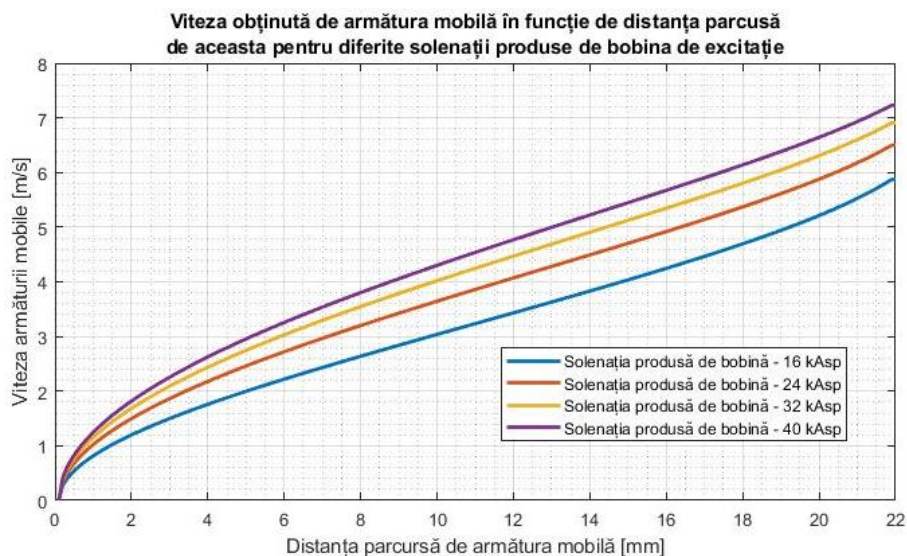


Fig. 6.2. Viteza obținută de armătura mobilă la anclanșare în funcție de distanța parcursă de aceasta pentru diferite solenații produse de bobina de excitație (fără sarcină mecanică)

6.2. Analiza cinematică a actuatorului electromagnetic cu sarcină mecanică

Analiza cinematică a actuatorului electromagnetic cu sarcină mecanică presupune determinarea parametrilor cinetici de interes ai acestuia, în vederea stabilirii performanțelor dispozitivului la funcționarea acestuia ca subansamblu al mecanismului în care este integrat. Având în vedere faptul că actuatorul electromagnetic utilizează un resort de compresiune, în vederea efectuării manevrei de declanșare, cât și mentru a mentine la întrefier maxim armătura mobilă față de cea fixă, este necesară determinarea influenței acestuia.

6.2.1. Analiza cinematică a actuatorului electromagnetic cu sarcină mecanică la anclanșare

Considerând actuatorul electromagnetic cuplat la sarcina mecanică, respectiv resortul de deschidere, ecuația mecanică la anclanșare se poate exprima în modul următor:

$$m \cdot \vec{a}_{\text{ancl}} + \vec{F}_{\text{elmg},\delta} + \vec{F}_{\text{res},k-\delta} + \vec{G} = 0 \rightarrow m \cdot \vec{a}_{\text{ancl}} + \vec{F}_{\text{elmg},\delta} + \vec{F}_{\text{res},k-\delta} + m\vec{g} = 0 \quad (6.6)$$

unde m [kg] este masa componentelor în mișcare, a_{ancl} [m/s²] este accelerația, iar $F_{\text{elmg},\delta}$ [N] este forța dezvoltată de actuatorul electromagnetic la întrefierul δ ; forța dezvoltată de resortul de deschidere la o anumită valoare a întrefierului depinde de alungirea acestuia (care este egală cu distanța parcursă de armătura mobilă) și de constanta de elasticitate, precum și de forța dezvoltată de resort la întrefier maxim:

$$F_{\text{res},k-\delta} = F_{\text{res},k} + (\delta_{\text{max}} - \delta) \cdot \tau \quad (6.7)$$

unde $F_{\text{res},k}$ [N] este forța dezvoltată de resort atunci când este precomprimat, δ_{max} [m] este întrefierul maxim dintre armătura fixă și cea mobilă, δ [m] este întrefierul la care resortul exercită forța $F_{\text{res},k-\delta}$ [N], iar τ [N/m] este constanta acestuia.

Așadar, se pot determina atât forța utilă și cea rezistentă, cât și forțele antagoniste care intervin în timpul manevrei de anclanșare, care se pot vedea în următoarea figură:

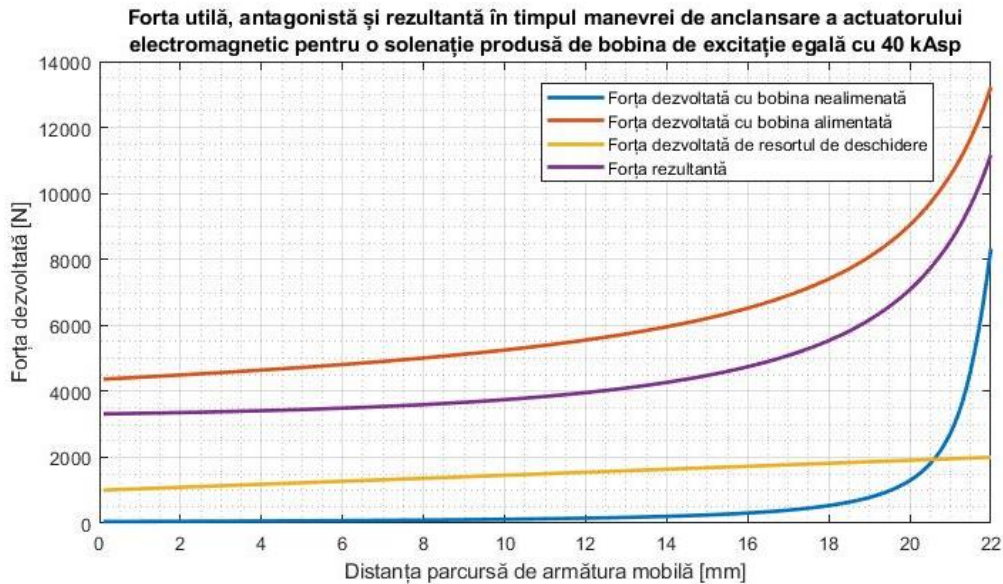


Fig. 6.3. Forțele care intervin în timpul manevrei de anclanșare

În ceea ce privește ecuația de mișcare, dacă se ține cont de sensul de exercitare al forțelor, ecuația (6.6) se poate scrie în modul următor:

$$m \cdot a_{\text{ancl}} = F_{\text{elmg},\delta} - m \cdot g - F_{\text{res},k-\delta} = F_{r2} \quad (6.8)$$

unde F_{r2} este forța rezultantă în timpul manevrei de anclanșare și are același sens cu accelerația armăturii mobile.

Ținând cont de toate forțele antagoniste, inclusiv cea produsă de resortul de deschidere, de-a lungul cursei armăturii mobile, asupra acesteia se exercită forța rezultantă utilă F_{r2} , care conduce la o anumită energie cinetică înmagazinată de corpul în mișcare, respectiv:

$$E_c = \int_{\Gamma} \mathbf{F}_{r2} \, d\mathbf{l} = \int_{d_i}^{d_f} \mathbf{F}_{r2} \, d\mathbf{l} = \int_{d_i}^{d_f} (\mathbf{F}_{elmg} - m \cdot \mathbf{g} - \mathbf{F}_{res,k} - (\delta_{max} - \delta) \cdot \boldsymbol{\tau}) \, d\mathbf{l} \quad (6.9)$$

unde E_c [J] este energia cinetică înmagazinată în armătura mobilă, Γ este traiectoria pe care se deplasează aceasta, d_i și d_f reprezintă capătul inițial și final al traiectoriei, iar $d\mathbf{l}$ este elementul de lungime al acesteia; F_{elmg} [N] este forța de natură electromagnetică dezvoltată asupra armăturii mobile, m_a [kg] este masa acesteia, iar g [m/s^2] este accelerația gravitațională.

Având în vedere faptul că se cunoaște forța de natură electromagnetică exercitată asupra armăturii mobile, precum și forțele antagoniste care se opun deplasării, se poate calcula energia cinetică înmagazinată de aceasta prin integrare numerică, utilizând programul Matlab:

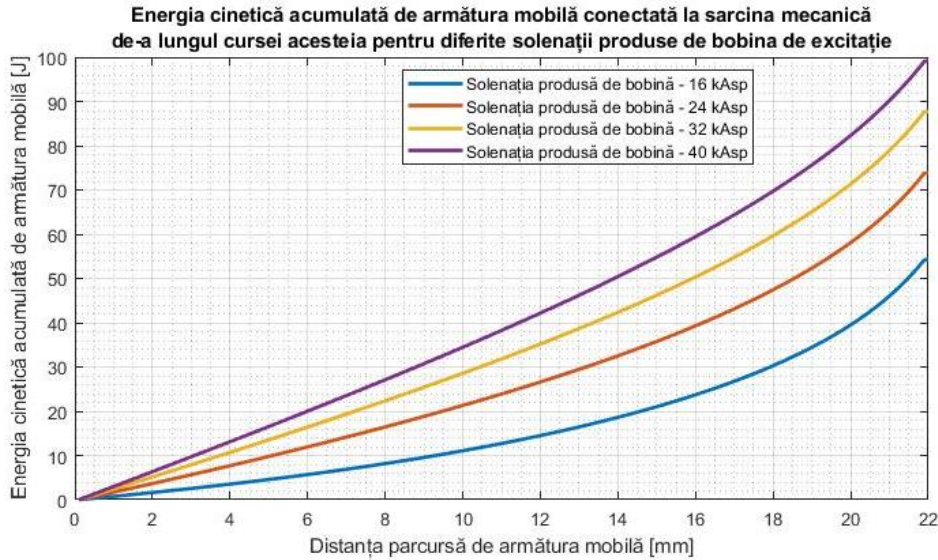


Fig. 6.4. Energia cinetică obținută de armătura mobilă la anclanșare în funcție de distanța parcursă de aceasta pentru diferite solenații produse de bobina de excitație (cu sarcină mecanică)

Având în vedere faptul că se cunoaște energia cinetică a armăturii mobile în fiecare poziție de-a lungul deplasării acesteia (spre cea fixă) precum și masa corpului, se poate determina viteza, respectiv:

$$v_a = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot E_c} = \sqrt{\frac{2}{m} \cdot \int_{d_i}^{d_f} (\mathbf{F}_{elmg,\delta} - m \cdot \mathbf{g} - \mathbf{F}_{res,k} - (\delta_{max} - \delta) \cdot \boldsymbol{\tau}) \, d\mathbf{l}} \quad (6.10)$$

unde v_a [m/s] reprezintă viteza suplimentară obținută de armătura mobilă după ce a parcurs distanța dintre d_i și d_f și a acumulat energia cinetică E_c [J], iar m [kg] este masa corpului în mișcare.

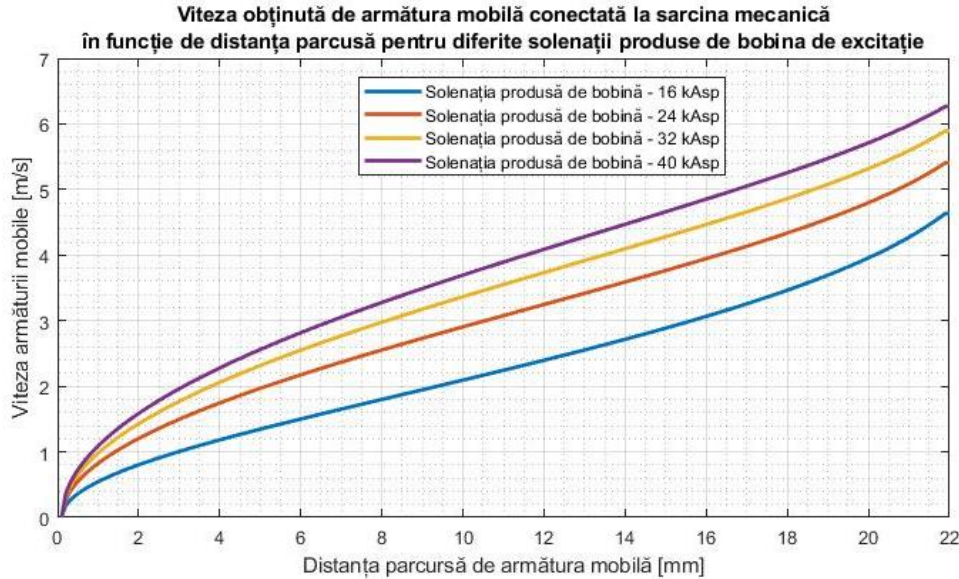


Fig. 6.5. Viteza obținută de armătura mobilă la anclanșare în funcție de distanța parcursă de aceasta pentru diferite solenații produse de bobina de excitație (cu sarcină mecanică)

Așa cum se poate observa în figura precedentă, viteza obținută de armătura mobilă are o variație monoton crescătoare, care la rândul său este datorată unei forțe rezultante pozitive și a unei energii cinetice de asemenea, crescătoare [17].

6.2.2. Analiza cinematică a actuatorului electromagnet cu sarcină mecanică la declanșare

Analiza cinematică a actuatorului electromagnet cu sarcină mecanică pentru manevra de declanșare presupune determinarea parametrilor cinematici de interes ai acestuia, în vederea stabilirii performanțelor dispozitivului relativ la procesul de deschidere, respectiv la readucerea armăturii mobile în poziția inițială.

Având în vedere faptul că se cunoaște solenația optimă produsă de bobină la care câmpul magnetic rezultat în actuatorul electromagnet are valori reduse în întrefierurile utile, se poate realiza alimentarea bobinei astfel încât forța de natură electromagnetică să fie neglijabilă pe durata manevrei.

În acest sens, singurele forțe antagoniste care intervin în procesul de deschidere al actuatorului electromagnet sunt forța dezvoltată de resort și greutatea armăturii mobile așa cum se poate observa în ecuația următoare:

$$F_{r4} = m \cdot a_{decl} = G + F_{res,k} \quad (6.11)$$

unde $F_{res,k}$ [N] este forța dezvoltată de resoartele de deschidere la începutul manevrei de declanșare, G [N] este greutatea armăturii mobile, a_{decl} [m/s²] este accelerația corpului în mișcare la declanșare, iar F_{r4} [N] este forța rezultantă în timpul acestei manevre.

Cele trei forțe care intervin în procesul de deschidere se pot observa în figura 6.6.

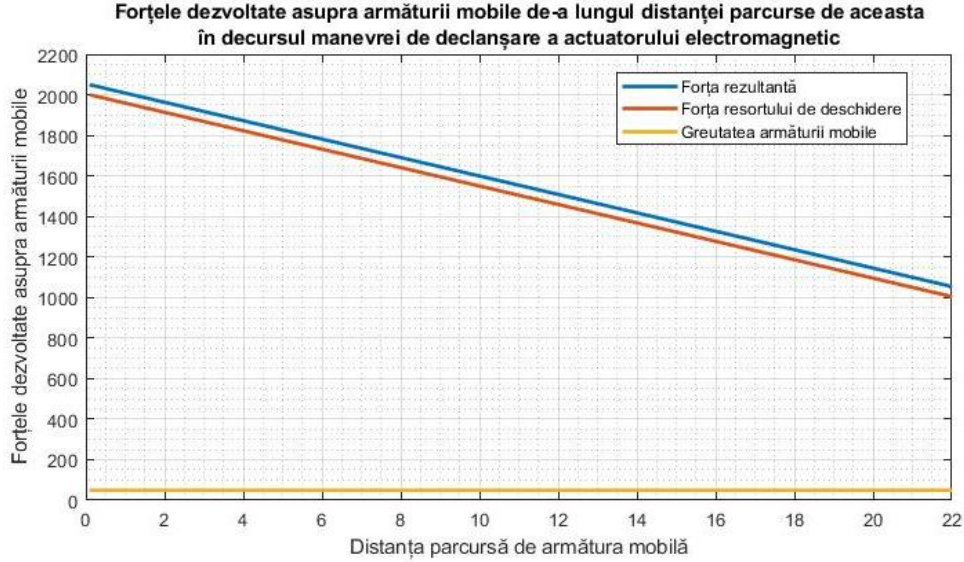


Fig. 6.6. Forțele dezvoltate asupra armăturii mobile în funcție de distanța parcursă de aceasta în decursul manevrei de declanșare a actuatorului electromagnetic

Totodată, având în vedere faptul că se cunoaște forța dezvoltată asupra armăturii mobile de-a lungul deplasării acesteia, se poate calcula energia cinetică înmagazinată de corpul în mișcare, conform relației 6.12, putându-se observa în figura 6.7.

$$E_c = \int_{\Gamma} \mathbf{F}_{r4} \, d\mathbf{l} = \int_{d_i}^{d_f} \mathbf{F}_{r4} \, d\mathbf{l} = \int_{d_i}^{d_f} (\mathbf{F}_{res,k} + \mathbf{G}) \, d\mathbf{l} \quad (6.12)$$

unde $E_c[J]$ este energia cinetică acumulată de armătura mobilă, Γ este traiectoria pe care se deplasează aceasta, d_i și d_f reprezintă capătul inițial și final al traiectoriei, iar $d\mathbf{l}$ este elementul de lungime al acesteia; $F_{res,k}[N]$ este forța dezvoltată de resort asupra armăturii mobile, iar $G[N]$ este greutatea corpului în mișcare.

Viteza armăturii mobile se poate determina ținând cont de expresia energiei cinetice, care depinde inclusiv de masa corpului în mișcare, respectiv:

$$E_c = \frac{m \cdot v_a^2}{2} \rightarrow v_a = \sqrt{\frac{2 \cdot E_c}{m}} \quad (6.13)$$

unde $E_c [J]$ este energia cinetică acumulată de armătura mobilă de-a lungul traiectoriei Γ , iar $v_a [m/s]$ este viteza suplimentară obținută de proiectil ca urmare a acumulării energiei cinetice E_c .

$$v_a = \sqrt{\frac{2}{m}} \cdot \sqrt{E_c} = \sqrt{\frac{2}{m}} \cdot \sqrt{\int_{d_i}^{d_f} (\mathbf{F}_{res,k} + \mathbf{G}) \, d\mathbf{l}} \quad (6.14)$$

unde v_a [m/s] reprezintă viteza suplimentară obținută de armătura mobilă după ce a parcurs distanța dintre d_i și d_f și a acumulat energia cinetică E_c [J], iar m [kg] este masa corpului în mișcare.

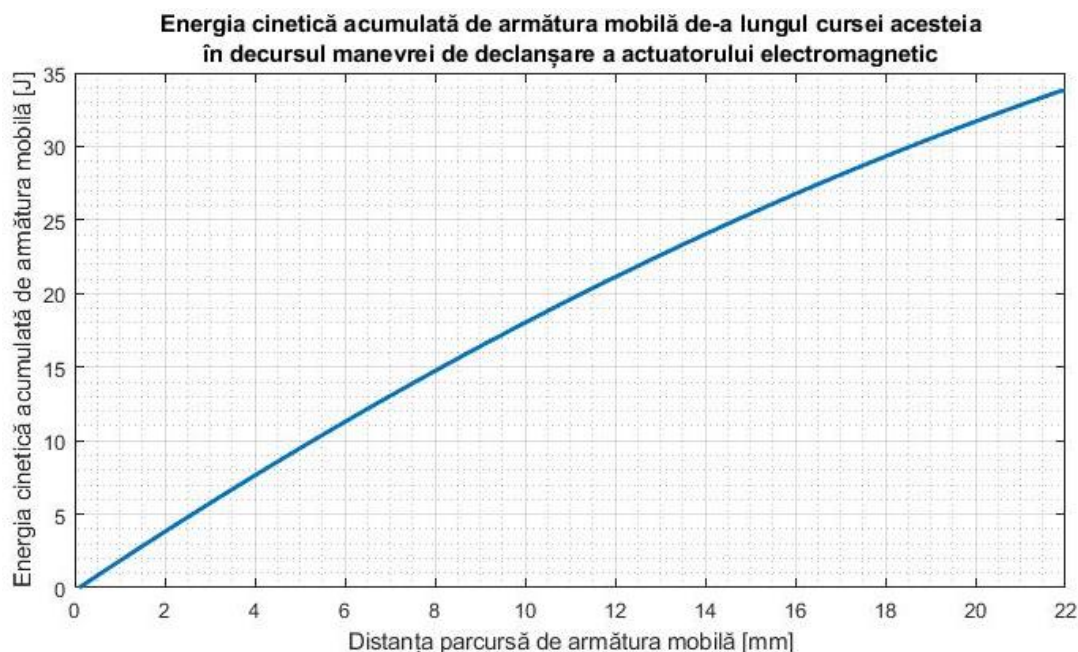


Fig. 6.7. Energia cinetică acumulată de armătura mobilă în funcție de distanța parcursă de aceasta în decursul manevrei de declanșare a actuatorului electromagnetic

Considerând cele precizate anterior, caracteristica vitezei obținute de armătura mobilă în funcție de distanța parcursă de aceasta este prezentată în figura următoare:

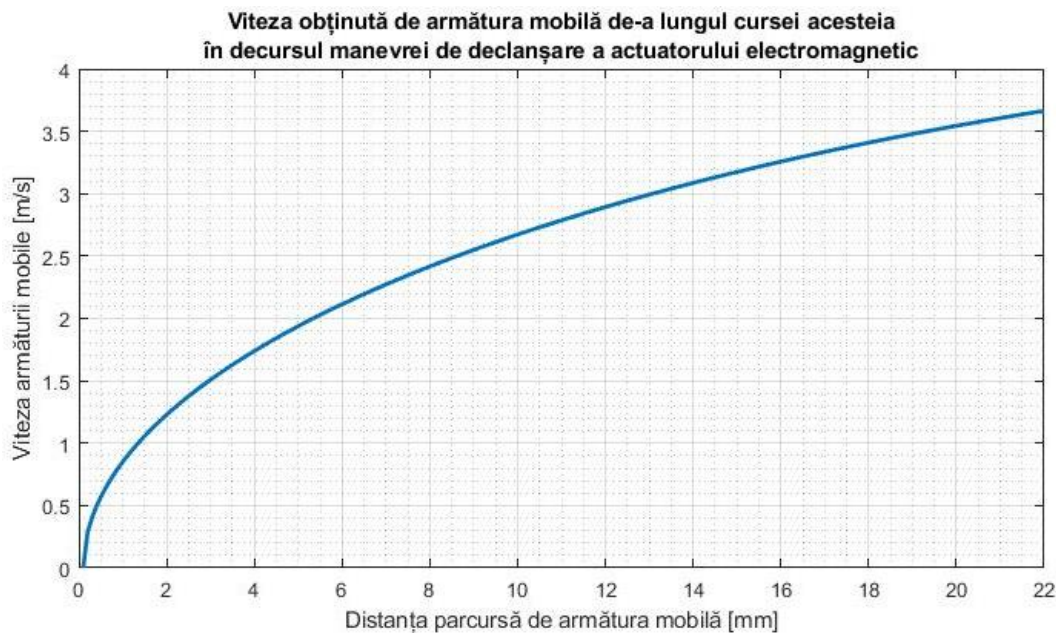


Fig. 6.8. Viteza obținută de armătura mobilă în funcție de distanța parcursă de aceasta în decursul manevrei de declanșare a actuatorului electromagnetic

7. Implementarea modelului experimental de actuator electromagnetic

7.1. Considerente generale relative la implementarea fizică a modelului experimental

În vederea validării soluției calculate analitic și modelată numeric cu ajutorul programului FEMM, este necesară implementarea unui model experimental, la scară 1:1, pentru a putea evalua performanțele electrice și cinematice ale acestuia.

În mod evident, pe lângă implementarea fizică a principalelor subansamble active, respectiv cele care produc și dirijează câmpul magnetic, a fost necesară realizarea componentelor auxiliare, respectiv elementele distanțoare, suportii interiori și percutorul.

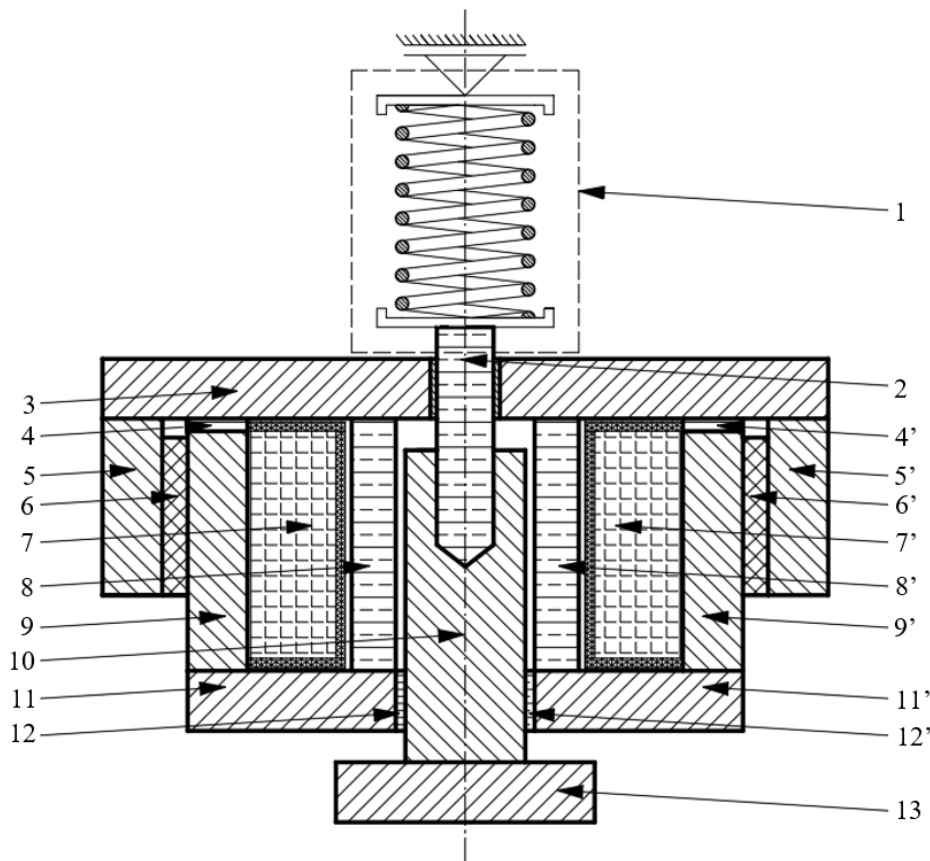


Fig. 7.1. Desenul tehnic de ansamblu (în secțiune) al actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți

În acest sens, în figura 7.1 este prezentat desenul tehnic de ansamblu al actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți, și de asemenea, mecanismul de deschidere al acestuia. Conform figurii 7.1, subansamblele principale ale actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți sunt următoarele:

- circuitul feromagnetic fix, care este realizat din tronsonul feromagnetic superior (3), cele două tronsoane feromagnetice laterale (9 și 9'), și cele două tronsoane feromagnetice inferioare (11 și 11'); tronsoanele feromagnetice laterale (9 și 9') sunt delimitate de tronsonul superior (3) prin intermediul celor două distanțoare superioare (4 și 4'), pentru a stabili întrefierul necesar conform

modelărilor numerice; de asemenea, pentru consolidarea mecanică este necesară utilizarea celor doi suportți interiori (8 și 8'), iar pentru deplasarea circuitului feromagnetic mobil, sunt necesare cele două distanțoare inferioare cu rol de ghidaj (12 și 12');

- circuitul feromagnetic mobil, care este realizat din perculatorul (2), care are rolul de a ghida subansamblul de-a lungul cursei acestuia, coloana centrală (10) și talpa polară (13).
- circuitul feromagnetic auxiliar, realizat din două tronsoane feromagnetice (5 și 5') și doi magneți permanenți (6 și 6');
- bobina de excitație, figurată prin ferestrele acesteia (7 și 7'), poziționată concentric cu coloana centrală (10), este fixată în poziție de elementele componente ale subansamblului circuit feromagnetic fix (respectiv, tronsoanele feromagnetice (3, 9, 9', 11, și 11' și suportții interiori 8 și 8').

7.2. Implementarea fizică a circuitului feromagnetic fix

În ceea ce privește implementarea fizică a circuitului feromagnetic fix, în figura 7.2 se poate observa desenul tehnic de ansamblu (în secțiune) al acestuia. Având în vedere faptul că în figura 7.1. s-a realizat notarea componentelor actuatorului electromagnetic, aceasta se va regăsi inclusiv în desenul tehnic al circuitului feromagnetic fix (notarea fiind făcută în paranteză):

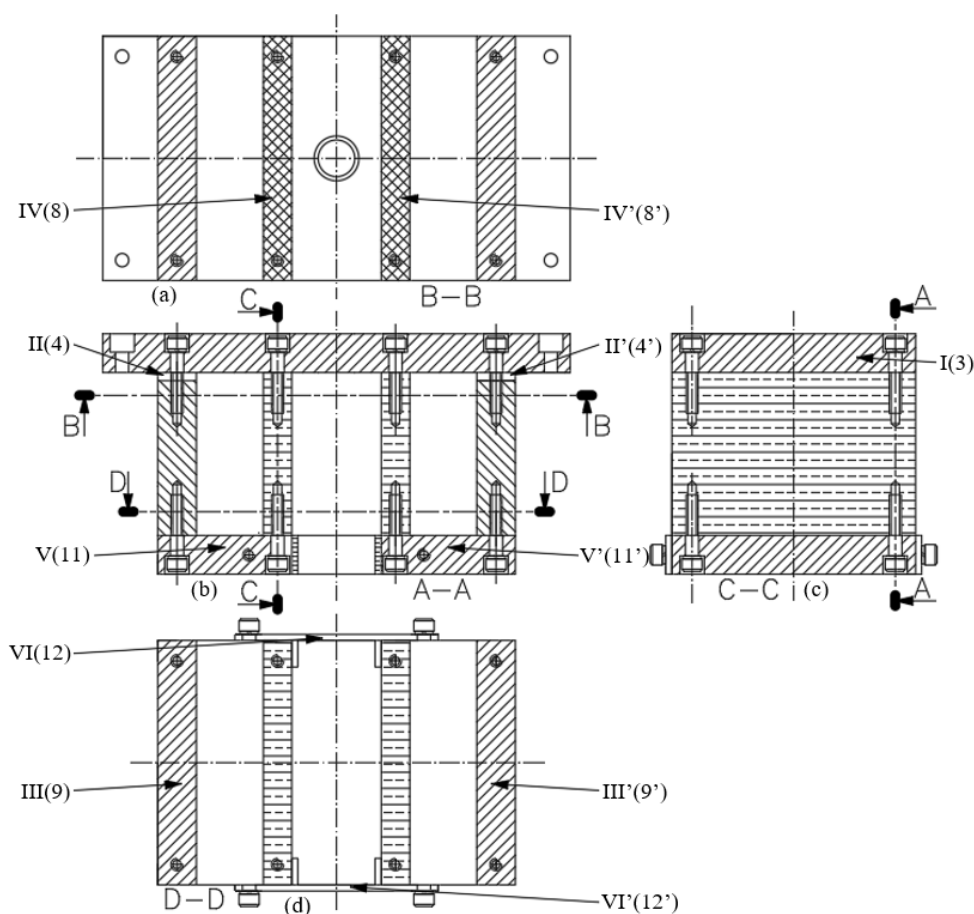


Fig. 7.2. Desenul tehnic de ansamblu (în secțiune) al circuitului feromagnetic fix;

În figura 7.2 (a), se poate observa secțiunea B – B prin tronsoanele feromagnetice laterale și suportii interiori cu vedere spre tronsonul feromagnetic superior, iar în fig. 7.3 (b), este reprezentată secțiunea A – A prin întreg circuitul feromagnetic fix, cu evidențierea găurilor de prindere și al organelor de asamblare; de asemenea, în figura 7.3(c) se poate observa secțiunea C – C prin tronsonul feromagnetic superior, suportii interiori și tronsoanele feromagnetice inferioare, cu evidențierea găurilor de prindere și al organelor de asamblare, iar în figura 7.3. (d) este reprezentată secțiunea D – D prin tronsoanele feromagnetice laterale și suportii interiori cu vedere spre tronsoanele feromagnetice inferioare;

7.3. Implementarea fizică a circuitului feromagnetic auxiliar

Circuitul feromagnetic auxiliar este format din două tronsoane feromagnetice laterale și doi magneți permanenți, ale căror desene tehnice se pot observa în figura următoare:

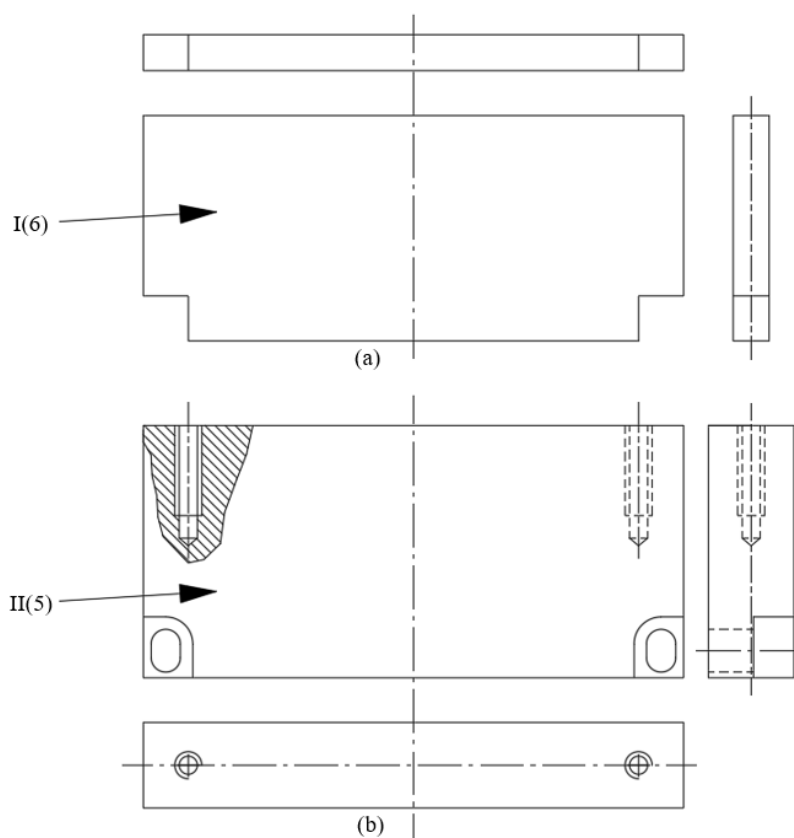


Fig. 7.3. Desenul tehnic de execuție al magnetului permanent (a) și al tronsonului feromagnetic lateral (b) din componența circuitului feromagnetic auxiliar

Circuitul feromagnetic auxiliar este format din 4 componente, toate fiind simetrice, două câte două, față de axa de simetrie a ansamblului, respectiv:

- I – magneții permanenți (regăsiți în figura 7.1 cu notația 6 și 6');
- II – tronsoanele feromagnetice auxiliare (regăsite în figura 7.1 cu notația 5 și 5').

7.4. Implementarea fizică a circuitului feromagnetic mobil

În ceea ce privește implementarea fizică a circuitului feromagnetic mobil, în figura 7.4, se poate observa desenul tehnic de ansamblu (în secțiune) al acestuia. Având în vedere faptul că în figura 7.1. s-a realizat notarea componentelor actuatorului electromagnetic, aceasta se va regăsi inclusiv în desenul tehnic al circuitului feromagnetic fix (notarea fiind făcută în paranteză):

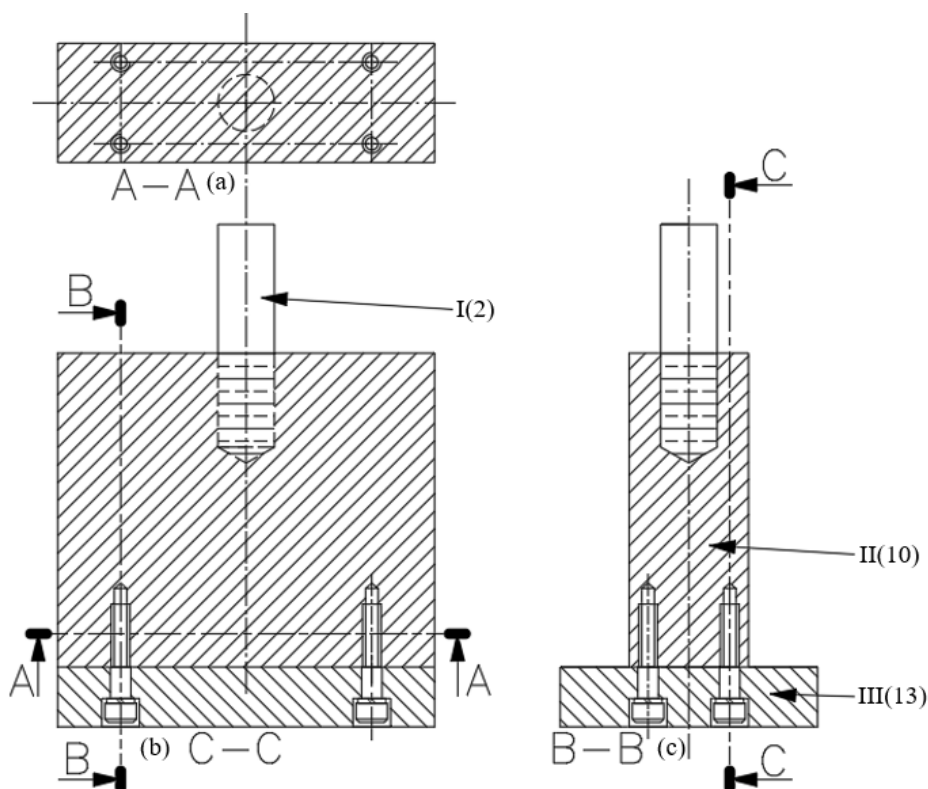


Fig. 7.4. Desenul tehnic de ansamblu (în secțiune) al circuitului feromagnetic mobil

În figura 7.4. (a) se poate observa secțiunea A – A prin coloana centrală cu vedere spre percutor (secțiune transversală), iar în figura 7.4. (b) este regăsită secțiunea C – C prin coloana centrală și talpa polară, cu evidențierea găurilor de prindere și al organelor de asamblare (secțiune longitudinală); de asemenea, în figura 7.3. (c) este reprezentată secțiunea B – B prin coloana centrală și talpa polară, cu evidențierea găurilor de prindere și al organelor de asamblare.

Conform figurii 7.4., circuitul feromagnetic mobil este realizat din 3 componente, respectiv:

- I – percutorul (regăsit în figura 7.1 cu notația 2);
- II – coloana centrală (regăsită în figura 7.1 cu notația 10);
- III – talpa polară (regăsite în figura 7.1 cu notația 13);

7.5. Implementarea fizică a bobinei de excitație

Bobina de excitație este formată din două componente distincte, respectiv carcasa electroizolantă și înfășurarea. Având în vedere faptul că actuatorul electromagnetic funcționează la tensiuni relativ reduse și nu există solicitări dielectrice semnificative, carcasa electroizolantă este realizată din stratitex cu grosimea de 4 mm, așa cum se poate observa în figura 7.5.

Înfășurarea existentă pe carcasa electroizolantă este realizată din conductor de cupru emailat cu diametrul $\Phi 1.5$ mm (cu izolație $\Phi 1.58$ mm) și are un număr de 680 de spire. Acestea sunt dispuse pe 17 straturi, ceea ce conduce la un număr de 40 spire/strat. Rezistența electrică măsurată în curent continuu este egală cu 3.6Ω , valoare aproximativ egală cu cea rezultată în urma calculelor ($R_{calculat} = 3.53 \Omega$).

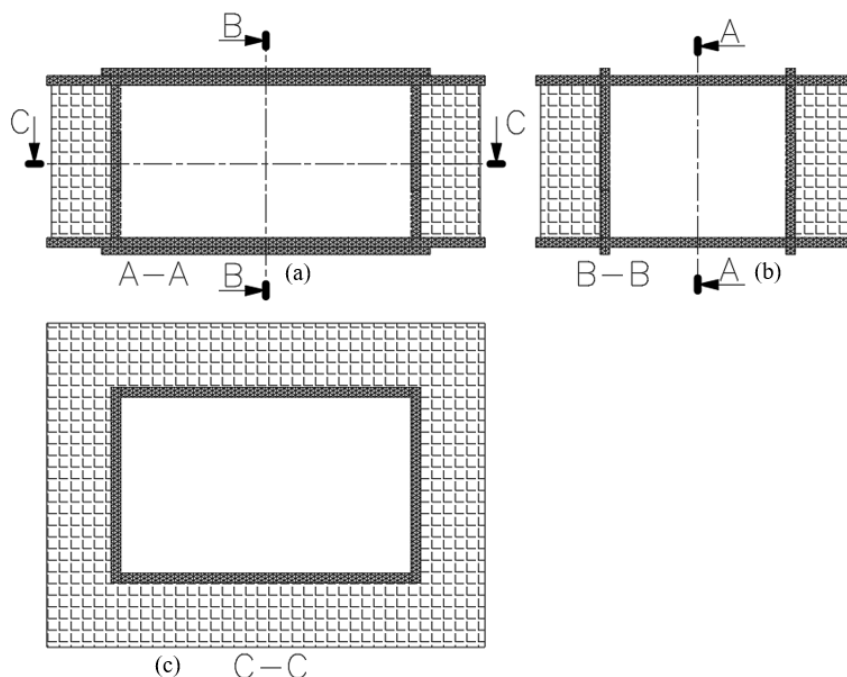


Fig. 7.5. Desenul tehnic de execuție al bobinei de excitație a actuatorului electromagnetic

În figura 7.5. (a) se poate observa secțiunea (longitudinală) A – A prin bobina de excitație a actuatorului electromagnetic, (cu vedere spre zona laterală a acesteia, respectiv spre tronsoanele feromagnetice laterale și circuitul feromagnetic auxiliar al actuatorului), iar în figura 7.5. (b) este regăsită secțiunea B – B prin aceasta. De asemenea, în figura 7.5. (c) este regăsită secțiunea C – C a bobinei de excitație a actuatorului electromagnetic, cu vedere spre zona inferioară a acesteia, respectiv spre tronsoanele feromagnetice inferioare.

7.6. Modelul experimental al actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți

În urma execuției desenelor tehnice prezentate anterior și a montării acestora cu diferite organe de asamblare, rezultă subansamblele principale ale actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți, așa cum se poate observa în figura 7.6. Așa cum se poate observa în figura 7.6, execuția tuturor celor 20 de componente ale căror desene tehnice au fost prezentate anterior în acest capitol, conduce la realizarea întregului ansamblu actuator electromagnetic cu magneți permanenți, numerotarea fiind realizată conform figurii 7.1. Circuitul feromagnetic mobil (fig. 7.6. (a)) este realizat din perculatorul 2, coloana centrală 10 și talpa polară 13. Circuitul feromagnetic fix (fig. 7.6. (b)) este realizat din tronsonul feromagnetic superior 3, distanțoarele superioare 4 și 4', suportii interiori 8 și 8', tronsoanele feromagnetice laterale 9 și 9', cele inferioare 11 și 11', precum și distanțoarele inferioare 12 și 12'.

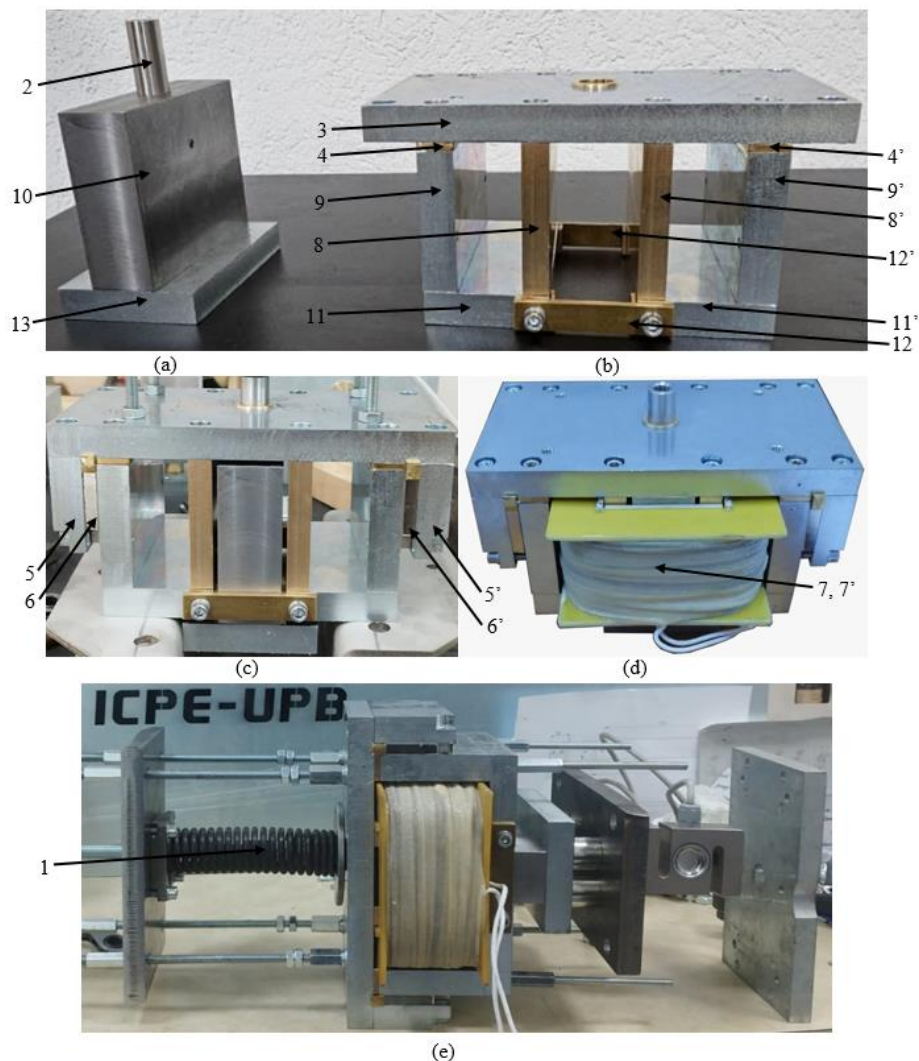


Fig. 7.6. Implementarea experimentală a modelului de actuator electromagnetic cu magneți permanenți; (a) – circuitul feromagnetic mobil; (b) circuitul feromagnetic fix; (c) – circuitele feromagnetice asamblate; (d) – ansamblul actuator electromagnetic cu magneți permanenți, fără mecanism de deschidere; (e) – ansamblul actuator electromagnetic cu magneți permanenți, cu mecanism de deschidere

Circuitul feromagnetic auxiliar se poate observa în figura 7.6 (c), acesta fiind realizat din tronsoanele feromagnetice auxiliare 5 și 5', precum și magneții 6 și 6'. Cele 4 componente ale circuitului feromagnetic auxiliar sunt montate pe cel fix, iar în cel din urmă este introdus circuitul feromagnetic mobil, rezultând structura prezentată în fig. 7.6 (c). Bobina de excitație (indicată în figura precedentă prin 7 și 7') a actuatorului electromagnetic se poate regăsi în figura 7.6 (d). Nu în ultimul rând, mecanismul de deschidere al actuatorului electromagnetic (1) este regăsit în figura 7.6 (e), suportii resortului fiind solidari mecanic cu percutorul (2) și cu reazemul fix (în cazul modelului experimental, o placă de oțel solidară cu circuitul feromagnetic al dispozitivului).

8. Implementarea sursei de energie a actuatorului electromagnetic cu magneti permanenți

8.1. Considerente generale

În analiza performanțelor actuatorului propus în această lucrare se admite că bobina de excitație este alimentată la curent impus (constant în timp). Evident, din punct de vedere tehnic sursa de alimentare ar trebui să producă o tensiune foarte mare pentru a produce treapta de curent. Alegerea curentului constant pentru bobina de excitație permite însă dezvoltarea analizei din lucrare și la alte forme ale curentului de excitație (cu restricția realizării unui regim staționar). De exemplu, pentru analiza alimentării la tensiune constantă, se poate adopta procedura iterativă, iar excitația în curent se corectează până la atingerea tensiunii de la borne. Astfel această direcție de cercetare poate fi o provocare pentru elaborarea unor noi lucrări.

Pentru a putea alimenta bobina actuatorului electromagnetic cu un curent constant, așa cum s-a realizat în cadrul modelărilor numerice, ar fi necesară utilizarea unui redresor de putere, alimentat de la o sursă de tensiune alternativă care să asigure o putere mare, ceea ce conduce la un gabarit foarte ridicat al întregii instalații.

În acest sens, bobina actuatorului electromagnetic consumă o putere electrică ridicată, generată de sursa de energie. Totuși, un avantaj îl constituie faptul că sursa de energie trebuie să fie capabilă să producă această putere pe o durată redusă de timp (în timpul manevrei de anclanșare), respectiv pe perioada în care armătura mobilă trece din poziția de repaus inferioară în poziția de repaus superioară.

Considerând cele precizate anterior, a fost găsită ca soluție pentru implementarea unei surse de energie de putere ridicată o baterie de condensatoare electrolitice [18], al cărui principiu de funcționare este descris în subcapitolele următoare.

8.2. Motivarea alegerii sursei de energie a actuatorului electromagnetic

Pentru a putea fi utilizat astfel încât să se atingă performanțele impuse, actuatorul electromagnetic trebuie echipat cu o sursă de energie corespunzătoare. Alegerea unei baterii de condensatoare ca soluție tehnologică optimă are următoarele avantaje:

- sursa de energie formată din condensatoare electrolitice poate fi încărcată de la orice sursă de tensiune alternativă, indiferent de puterea acesteia, deoarece aceasta are inclusă un autotransformator, cât și rezistențe de limitare a curentului la încărcare;
- amplitudinea curentului din bobina de excitație a actuatorului electromagnetic poate fi ușor modificată prin tensiunea de încărcare a condensatoarelor; la rândul său, tensiunea electrică la bornele bateriei este limitată numai de numărul de condensatoare electrice înseriate;

8.3. Componentele principale ale sursei de energie a actuatorului electromagnetic

Pentru a putea studia comportamentul în regim dinamic al actuatorului electromagnetic, s-a implementat modelul experimental al sursei de energie, care include 16 condensatoare. Cele 16 condensatoare sunt grupate în 4 module, iar fiecare modul are 4 condensatoare puse în paralel, așa cum se poate observa în figura următoare:



Fig. 8.1. Modulele de condensatoare ale sursei de energie ale actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți

Fiecare condensator din sursa de energie are o capacitate $C_{ind} = 8200 \mu F$, și o tensiune maximă de încărcare la bornele acestuia de 450 Vcc. Așa cum a fost precizat anterior, fiecare modul are 4 condensatoare puse în paralel, iar întreaga sursă are 4 module.

Așa cum s-a precizat anterior, sursa de energie se poate încărca de la o sursă de tensiune alternativă. Având în vedere faptul că cea mai răspândită tensiune alternativă pentru instalațiile electrice de joasă tensiune monofazate este cea de 230 Vca, sursa de tensiune a fost proiectată astfel încât să fie alimentată la această valoare, conform schemei electrice din figura 8.2.

Schema electrică a sursei de energie cuprinde câte un circuit auxiliar pentru încărcarea și descărcarea controlată a fiecărui modul de condensatoare; aceasta conține următoarele elemente:

- întreruptorul general Q_{gen} ;
- autotransformatorul ATR (230 V / 0...250 V);
- întreruptoarele locale Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 ;
- transformatoarele T_1, T_2, T_3, T_4 (220 V / 285 V);
- punțile redresoare monofazate PR1, PR2, PR3, PR4;
- rezistențele de limitare la încărcare $R_{L1}, R_{L2}, R_{L3}, R_{L4}$;
- rezistențele de descărcare $R_{D1}, R_{D2}, R_{D3}, R_{D4}$;
- modulele de condensatoare polarizate M_1, M_2, M_3, M_4 ;
- diodele de regim liber DRL1, DRL2, DRL3, DRL4 [19];
- contactorul K_1 ;
- întreruptoarele $Q_{d1}, Q_{d2}, Q_{d3}, Q_{d4}$;
- întreruptorul Q_K .

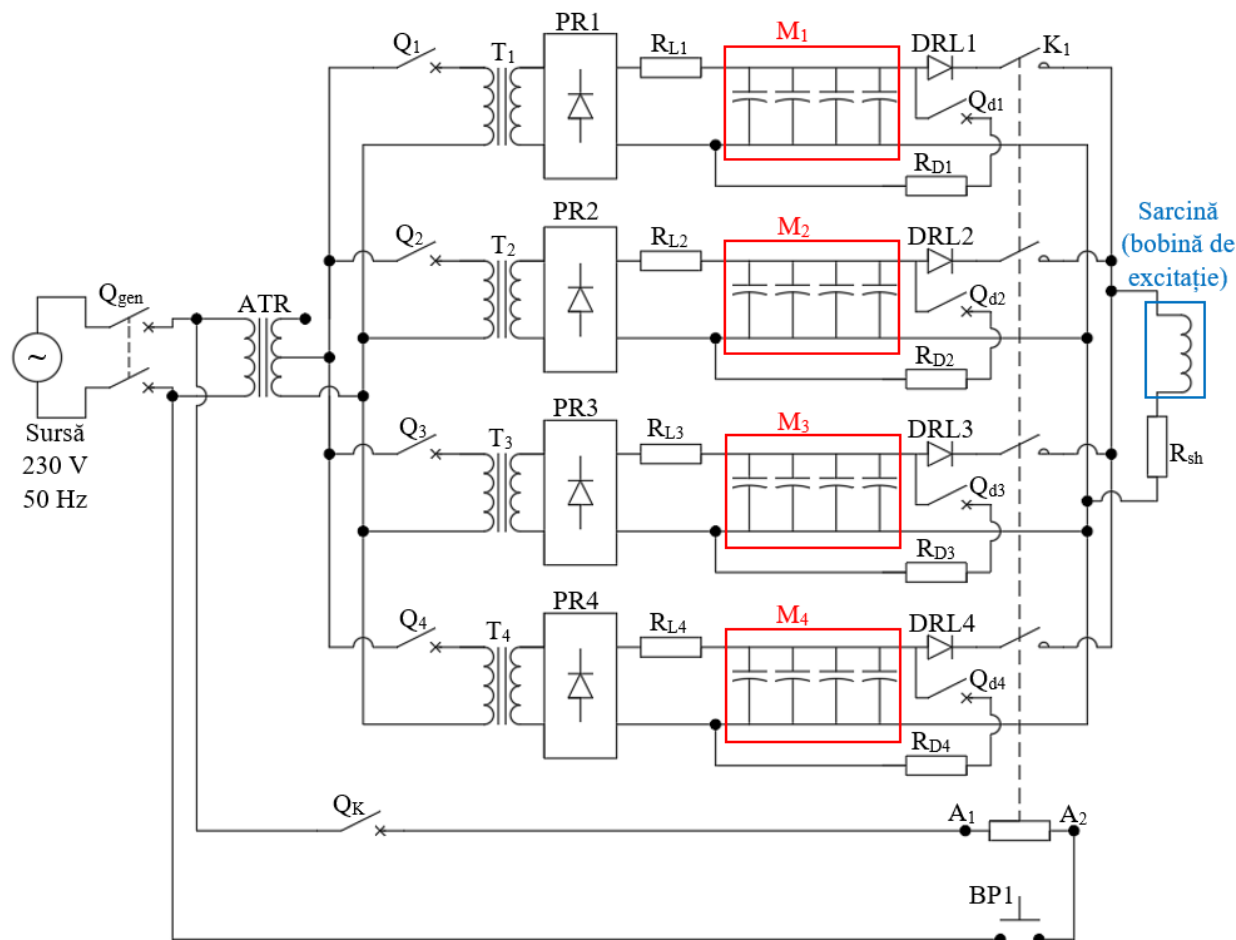


Fig. 8.2. Schema electrică simplificată a sursei de energie a actuatorului electromagnetic

8.4.Principiul de funcționare al sursei de energie a actuatorului electromagnetic

8.4.1.Încărcarea bateriei de condensatoare

Pentru a realiza încărcarea modulelor de condensatoare, se închide întreruptorul general Q_{gen} , se setează valoarea dorită a tensiunii de ieșire de la autotransformatorul ATR, și se închid pe rând, în funcție de necesitate, întreruptoarele locale Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 , iar celelalte aparate de comutație rămân deschise;

La încărcarea condensatoarelor, ecuația tensiunii se poate scrie:

$$u_c(t) = U_C \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \quad (8.1)$$

unde $T_1[s]$ este constanta de timp la încărcare a circuitului.

8.4.2.Descărcarea condensatoarelor pe rezistența de descărcare a circuitului auxiliar

Pentru a realiza descărcarea condensatoarelor pe rezistența circuitului auxiliar ($R_{D1} \dots R_{D4}$), se închid disjunctoarele ($Q_{d1} \dots Q_{d4}$), iar celelalte aparate de comutație rămân deschise; rezistențele de descărcare ale circuitelor auxiliare au fost implementate pentru evitarea accidentelor, iar

modulele de condensatoare pot rămâne pe perioada în care nu sunt folosite conectate la rezistențele de descărcare;

La descărcarea condensatoarelor pe rezistență, ecuația tensiunii se poate scrie:

$$u_C(t) = U_C \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (8.2)$$

unde U_C [V] este tensiunea de la bornele condensatoarelor înainte de descărcare, iar T_2 [s] este constanta de timp la descărcare.

8.4.3. Descărcarea condensatoarelor pe bobina de excitație a actuatorului electromagnetic

Descărcarea modulelor de condensatoare pe bobina de excitație a actuatorului electromagnetic este influențată de anumite fenomene de natură cinetică și electromagnetică care apar în funcționarea acestuia, respectiv în timpul manevrei de anclanșare și de declanșare.

Odată cu micșorarea întrefierului, apare saturarea circuitului feromagnetic (deoarece solenația produsă de bobină are o valoare foarte ridicată), fapt care va conduce la o funcționare a acestuia pe caracteristica $B - H$ într-un punct cu o permeabilitate magnetică relativă redusă. Considerând cele precizate anterior, se poate afirma că inductivitatea bobinei este o funcție de timp, care depinde atât de poziția circuitului feromagnetic mobil de-a lungul cursei acestuia, cât și de curentul care circulă prin înfășurare:

$$L_b(t) = f(s(t), i(t)) \quad (8.3)$$

unde $L_b(t)$ este inductivitatea la momentul de timp t , $s(t)$ este poziția circuitului feromagnetic mobil în raport cu cel fix, iar $i(t)$ curentul din bobină la acel moment de timp.

Se poate scrie ecuația specifică descărcării modulului de condensatoare pe bobina de excitație a actuatorului electromagnetic în următorul mod:

$$u_C(t) + u_R(t) + u_L(t) = 0 \quad (8.4)$$

unde $u_R(t)$ este componenta de tensiune datorată rezistenței bobinei, iar $u_L(t)$ este componenta de tensiune datorată inductivității acesteia; ținând cont de expresia curentului prin condensatoare, și faptul că acesta este egal prin toate elementele de circuit, respectiv:

$$i_R(t) = i_L(t) = i_C(t) = C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} \quad (8.5) [20]$$

rezultă expresia ecuației diferențiale care descrie tensiunea electrică în timpul descărcării modulului de condensatoare pe bobina de excitație a actuatorului electromagnetic:

$$L(s(t), i(t)) \cdot C \cdot \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + RC \cdot \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = 0 \quad (8.6)$$

unde $u_C(t)$ este tensiunea la bornele modulului de condensatoare, C este capacitatea acestuia, R este rezistența bobinei (măsurată în curent continuu), iar L este inductivitatea, care depinde de poziția $s(t)$ a circuitului feromagnetic mobil la momentul de timp t , iar $i(t)$ este curentul prin aceasta la momentul de timp t .

9. Cercetări experimentale realizate pentru analiza actuatorului electromagnetic

9.1. Considerente generale relative la cercetarile realizate cu modelul experimental de actuator electromagnetic

Pentru a putea cuantifica performanțele modelului experimental al actuatorului electromagnetic și pentru a le compara cu cel numeric, este necesară realizarea diferitor măsurări, în cadrul cărora să se determine diferiți parametri electromagnetici și cinetici ai actuatorului.

9.2. Măsurarea inducției magnetice în întrefierul actuatorului electromagnetic

Pentru a putea compara modelul experimental cu cel numeric al actuatorului electromagnetic, respectiv pentru a valida soluția de câmp magnetic, a fost realizată măsurarea inducției magnetice din întrefierul principal al actuatorului electromagnetic, atunci când acesta nu este alimentat. În acest caz, câmpul magnetic este produs strict de magneții permanenți, iar inducția magnetică a fost măsurată într-un punct accesibil în întrefierul principal, așa cum se poate observa în figura următoare:

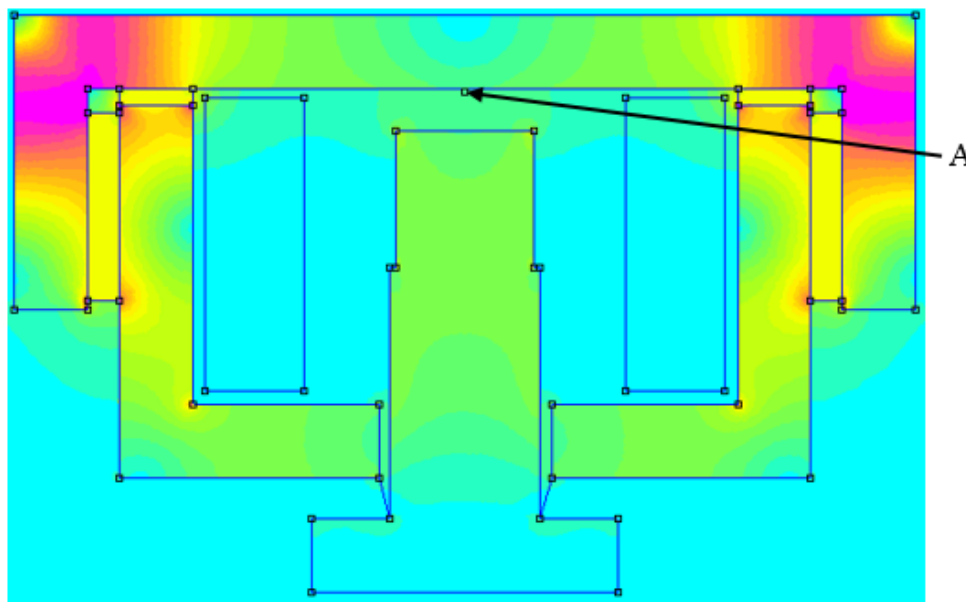


Fig. 9.1. Determinarea experimentală a inducției magnetice în întrefierul principal al actuatorului electromagnetic

Conform figurii precedente (9.1), determinarea experimentală a inducției magnetice s-a realizat poziționând sonda gaussmetrului în punctul A.

În ceea ce privește determinarea experimentală a inducției magnetice, valorile măsurate sunt prezentate în figura 9.2, iar pentru a putea compara performanțele modelului experimental cu cel numeric, au fost introduse inclusiv valorile inducției magnetice calculate în programul FEMM. Din analiza figurii 9.2, se poate observa faptul că erorile relative sunt mai mici la întrefier redus, iar pe măsură ce acesta crește, erorile relative cresc.

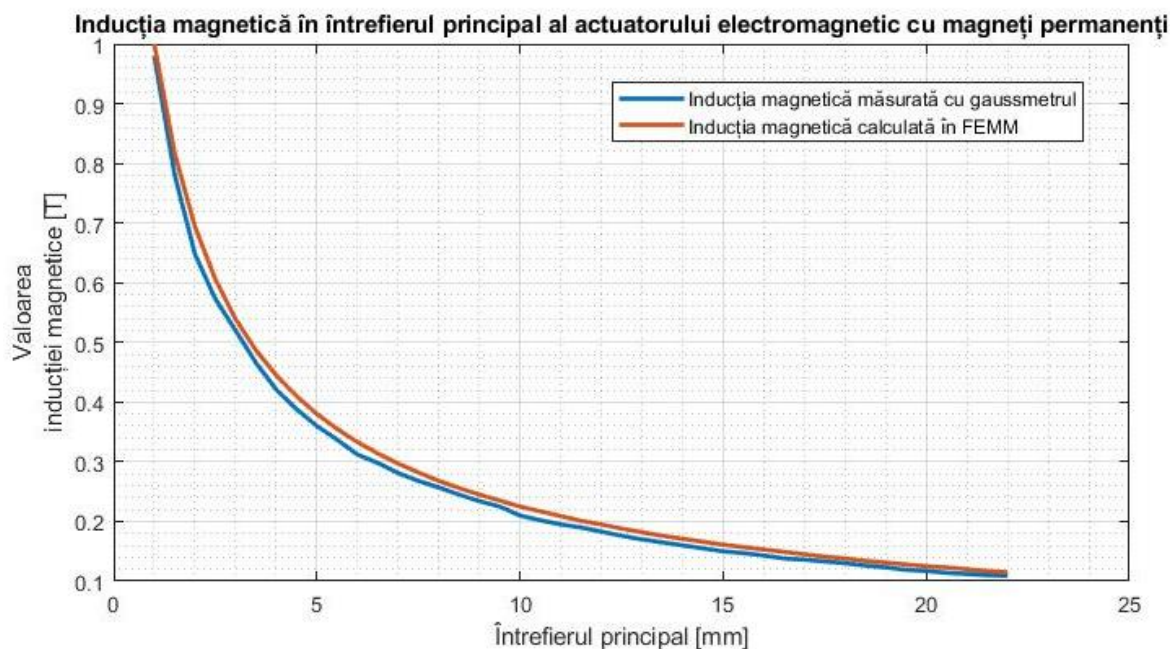


Fig. 9.2. Inducția magnetică măsurată și cea calculată în întrefierul principal

9.3.Oscilografiera formei de undă a curentului electric prin bobină și a deplasării circuitului feromagnetic mobil

9.3.1.Considerente generale relative la montajul experimental

Pentru a putea studia experimental funcționarea actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți în timpul manevrelor de închidere și de deschidere, acesta a fost alimentat cu ajutorul sursei de energie realizate și prezentate în cadrul capitolului 8.

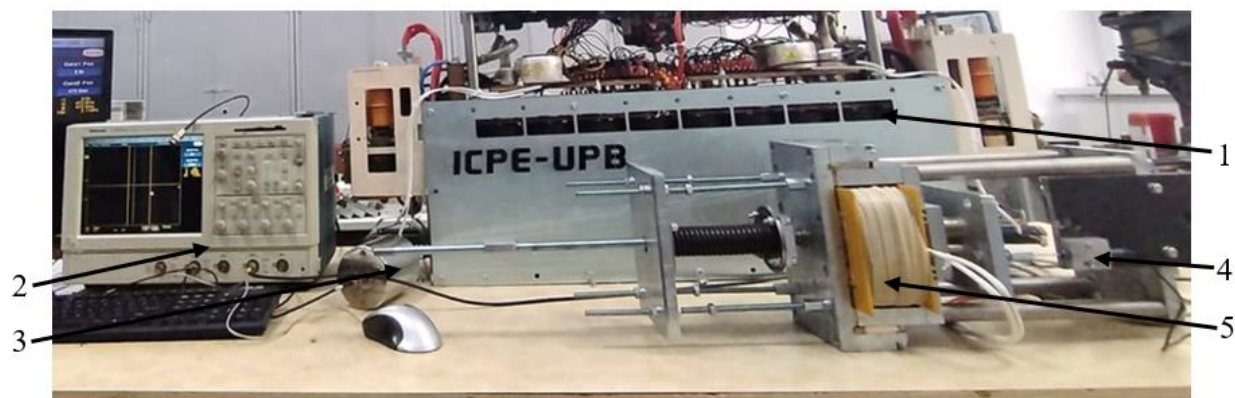


Fig. 9.3. Montajul experimental realizat pentru oscilografiera formei de undă a curentului electric absorbit de bobina de excitație a actuatorului electromagnetic și a deplasării circuitului feromagnetic mobil în timpul manevrelor de închidere și deschidere

Așa cum se poate observa în figura precedentă, principalele componente ale montajului sunt sursa de energie (1), osciloscopul (2) care preia tensiunea de la bornele șuntului coaxial (3) și al

traductorului de deplasare (4), și evident, modelul experimental al actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți (5).

9.3.2. Oscilografierea formei de undă a curentului electric prin bobină și a deplasării circuitului feromagnetic mobil în timpul manevrei de închidere a actuatorului electromagnetic

Pentru a putea studia funcționarea actuatorului electromagnetic în timpul manevrei de anclanșare, modulele de condensatoare au fost încărcate la diferite tensiuni, iar curentul electric și deplasarea au fost achiziționate în urma alimentării, așa cum se poate observa în figura 9.4:

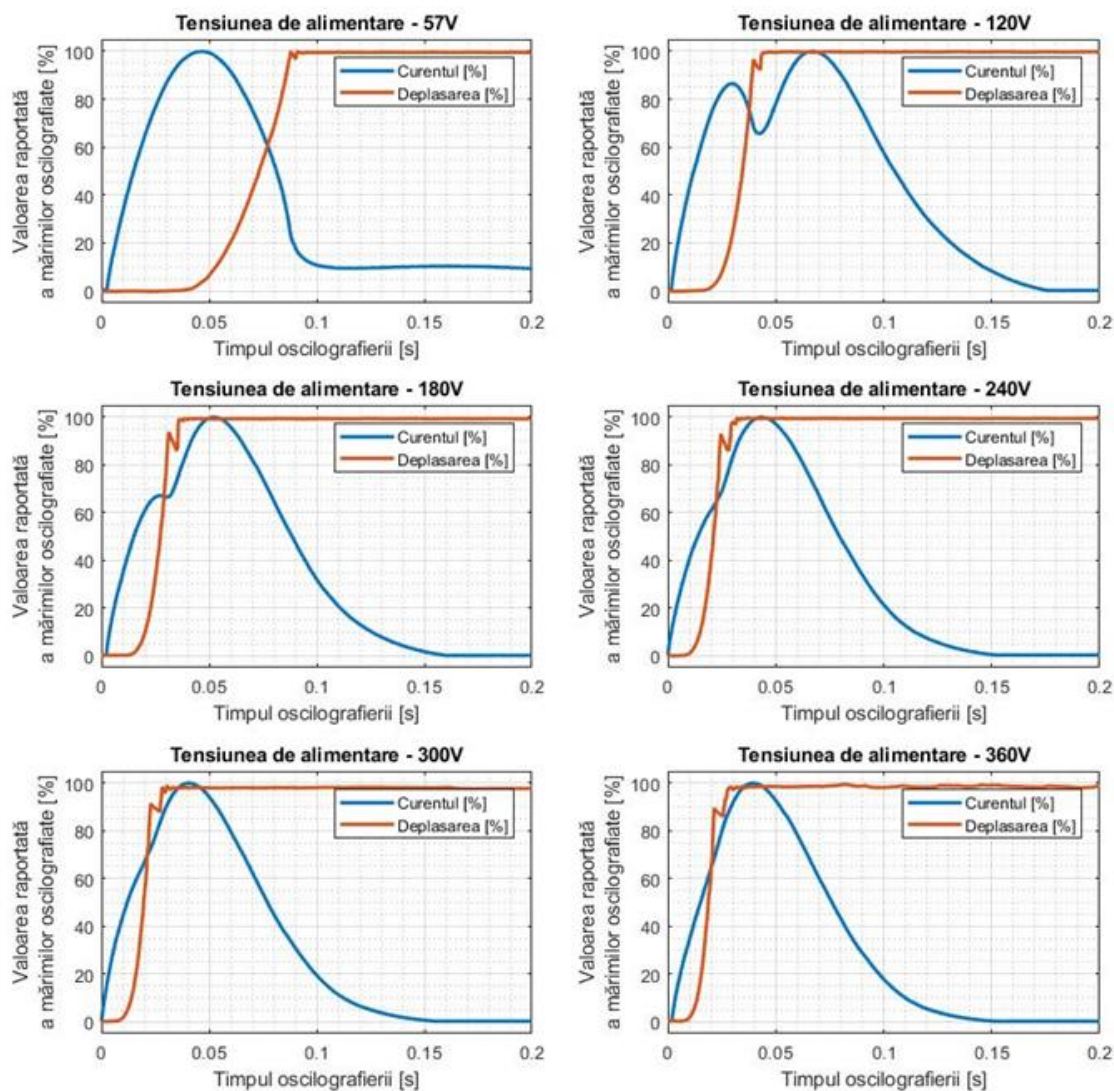


Fig. 9.4. Oscilografierea curentului absorbit de bobina de excitație și a deplasării circuitului feromagnetic mobil în aceeași bază de timp a osciloscopului, în timpul manevrei de închidere, pentru diferite tensiuni de încărcare ale sursei de energie

Pentru a putea afișa pe același grafic și forma de undă a curentului electric, și caracteristica deplasării circuitului feromagnetic mobil în funcție de timp, s-a adoptat utilizarea mărimilor relative. Astfel, deplasarea începe de la 0% (întrefier maxim) și se termină la 100% (întrefier minim), iar

valoarea curentului electric se raportează în funcție de valoarea maximă a acestuia (valoarea maximă a curentului obținută în regim aperiodic corespunzând procentului de 100%).

Descărcarea condensatoarelor electrice în timpul manevrei de deschidere a actuatorului electromagnetic conduce la un regim aperiodic, conform figurii 9.4.

9.3.3. Oscilografiera formei de undă a curentului electric prin bobină și a deplasării circuitului feromagnetic mobil în timpul manevrei de deschidere a actuatorului electromagnetic

Pentru a putea studia funcționarea actuatorului electromagnetic în timpul manevrei de declanșare, modulele de condensatoare au fost încărcate la diferite tensiuni (la fel ca în lucrările [21], [22]), iar curentul electric și deplasarea au fost achiziționate în urma alimentării, așa cum se poate observa în figura 9.5.

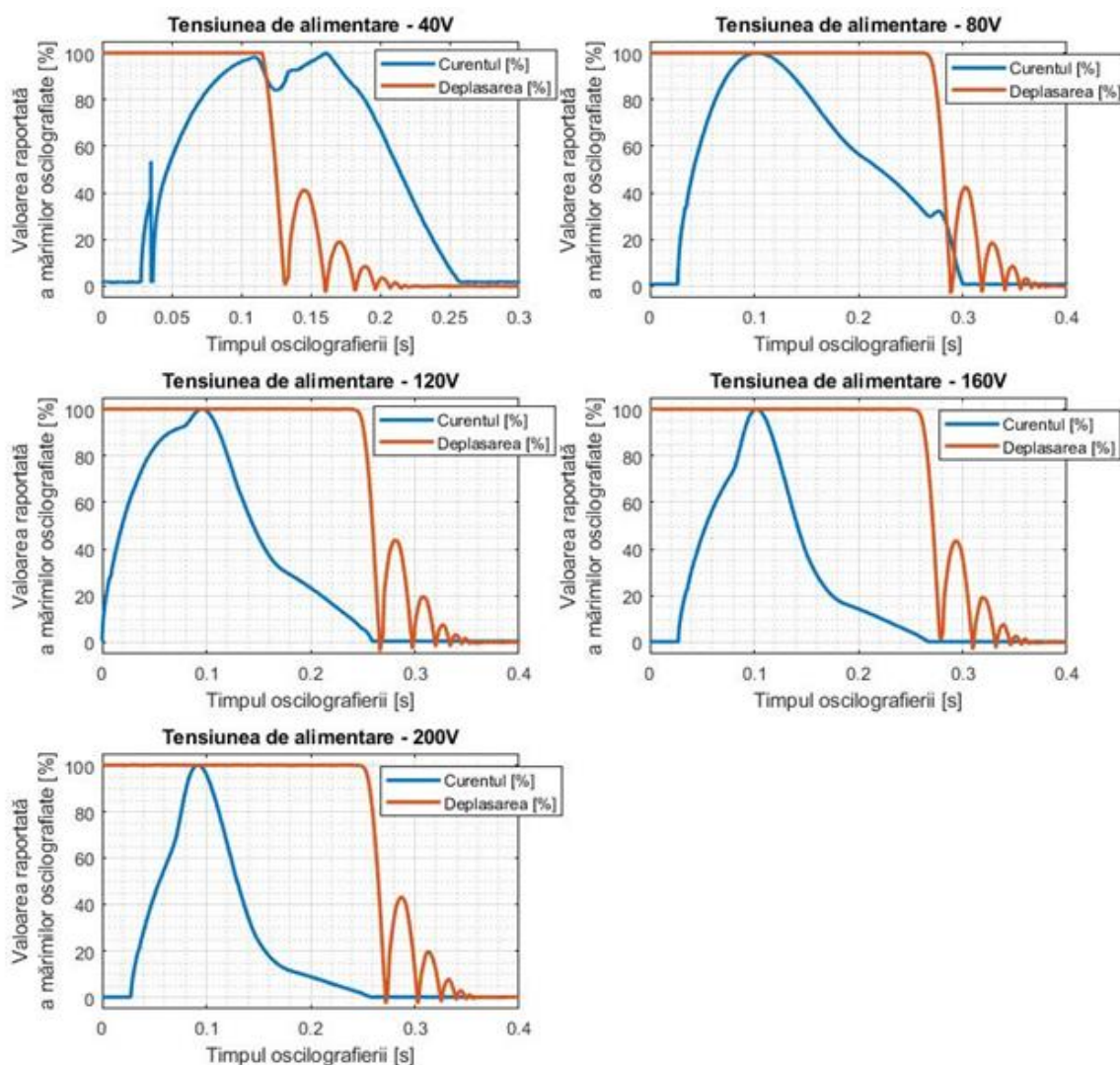


Fig. 9.5. Oscilografiera curentului absorbit de bobina de excitație și a deplasării circuitului feromagnetic mobil în aceeași bază de timp a osciloscopului, în timpul manevrei de deschidere, pentru diferite tensiuni de încărcare ale sursei de energie

Asemănător caracteristicilor prezentate în figura 9.4, în figura 9.5 s-a adoptat utilizarea mărimilor relative, pentru a putea afișa pe același grafic și forma de undă a curentului electric, și caracteristica deplasării circuitului feromagnetic mobil în funcție de timp,. Astfel, deplasarea începe de la 100% (întrefier minim) și se termină la 0% (întrefier maxim), iar valoarea curentului electric se raportează în funcție de valoarea maximă a acestuia (valoarea maximă a curentului obținut în regim aperiodic corespunzând procentului de 100%).

9.4. Măsurarea forței exercitate asupra circuitului feromagnetic mobil

Măsurarea forței exercitate asupra circuitului feromagnetic mobil s-a realizat pentru diferite întrefieruri, utilizând un traductor de forță piezoelectric, fără alimentarea bobinei de excitație a actuatorului electromagnetic. Astfel, a fost determinată forța dezvoltată de actuatorul electromagnetic cu magneți permanenți de-a lungul cursei armăturii mobile a acestuia, pasul de măsurare fiind egal cu 0.5 mm (de la 1 mm la 22 mm). Pentru efectuarea măsurărilor, pe talpa polară a actuatorului electromagnetic a fost montată o componentă intermediară, iar de aceasta este solidară mecanic traductorul de forță, așa cum se poate observa în figura 9.6.

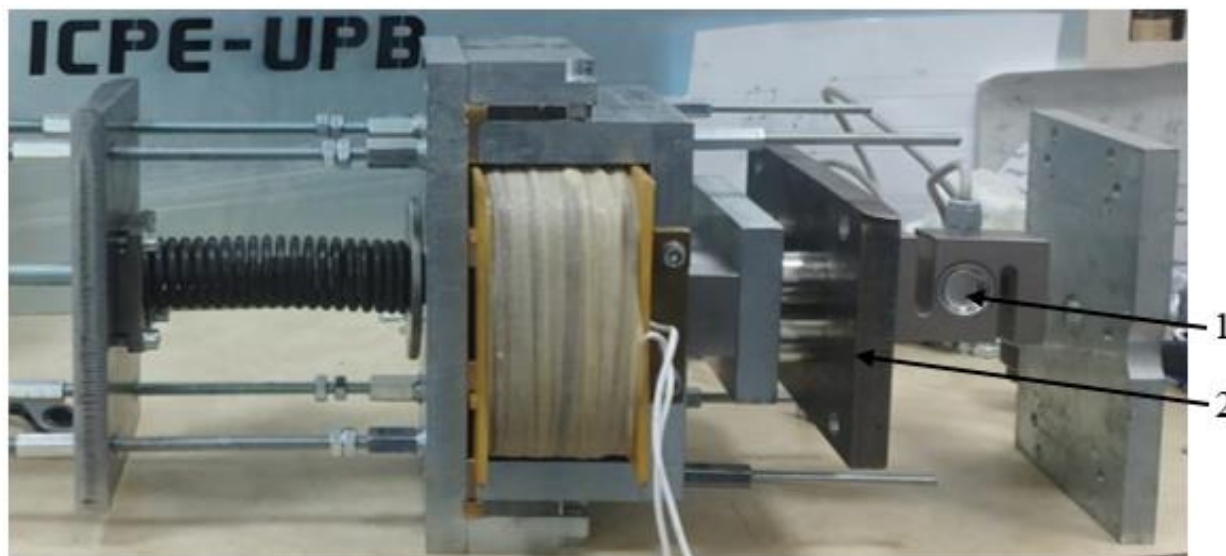


Fig. 9.6. Componentele principale utilizate în vederea determinării experimentale a forței exercitate de actuatorul electromagnetic cu magneți permanenți: (1) – traductor de forță piezoelectric; (2) – componentă intermediară

Astfel, rezultatele experimentale obținute sunt comparate cu cele calculate numeric așa cum se poate observa în figura 9.7. Spre deosebire de măsurările de inducție magnetică (unde valoarea calculată era întotdeauna mai mare decât cea măsurată, pentru același întrefier), în cazul forței, valorile determinate experimental pot fi și mai mici, dar și mai mari față de cele calculate numeric.

Conform figurii 9.7, la valori reduse ale întrefierului, eroarea dintre forța calculată și cea măsurată este relativ redusă. Erorile relative mici se obțin la întrefieruri reduse (la fel ca în cazul măsurărilor de inducție magnetică) deoarece efectul de capăt în zona întrefierului are o influență mai redusă.

Așa cum se poate observa, erorile relative ridicate (cuprinse, în general, între 5% și 7%) se obțin pentru întrefieruri de valoare ridicată (mai mari de 11 mm), unde valoarea forței este relativ redusă. Având în vedere faptul că forța poate să varieze cu două ordine de mărime de-a lungul cursei circuitului feromagnetic mobil, coroborat cu obținerea rezultatelor numerice la întrefieruri reduse, a fost necesară alegerea unui traductor la care forța maximă admisă este egală cu 10 kN (aproximativ o tonă forță). Dezavantajul alegerii unui traductor care are valoarea maximă a forței măsurate ridicată este sensibilitatea redusă a acestuia, respectiv rezoluția de 5 N, ceea ce poate induce anumite erori de măsurare (mai ales pentru întrefieruri ridicate – mai mari de 11 mm, unde forța măsurată este mai mică sau egală cu 100 N).

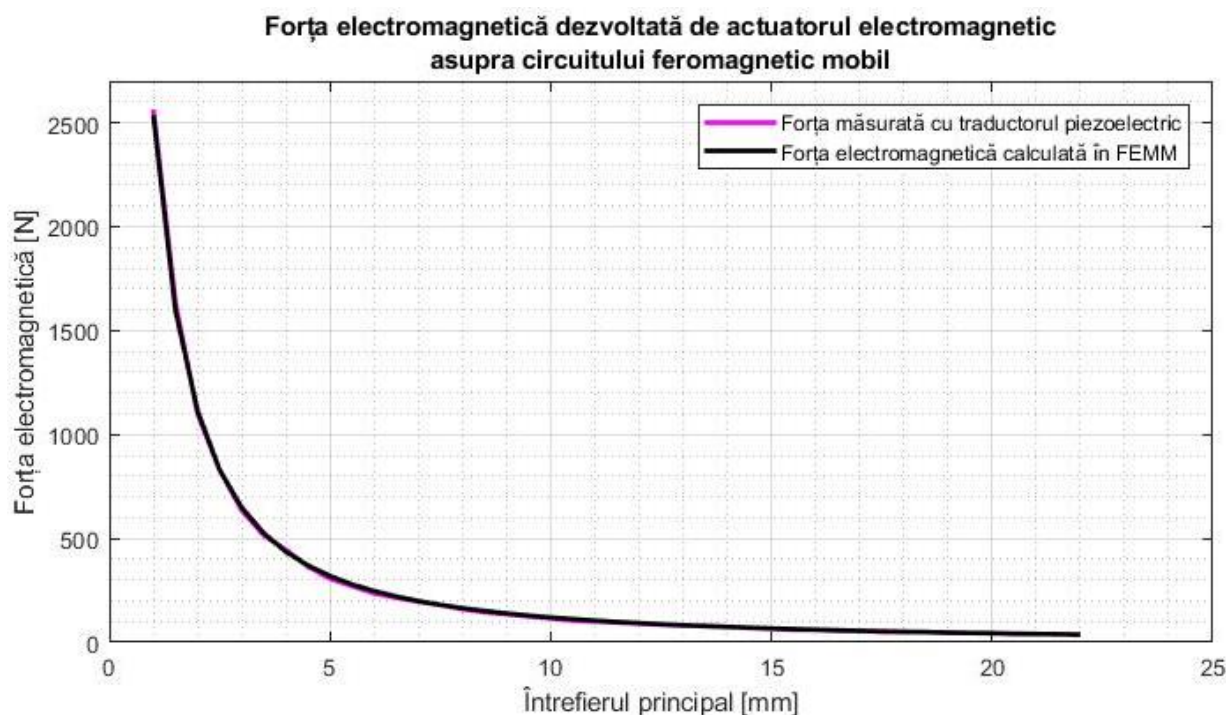


Fig. 9.7. Forța electromagnetică măsurată și calculată în funcție de întrefier

Chiar dacă traductorul, pentru întrefieruri ridicate și forțe reduse, conduce la măsurări de forță unde eroarea poate fi de maxim 5% ... 6%, valorile măsurate sunt foarte apropiate de cele calculate, ceea ce indică corectitudinea modelului numeric de câmp electromagnetic al actuatorului cu magneți permanenți.

10. Concluzii

Prezenta teză de doctorat are ca obiectiv dezvoltarea unui nou actuator electromagnetic cu magneți permanenți cu performanțe superioare soluțiilor existente în prezent. În acest sens, în cadrul Capitolului 2 a fost prezentat stadiul actual al actuatorilor electromagnetice cu magneți permanenți, respectiv principalele soluții constructive întâlnite în aplicațiile tehnice. Astfel, au fost prezentate 5 soluții constructive existente de actuator electromagnetic cu magneți permanenți, cu geometrie de tip plan – paralelă, cât și axisimetrică. Chiar dacă principiul de funcționare și principalele subansamble constructive sunt asemănătoare între soluțiile constructive existente, diferențele întâlnite în geometria acestora pot conduce la performanțe diferite. În acest sens, noutatea prezentei teze de doctorat constă în propunerea unui nou model de actuator electromagnetic cu magneți permanenți, cu geometrie optimizată, detaliată în cadrul capitolului 3. Principala îmbunătățire din punct de vedere geometric constă în existența tălpii polare și dimensionarea optimă a acesteia, precum și poziționarea optimă a circuitului feromagnetic auxiliar față de celelalte subansamble ale actuatorului electromagnetic.

Pornind de la avantajele și dezavantajele întâlnite în cadrul stadiului actual, teza prezintă principiul de funcționare al actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți atât din punct de vedere al problemei cinematice, cât și din punct de vedere al problemei de câmp electromagnetic, acest lucru fiind detaliat în cadrul capitolului 3. Astfel, pentru cele patru stări de funcționare ale actuatorului electromagnetic, respectiv poziția de repaus la întrefier maxim, manevra de anclanșare, poziția de repaus la întrefier minim și manevra de declanșare, a fost prezentată funcționarea actuatorului atât din punct de vedere electromagnetic, cât și cinetic.

De asemenea, au fost dimensionate principalele subansamble ale actuatorului electromagnetic, aceste aspecte fiind întâlnite în cadrul capitolului 4 al tezei, astfel încât masa și volumul actuatorului electromagnetic să fie cât mai reduse, pentru a eficientiza consumul de materiale și spațiul în care se încadrează dispozitivul în mecanismul în care acesta este integrat. Astfel, au fost dimensionate componentele principale ale actuatorului electromagnetic, și totodată au fost determinate principalele mărimi electrice și magnetice care sunt întâlnite în funcționarea dispozitivului.

Având în vedere faptul că performanțele cinematice ale dispozitivului depind de parametrii electromagnetici ai acestuia, a fost necesară modelarea numerică a actuatorului electromagnetic cu magneți permanenți, prezentată detaliat în cadrul capitolului 5. Astfel, a fost realizată modelarea câmpului magnetic în actuator în cele 4 stări de funcționare ale acestuia, punându-se accent pe influența parametrilor electrice și magnetici în obținerea unor parametri cinematici optimi. Contribuțiile științifice originale ale acestui capitol constau în analiza funcționării actuatorului electromagnetic pentru mai multe solenații produse de bobina de excitație, iar pentru aceasta, au fost determinați parametrii cinematici de interes, prezentați în cadrul capitolului 6. Spre deosebire de alte lucrări științifice, în care modelarea dispozitivului se face pentru o valoare unică a solenației produse de bobina de excitație, teza abordează funcționarea actuatorului electromagnetic într-o plajă mai largă de valori, pentru a studia influența forței magnetomotoare (iar la altă scară, a curentului electric din înfășurare) asupra parametrilor cinematici. Dintre aceștia, se pot enumera forța dezvoltată de actuatorul electromagnetic, accelerația imprimată și viteza obținută de circuitul feromagnetic mobil,

precum și energia cinetică acumulată de acesta. Cunoscând acești parametri, s-a determinat timpul de funcționare și toate dependențele dintre parametri în funcție de deplasare sau de timp, atât pentru manevra de închidere (anclanșare) a dispozitivului, cât și pentru manevra de deschidere (declanșare) a acestuia. De asemenea, a fost studiat comportamentul cinematic al actuatorului electromagnetic atât la funcționarea în gol a acestuia, cât și prin adăugarea unei sarcini mecanice, reprezentate de resortul de deschidere.

Pentru a valida rezultatele numerice ale actuatorului electromagnetic cu magneti permanenți, a fost necesară implementarea fizică a acestuia, motiv pentru care în cadrul capitolului 7, sunt prezentate desenele tehnice ale subansamblelor principale ale dispozitivului, în vederea execuției elementelor componente. Din acest punct de vedere, în teză sunt precizate inclusiv materialele utilizate în construcția componentelor și metodele și procedeele tehnologice prevăzute în realizarea acestora. De asemenea, un aspect important este reprezentat de montarea și asamblarea tuturor componentelor în vederea realizării actuatorului electromagnetic, iar în acest sens, sunt prezentate inclusiv desenele tehnice în secțiunea organelor de prindere.

Pentru funcționarea actuatorului electromagnetic, a fost necesară realizarea sursei de energie a acestuia, formată din module de condensatoare electrolitice și circuite auxiliare de încărcare și descărcare, prezentată detaliat în cadrul capitolului 8. În acest sens, capitolul prezintă motivarea alegerii unei astfel de surse de energie, precum și componentele principale ale acesteia. Explicarea funcționării sursei de energie este realizată în 3 subcapitole distincte, care fac referire la încărcarea condensatoarelor, descărcarea acestora pe bobina de excitație a actuatorului electromagnetic, precum și pe rezistența circuitului auxiliar.

Una dintre cele mai importante părți a tezei de doctorat este reprezentată de capitolul 9, în care este prezentată detaliat funcționarea modelului experimental de actuator electromagnetic cu magneti permanenți. În acest sens, au fost realizate măsurări ale inducției câmpului magnetic în întrefierul actuatorului electromagnetic, și au fost comparate cu valorile calculate numeric. De asemenea, a fost măsurată forța exercitată asupra circuitului feromagnetic mobil și comparată cu cea calculată în programul de element finit FEMM. Pentru ambele seturi de măsurări, erorile relative reduse (cuprinse, în general, în intervalul 1% ... 5%), cauzate în principal de efectul de capăt datorat geometriei 2D plan - paralelă au confirmat corectitudinea modelului numeric al actuatorului electromagnetic și funcționarea optimă a modelului experimental.

Toate subansamblele au fost proiectate, optimizate și corelate între ele, pentru a garanta funcționarea dorită, deoarece performanța cinematică și electrică a actuatorului electromagnetic cu magneti permanenți depinde de fiecare componentă a acestuia.

11. Bibliografie

- [1] – C – H. Lee, B.H. Shin, Y-B Bang, “Designing a Permanent – Magnetic Actuator for Vacuum Circuit Breakers Using the Taguchi Method and Dynamic Characteristic Analysis”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 63, No. 3, 2016, pp. 1655 – 1664.
- [2] – P. Immonen, V. Ruuskanen, J. Pyrhönen, “Moving magnet linear actuator with self – holding functionality”, IET Electrical Systems in Transportation, Vol. 8, No. 3, 2018, pp. 182 – 187.
- [3] – S.J. Kim, J.H. Hur, Y.I. Kim C.M. Yun, “One – Coil Long – Stroke Permanent Magnetic Actuator Design Applied to Load Breaker Switch for Railway”, MDPI Applied Sciences, Vol. 12, No. 16, 2022.
- [4] – E. Choi, J. Ma, “Development of Permanent Magnetic Actuator for a solid insulated vacuum circuit breaker”, International Conference on Electric Power Equipment – Switching Technology, 1 oct. 2015, pp 462 – 465.
- [5] – J. Jiang, H. Lin, S. Fang, “Multi-Objective Optimization of a Permanent Magnet Actuator for High Voltage Vacuum Circuit Breaker Based on Adaptive Surrogate Modeling Technique”, Energies, MDPI, Vol 12, No. 24, dec. 2019.
- [6] – A. Radulian, M. Maricar, I.V. Nemoianu, R. Crețu, “New solution of linear DC actuator with additional permanent magnets: working principle, design and testing”, Revue Roumaine des Sciences Techniques, Série Électrotechnique et Énergétique, Vol. 62, No. 1, 2017, pp 3 – 7.
- [7] – D. Nicolescu, A. Radulian, M. Maricar, S. Prică, “High Force Heavy Duty Direct Current Actuator”, Revue Roumaine des Sciences Techniques, Série Électrotechnique et Énergétique, Vol. 66, No. 1, 2021, pp. 139 – 143.
- [8] – Z Wang, L. Sun, S. He, Y. Geng, Z. Liu, “A permanent Magnetic Actuator for 126 kV Vacuum Circuit Breakers”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 50, No. 3, 2014, pp 129-135.
- [9] – D. Nicolescu, A. Radulian, C. Sărăcin, M. Maricar, “New Solution of High Force Linear Actuator with Permanent Magnets”, Revue Roumaine des Sciences Techniques, Série Électrotechnique et Énergétique, Vol. 69, No. 2, 2024, pp. 165 – 170.
- [10] – G. Zeng, Y. Xiangyu, H. Yin, Y. Jing, S. Zhao, J. Cao, “Unsymmetrical bistable multimagnetic circuit permanent magnet actuator for high – voltage circuit breaker application: analysis, design, and dynamic simulation”, IET Electric Power Applications, Vol. 14, No. 5, 2020, pp. 827 – 836.
- [11] – G. Wang, E. Dong, Y. Wang, S. Yin, L. Zhang, T. Qin “A new Dynamic Displacement Prediction Method for Contactors with Constant Air Gap”, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 69, No. 4, 2022.
- [12] – L.R. Neiman, P.L. Kalantarov, “Bazele Teoretice ale Electrotehnicii”, Editura Energetică de Stat, Moscova, 1955.
- [13] – G. Zeng, X. Yang, “Analysis, Design and Optimization of a Novel Asymmetrical Bistable Short Mover Permanent Magnet Actuator for High – Voltage Circuit Breaker Application”, MDPI – Actuators, Vol. 11, No. 7, 2022.
- [14] – D. Meeker, “Finite Element Method Magnetics, Version 4.2 – User’s Manual, 2018” [online], citat la 08.11.2022, disponibil la URL: <https://www.femm.info/wiki/Documentation/>
- [15] – M. Rong, J. Lou, Y. Liu, J. Li, “Static and Dynamic Analysis for Contactor with a New Type of Permanent Magnet Actuator”, IEICE Transactions on Electronics, Vol. E89-C, No. 8, pp 1210 – 1216.

- [16] – C. Hou, J. Sun, Y. Cao, X. Liu, E. Wang, “Design and Analyses on Permanent Magnet Actuator for Mining Vacuum Circuit Breaker”, 22nd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Matsue, 2006, pp. 512 – 515.
- [17] – K. – N. Park, J. – W. Son, S. – C. Hahn, “Dynamic Characteristic Analysis of Permanent Magnetic Actuators coupled Electromagnetic – mechanical Finite Element Method”, International Conference on Electrical Machines and Systems, Incheon, 2010, pp. 1706 – 1709.
- [18] – Z. Cai, S. Ma, J. Wang, “An Approach of Improve Permanent Magnetic Actuator of Vacuum Circuit Breaker”, 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Bucharest, Romania, 2008.
- [19] – Z. Huang, X. Duan, J. Zou, M. Chen, “A permanent magnetic actuator with scheduled stroke curve for vacuum circuit breakers”, 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Braunschweig, Germany, 2010, pp. 162 – 165.
- [20] – S. Fang, M. Xia, H. Lin, S.L. Ho, “Analysis and design of a high-speed permanent magnet characteristic actuator using eddy current effect for high-voltage vacuum circuit breaker”, IET Electric Power Applications, Vol. 10, No. 4, 2016, pp. 268 – 275.
- [21] – E. Dong, T. Qin, Y. Wang, X. Duan, J. Zou, “Experimental Research on Speed Control of Vacuum Breaker”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 4, 2013.
- [22] - H.K. Jung, “Optimal design and dynamic characteristic analysis of a new type electric actuator for high voltage circuit breaker”, International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China, 2008.