

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București
Facultatea de Inginerie Electrică
Sesiunea de Comunicări Științifice Studențești



**Cercetări relativ la realizarea unui model experimental de sistem de propulsie
electromagnetică**

Autori:

Matei-Alexandru MACHEDON

Gabriela NEGREA

Sebastian PRICĂ

Profesor îndrumător:

Dr. Ing. Alexandru RADULIAN

Ediția 2025

1.Rezumatul lucrării

În acest articol, autorii prezintă aspecte teoretice, numerice și practice relativ la dezvoltarea unui model experimental de declanșator electromagnetic. Pe baza cunoștințelor acumulate până în prezent, echipa de cercetare a utilizat o suită de softuri ingineresti în vederea obținerii unor rezultate cât mai precise și într-un timp cât mai optim. În urma efectuării unui scurt stadiu actual asupra temei s-a propus o soluție nouă de lansator electromagnetic care ulterior a fost analizată și modelată computerizat. Pentru rezolvarea problemei de câmp magnetic s-a utilizat metoda elementului finit și softul FEMM 4.2 și modulul LUA. Pentru rezolvarea problemei de circuit electric, a ecuației de mișcare și pentru reprezentarea grafică a valorilor obținute numeric s-a utilizat softul MATLAB și modulul Simulink. Schemele electrice s-au realizat cu ajutorul softului DIPTRACE și grafica bidimensională cu ajutorul softului AUTOCAD. Astfel, pe baza metodelor și softurilor menționate anterior, s-a analizat regimul de descărcare a unui condensator asupra unei bobine, tratându-se modelul circuitului oscilant de tip RLC. Prin această descărcare s-a generat un impuls de curent necesar obținerii unei forțe electromagnetice în scopul accelerării unui proiectil metalic. Pe baza acestei analize computerizate, a fost dezvoltat circuitul de forță și s-a testat capacitatea acestuia de a suporta curenți de descărcare intensi, asigurându-se astfel transferul de energie de la condensator la bobină. De asemenea, a fost conceput circuitul de comandă cu rolul de activare și dezactivare a bobinelor de excitație pe baza semnalului primit de la sistemul optic de detecție, sistemul asigurând sincronizarea între poziția proiectilului și comutarea elementelor semiconductoare de tip tiristor. În paralel s-au modelat numeric diferite structuri de lansator electromagnetic. Pe baza rezultatelor obținute pe cale analitică și numerică, s-a realizat și testat modelul experimental de lansator electromagnetic. Rezultatele obținute au corespuns cerințelor impuse și s-au prezentat sub formă grafică în partea de final a articolului. Articolul se încheie cu o serie de concluzii pe baza rezultatelor obținute.

Cuvinte cheie: electromagnetism, circuit oscilant, tiristor, barieră optică.

2.Introducere

Dezvoltarea sistemelor de propulsie electromagnetică a devenit un subiect tot mai important în ultimii ani, pe măsură ce principiile electromagnetismului sunt tot mai des folosite în dezvoltarea diferitelor domenii tehnice, asemenea domeniului cercetării, cel industrial și cel aerospațial. „Lansatoarele electromagnetice sunt un tip de accelerator format din una sau mai multe bobine utilizate ca electromagneți în configurația unui motor liniar care accelerează un proiectil feromagnetic sau conductiv la o viteză mare.” [1]

Primele modele de lansatoare îi aparțin norvegianului Kristian Birkeland, care în aprilie 1902 a realizat 2 tipuri de sisteme de propulsie: unul bazat pe reluctanță și unul bazat pe inducție.[2]

Scopul lucrării este de a proiecta și dezvolta un model experimental de sistem de propulsie electromagnetică bazat pe reluctanță magnetică ce funcționează după legea lui Ampere. În cadrul acesteia sunt abordate aspecte tehnice precum realizarea circuitului oscilant RLC, excitarea bobinei prin descărcarea controlată a condensatorului electrolitic, implementarea unui circuit de forță, proiectarea unui circuit de comandă bazat pe un ansamblu emițător IR–fototranzistor și evaluarea vitezei de deplasare a proiectilului.

Componenta principală a ansamblului este bobina, aceasta fiind excitată prin descărcarea unui condensator electrolitic. Astfel, utilizând regula burghiului, este indus un câmp magnetic ce exercită o forță de atracție asupra proiectilului feromagnetic. Pentru a opri excitația bobinei, utilizăm un circuit de comandă compus dintr-un ansamblu de sistem de detecție optică (fototranzistor–emițător IR): când proiectilul trece prin fața senzorului, fototranzistorul trimite un semnal către poarta tiristorului care oprește alimentarea bobinei.

Pentru modelul experimental, se urmărește implementarea ansamblului din figura 1.

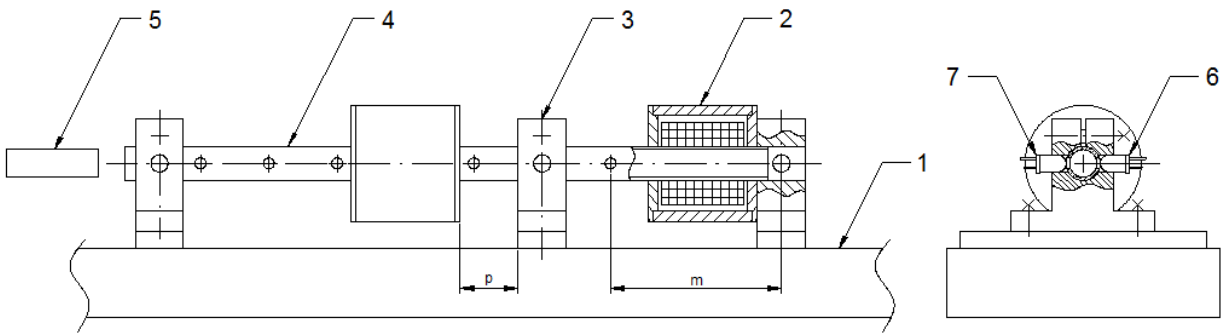


Fig. 1. Vederea bidimensională a sistemului de propulsie

În figura 1 se prezintă o vedere de ansamblu a soluției propuse de lansator electromagnetic. Din punct de vedere constructiv, această soluție este compusă din: 1- șasiu nemagnetic; 2- electromagnet de propulsare; 3- suport barieră optică; 4- țeavă; 5-proiectil; 6- fotodiodă și 7- fototranzistor.

3. Conținutul lucrării

3.1 Modelarea și simularea elementelor de circuit electric și magnetic

3.1.1 Modelarea circuitului electric

Circuitul principal de curent intens care se dorește a fi utilizat în acest proiect este un circuit de tip oscilant RLC. Conform figurii 2, principiul de funcționare al circuitului electric de tip RLC serie presupune descărcarea unui condensator preîncărcat pe un circuit format dintr-o rezistență și bobină înseriate. După ce condensatorul este decuplat de la sursa de tensiune și conectat la bornele bobinei, acesta se descarcă prin bobină, iar energia se transformă în câmp magnetic. Energia sistemului este suma dintre energia electrică și cea magnetică, iar curentul prin bobină crește până când condensatorul este descărcat complet. Ulterior, curentul scade, iar circuitul oscilează între energie electrică și magnetică.

Circuitul oscilant este definit prin transformarea continuă a energiei electrice în energie magnetică și invers. [3]

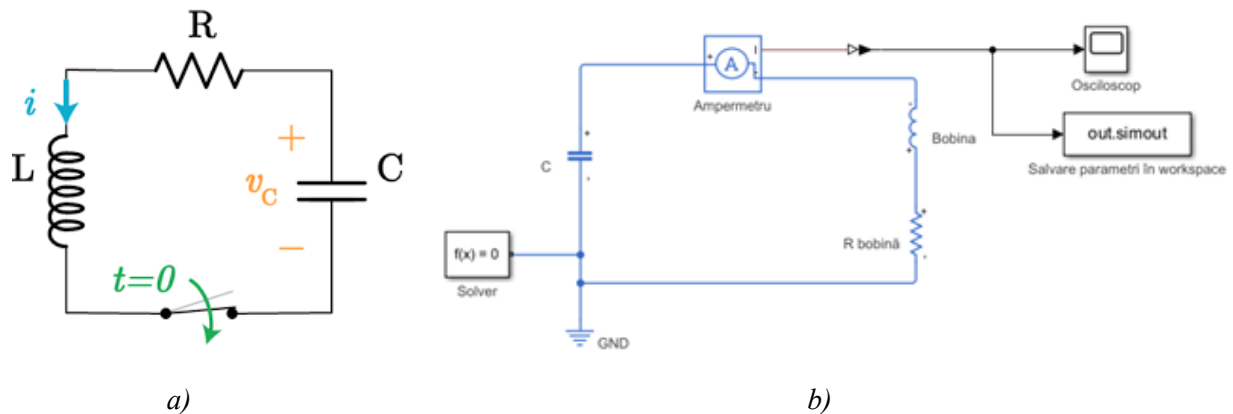


Fig. 2. Circuitul electric utilizat pentru modelarea computerizată: a) circuitul echivalent [3]; b) circuitul implementat în MATLAB- Simulink

- R este rezistența totală a circuitului și este formată din înserierea rezistențelor aferente bobinei de excitație, a șuntului coaxial, a condensatorului electrolitic și a elementelor de conexiune electrică;
- L este inductivitatea totală a circuitului și este formată din înserierea inductivităților aferente bobinei de excitație și a elementelor de conexiune electrică;
- C este capacitatea electrică a circuitului și corespunde cu capacitatea condensatorului electrolitic;
- V_C este tensiunea inițială la care a fost încărcat condensatorul înainte de descărcare.

În acest subcapitol se urmărește comportamentul curentului atunci când condensatorul este încărcat la o tensiune inițială (V_0) și comutat pentru a se descărca prin rezistor și printr-o bobină neîncărcată ($I_0 = 0$). [4]

Circuitul din figura 2 (a) poate fi caracterizat prin **Legea tensiunilor lui Kirchhoff**, care presupune însumarea tensiunilor din fiecare element al circuitului și egalarea sumei cu zero.

$$V_L + V_R + V_C = 0 \quad (1)$$

Pornind de la această relație, ecuația se poate rescrie în funcție de intensitatea curentului, folosind relațiile uzuale pentru fiecare componentă (rezistor, bobină, condensator).

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$$V_R = Ri \quad (3)$$

$$V_C = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \quad (4)$$

Din însumarea lor, conform primei ecuații, se obține:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = 0 \quad (5)$$

Derivând în raport cu timpul, obținem ecuația diferențială:

$$L \frac{d^2i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = 0 \quad (6)$$

Pentru forma standard, împărțim totul la L:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i(t) = 0 \quad (7)$$

Aceasta este ecuația diferențială care va fi rezolvată. Trecând în domeniul Laplace:

$$s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{1}{LC} = 0 \quad (8)$$

Se definesc doi parametri importanți:

- **Frecvența de amortizare (α)**, parametru care masoara viteza cu care se pierde energia în circuit din cauza rezistențe:

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (9)$$

- **Frecvența unghiulară de rezonanță (ω_0)**, care determină viteza naturală a oscilațiilor:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

Integrând aceste două noi notații, ecuația devine:

$$s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2 = 0 \quad (11)$$

Iar după rezolvarea ecuației prezentate, soluția este:

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (12)$$

Comportamentul sistemului (răspunsul în timp al curentului) depinde de **raportul de amortizare (ξ)**, care este:

$$\xi = \frac{\alpha}{\omega_0} \quad (13)$$

Răspunsul sistemului variază în funcție de valoarea factorului de amortizare, determinând trei regimuri distincte:

- subamortizat (oscilații atenuate) $\alpha < \omega_0$
- critic (fără oscilații) $\alpha = \omega_0$
- supraamortizat (fără revenire). $\alpha > \omega_0$

În **regim subamortizat** circuitul oscilează, dar aceste oscilații se estompează în timp. Rădăcinile sunt complexe, iar forma curentului este:

$$i(t) = \frac{V}{L\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}} e^{-\alpha t} \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t) \quad (14)$$

Curentul are o formă sinusoidală amortizată: oscilează din ce în ce mai slab până când ajunge la zero.

În **regim critic amortizat** nu apar oscilații. Forma curentului este de forma:

$$i(t) = \frac{V}{L} t e^{-\alpha t} \quad (15)$$

Este cel mai rapid mod în care sistemul poate reveni la echilibru fără oscilații, fiind un răspuns stabil.

În **regim supraamortizat** forma generală a curentului este o sumă de două exponențiale:

$$i(t) = \frac{V}{L(s_1 - s_2)} e^{s_1 t} + \frac{-V}{L(s_1 - s_2)} e^{s_2 t} \quad (16)$$

Curentul scade gradual, menținând un semn constant, ceea ce reflectă o disipare lentă și stabilă a energiei în circuit.

Pe baza relațiilor enumerate mai sus și cu ajutorul softului MATLAB- Simulink, utilizat pentru modelarea, simularea și analiza sistemelor dinamice multidomeniu, s-a calculat și reprezentat grafic forma de undă a curentului de excitație. Pentru a putea simula circuitul electric, s-a utilizat librăria Simscape împreună cu blocul “solver”. Parametrii circuitului se regăsesc în tabelul 1.

Tabel 1. Relativ la valorile elementelor de circuit electric

Elemente	C _{circuit} = 1000 μF				L _{circuit} = 200 μH				R _{circuit} = 400 mΩ		
U _c [Vcc]	150	180	210	240	270	300	330	360	400	430	450
I _{max} [A]	191,5	230	268	306	345	383	421	459,5	508,5	548	574,5

În figura 3 se prezintă formele de undă aferente curentului de excitație pentru diferite tensiuni de încărcare. Din grafic se observă că amplitudinea curentului electric crește odată cu creșterea tensiunii de încărcare și de asemenea, amplitudinea componentei negative crește odată cu creșterea componentei pozitive.

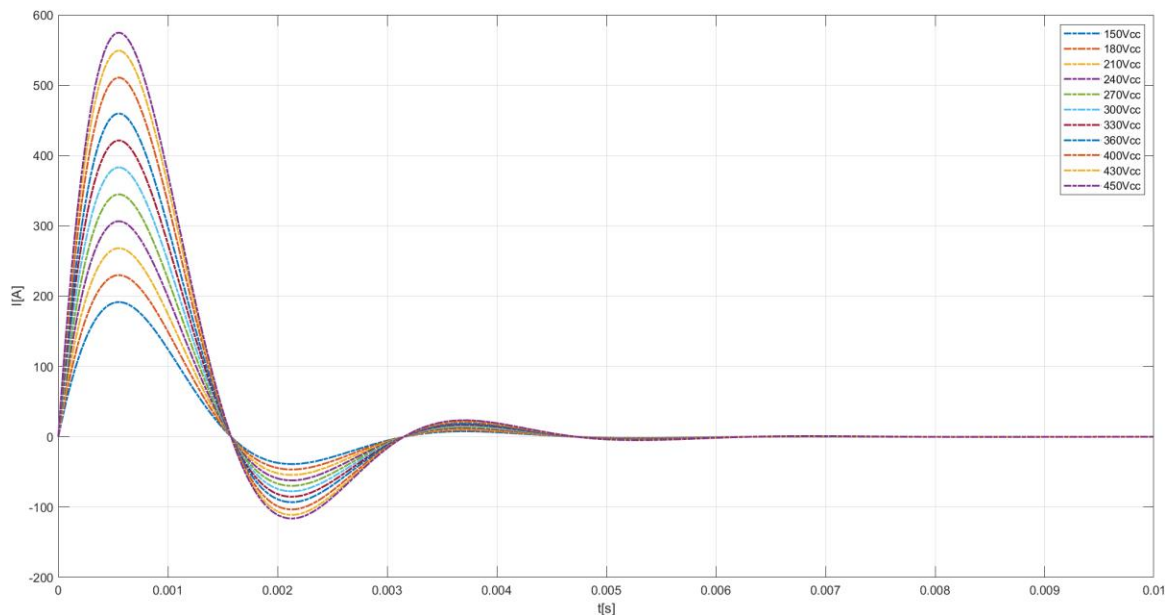


Fig. 3. Formele de undă aferente curentului de excitație pentru diferite tensiuni de încărcare

Circuitul secundar de comandă are rolul de a activa succesiv bobinele, în funcție de poziția proiectilului, detectată prin senzorii optici, declanșând astfel deschiderea elementelor semiconductoare de tip tiristor.

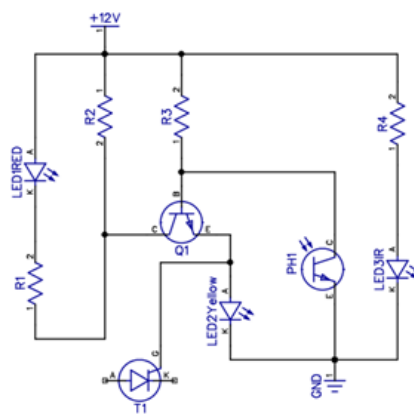


Fig. 4. Circuitul de comandă utilizat pentru descărcarea condensatorului

Conform figurii 4, circuitul folosește semnale de tip ON/OFF (digitale), generate de fototranzistor, în funcție de prezența sau absența proiectilului în dreptul senzorilor optici. Când fasciculul de lumină emis de emițătorul IR este recepționat de fototranzistor, acesta se află în starea ON (semnal logic 1) și funcționează ca un întrerupător închis spre masă, limitând tensiunea din baza tranzistorului. Cele două LED-uri, care au rol de verificare al circuitului, rămân în stare inactivă, iar la poarta tiristorului nu se recepționează niciun impuls. În momentul în care proiectilul întrerupe fasciculul, fototranzistorul își modifică starea și trece pe OFF (semnal 0 logic). Datorită rezistenței R3, care are rol de pull-up (de a menține semnalul la un nivel logic „HIGH”), tranzistorul NPN intră în stare de saturație, permițând astfel conducția curentului între emitor și colector. Cele două LED-uri intră și conducție și indică funcționarea circuitului, iar tiristorul va permite circulația curentului anod-catod, aflându-se în stare activă. Alimentarea a fost făcută separat circuitul de comandă prin intermediul unei surse de curent continuu de 12V. Circuitul de comandă a fost proiectat cu ajutorul softului DIPTRACE.

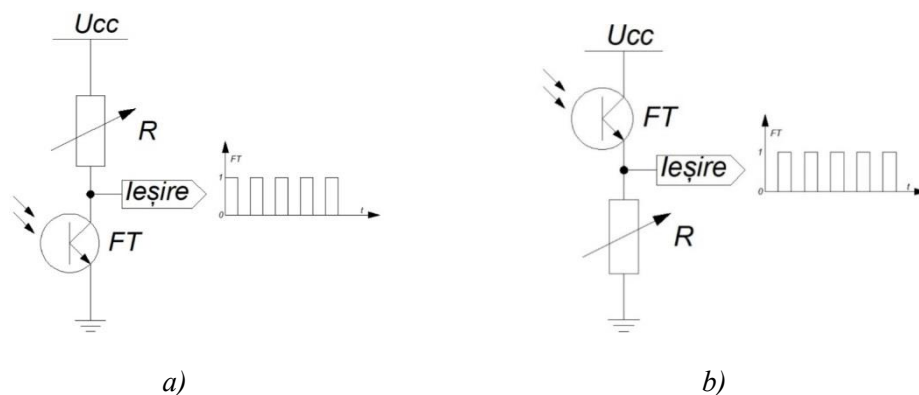


Fig. 5. Mecanismul de ajustare a sensibilității senzorului fotoelectric și stările 1 și 0 ale tranzistorului :
a) circuit normal închis; b) circuit normal deschis

Mecanismul folosit pentru a inversa efectul primului circuit de comandă este ilustrat în figura 5. Se poate observa prezența unui nou rezistor reglabil care are rolul de a ajusta sensibilitatea circuitului la lumină. Astfel, cu cât valoarea rezistenței este mai mare, cu atât curentul prin circuit este mai mic, ceea ce determină o scădere redusă a tensiunii, consecință pentru care sistemul reacționează mai ușor la un nivel mai scăzut al luminii. Dezavantajul modului activ este că fototranzistoarele au un răspuns neliniar la lumină pe măsură ce intensitatea luminii crește peste un anumit nivel, ieșirea lor va crește brusc și apoi se va plafona [5].

3.1.2 Modelarea circuitului magnetic

Ecuațiile lui Maxwell [6] scot în evidență legătura indisolubilă care există între câmpul electric $\vec{E}$ și câmpul magnetic $\vec{B}$ și rolul central pe care îl joacă aceste câmpuri în descrierea fenomenelor electromagnetice. Pentru această lucrare, sunt relevante 2 din cele 4 ecuații:

1. Legea lui Gauss în magnetostatică:

Câmpul magnetic se caracterizează prin linii de câmp închise. Aceasta înseamnă că orice linie de câmp ce intră printr-o suprafață închisă S trebuie să iasă din ea, ceea ce matematic se exprimă prin:

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (17)$$

Fluxul câmpului magnetic printr-o suprafață închisă este egal cu zero.

2. Legea lui Ampere:

Circulația câmpului magnetic $\vec{B}$ pe un contur închis este egală cu produsul dintre constanta universală μ_0 și suma algebrică a curenților încercuiți de conturul de integrare C .

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \cdot \sum_{i=1}^n I_i \quad (18)$$

Dacă conturul de integrare este în interiorul unui conductor prin care circulă un curent a cărui intensitate este dată în funcție de densitatea curentului în diferite puncte ale conductorului, atunci obținem legea lui Ampere în formă integrală:

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad (19)$$

Aceste ecuații sunt aplicabile spațiului vid. În mediile magnetice μ_0 trebuie înlocuit cu $\mu = \mu_0 \mu_r$.

Tratarea ecuației de mișcare

Pentru situațiile abordate în această lucrare, ecuația de mișcare se scrie:

$$m \cdot \frac{d^2}{dt^2} = F\left(r, \frac{dr}{dt}, J^i, I\right) + G \quad (20)$$

Unde:

m – masa plonjorului;

G – greutatea;

F – forța produsă de câmpul magnetic al solenoidului și depinde de poziția plonjorului, r ;

$\frac{dr}{dt}$ – viteza;

J^i – densitatea curentului de excitație;

I – polarizarea magnetică.

Cunoscând vectorul de poziție r_1 și viteza v_1 , forța F_1 poate fi calculată la momentul t_1 . Soluția relației anterioare pentru pasul de timp Δt începe prin a admite că forța la momentul

$$t_2 = t_1 + \Delta t \text{ este } F_2^{(0)} = F_1 \quad (21)$$

Prin presupunerea că forța magnetică variază liniar în intervalul de timp $[t_1, t_2]$, expresia forței devine:

$$F(t) = F_1 + (F_2^{(0)} - F_1) \cdot \frac{t - t_1}{\Delta t} \quad (22)$$

Ecuatiile vitezei și a vectorului de poziție la momentul t_2 sunt:

$$v_2 = v_1 + (F_2^{(0)} - F_1) \frac{\Delta t}{2m} \quad (23)$$

$$r_2 = r_1 + v_1 \Delta t + (F_2^{(0)} - F_1) \frac{\Delta t}{6m} \quad (24)$$

Modelarea numerică a dispozitivului electromagnetic s-a realizat cu ajutorul programului FEMM 4.2, soft ce permite rezolvarea problemelor bidimensionale în domeniile plan și axisimetric utilizând metoda elementului finit. Am ales o problemă axisimetrică, magnetostaționară și frecvență nulă. De-a lungul studiului, s-au experimentat diferite configurații pentru a vedea evoluția forței de atracție prin modificarea materialelor și a parametrilor electrici.

Calculul forței ce acționează asupra părții mobile, se face cu ajutorul tensorului de stres Maxwell. Teoria lui Maxwell presupune existența unei forțe ce acționează pe unitatea de arie unde acționează un câmp magnetic [8]. Forța rezultantă are expresia :

$$dF = \frac{1}{2} [H(B \cdot n) + B(H \cdot n) - (H \cdot B) \cdot n] \quad (25)$$

unde n reprezintă normala la suprafață într-un punct de interes. Valoarea forței se obține integrând de-a lungul unui contur aflat în apropierea părții mobile. Pentru a obține rezultate precise se impune folosirea unui mesh dens.

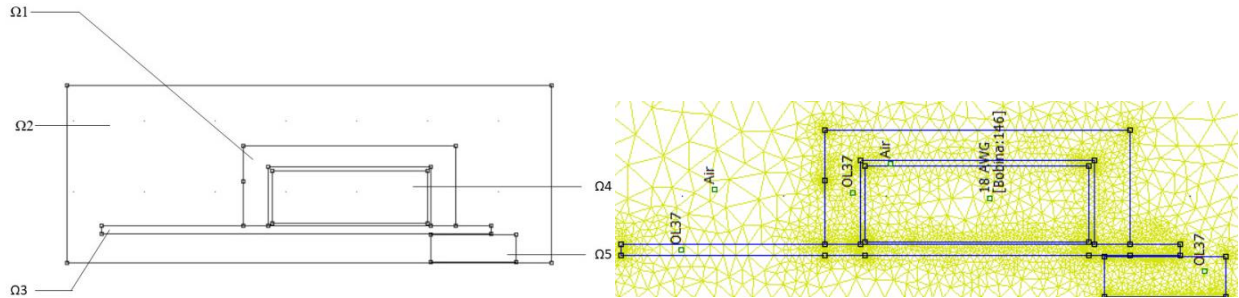


Fig. 6. Domeniile definite în modulul preprocesor și rețeaua de discretizare a geometriei propuse

Pentru geometria propusă s-au stabilit următoarele domenii:

Ω_1 - reprezintă secțiunea transversală carcasi feromagnetice, caracterizată de dependența neliniară $\vec{B} = f(\vec{H})$;

Ω_2 - reprezintă aerul din afara sistemului de propulsie, caracterizat de permeabilitatea magnetică μ ;

Ω_3 - reprezintă secțiunea transversală a tubului, caracterizat de dependența neliniară $\vec{B} = f(\vec{H})$;

Ω_4 - reprezintă secțiunea transversală a bobinei, caracterizată de densitatea de curent $\vec{j}$;

$\Omega 5$ – reprezintă secțiunea plonjorului, caracterizat de dependența neliniară $\vec{B}=f(\vec{H})$ sau de permeabilitatea μ și orientarea magnetului;

Tabel 2. Proprietățile materialelor utilizate în problema mangetică

Domeniu	Material	Parametri și valori
$\Omega 1$	Oțel laminat OL37	Caracteristică $B=f(H)$ (vezi figura 7)
	Aer	Permeabilitate $\mu_r=1$; $\mu_z=1$
$\Omega 2$	Aer	Permeabilitate $\mu_r=1$; $\mu_z=1$
$\Omega 3$	Oțel laminat OL37	Caracteristică $B=f(H)$ (vezi figura 7)
	Alamă	Permeabilitate $\mu_r=1$; $\mu_z=1$
$\Omega 4$	Conductor cupru 18 AWG	Diametru 1mm, Număr spire 146sp
$\Omega 5$	Magnet permanent N48	Coercivitatea $H_C= 994529$ A/m Permeabilitate $\mu_r=1,05$; $\mu_z=1,05$
	Oțel laminat OL37	Caracteristică $B=f(H)$ (vezi figura 7)

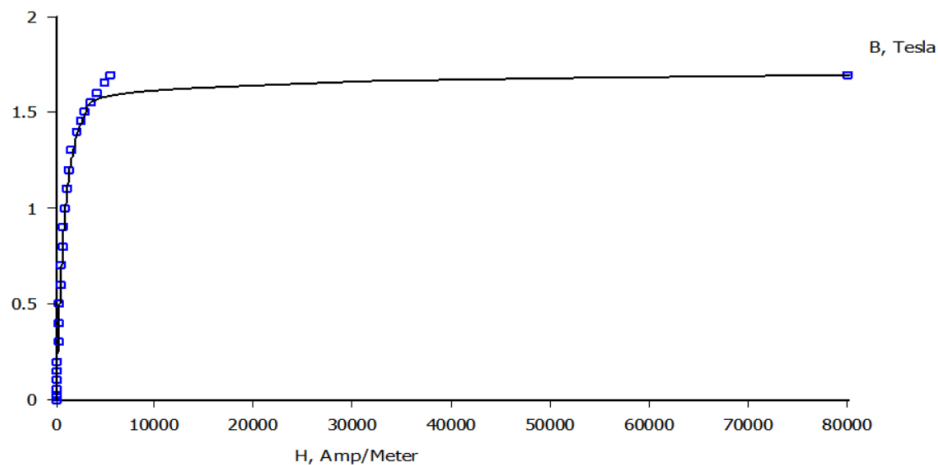


Fig. 7. Caracteristica $B=f(H)$ a oțelului laminat OL37

În prima iterație a sistemului este utilizat ca proiectil un magnet cilindric din neodim N48, cu polul nord orientat spre interiorul bobinei, iar curentul electric care parcurge spirele bobinei are valoarea de 100A. Materialul din care este confecționată tija de lansare a proiectilului este alama, aceasta fiind un material nemagnetic. În urma simulării FEMM, forța exercitată asupra plonjorului este de 25N.

Dezavantajul principal al acestui model experimental îl constituie polarizarea proiectilului. Poziționarea cu o polaritate de același sens față de cea a bobinei duce la apariția unei forțe de respingere. Astfel, la cea de-a 2-a iterație a modelului, am utilizat un proiectil din oțel laminat. Cu același curent de 100A, am obținut o forță de doar 16,7N. Pentru realizarea modelului experimental, am constatat că, schimbând materialul tubului de cu unul feromagnetic, am obținut un rezultat favorabil cu o forță de atracție de 20N.

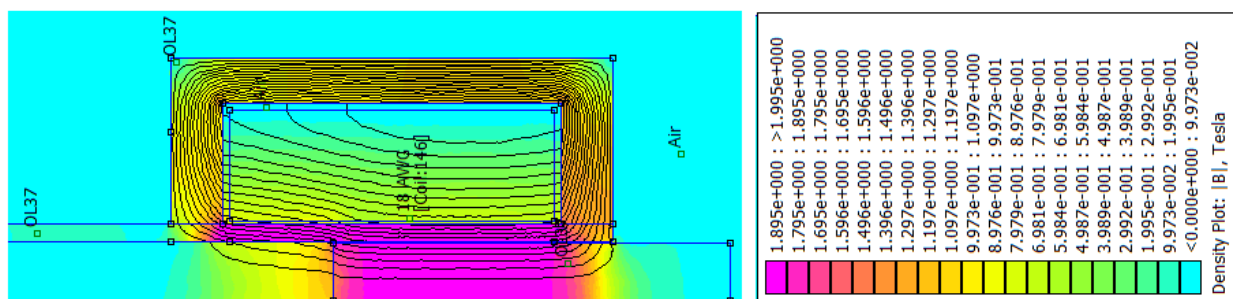


Fig. 8. Distribuția liniilor de câmp magnetic produs de bobină

Pentru simularea forței aplicate proiectilului, la un curent constant, se deplasează proiectilul și se măsoară forța în diferite puncte. Pentru a deplasa proiectilul cu un pas de 1 mm, s-a utilizat un script Lua. Proiectilul pleacă din poziție de repaus cu vârful la intrarea în bobină. Se observă pentru toate cazurile din figura de mai jos că valoarea maximă a forței se situează după 10 mm, adică la mijlocul bobinei. Forța de atracție are aceeași valoare cu forța de respingere în cazul unui curent constant, iar cu cât crește lungimea proiectilului, cu atât va fi mai înfrânat odată cu trecerea vârfului plonjorului de mijlocul bobinei.

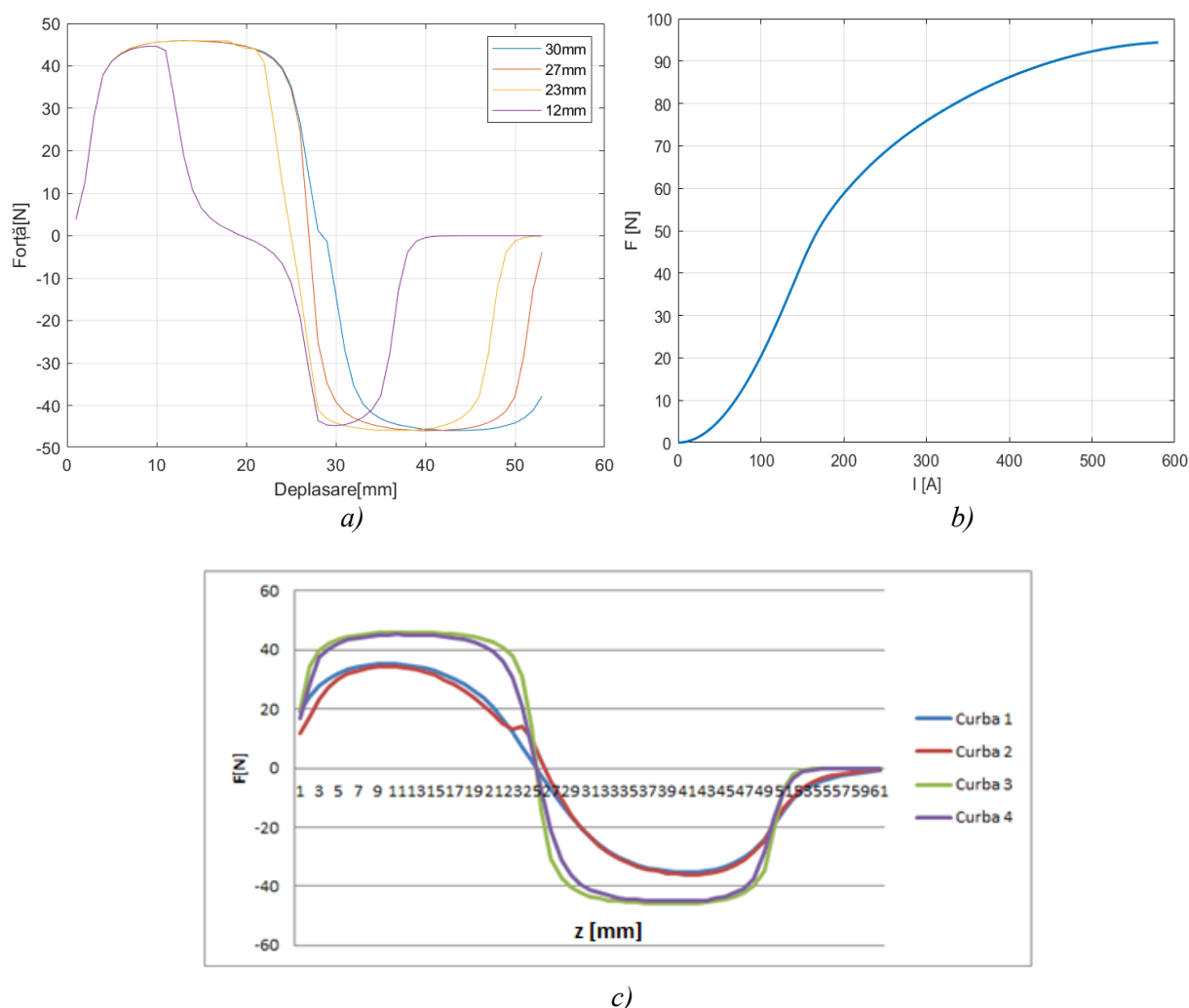
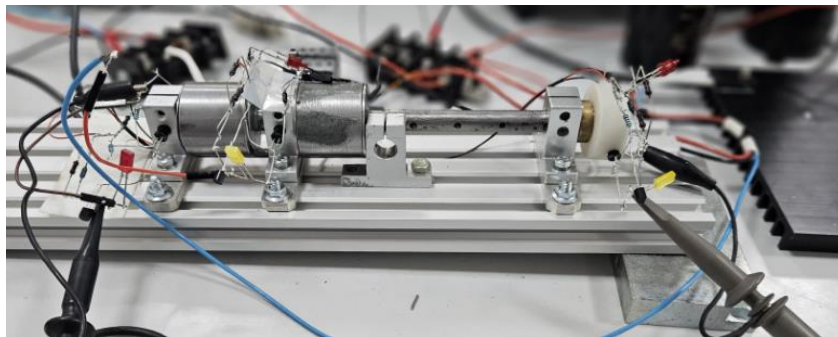


Fig. 9. Forța exercitată de plonjor pentru cazul în care lungimea plonjorului este variată (a), pentru cazul în care curentul prin bobină este variat (b) și cazul în care materialul de tub și carcasă variază (c)

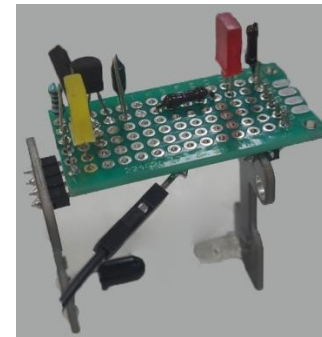
Conform simulărilor efectuate, în figura 9 (a) se prezintă variația forței exercitate de plonjor atunci când este variată lungimea acestuia, curentul prin bobină fiind constant. Figura 9 (b) prezintă variația forței dezvoltate de plonjor atunci când curentul prin bobină este variat, dar proiectilul stă în repaus. Se observă faptul că pe măsură ce curentul prin bobină crește, forța dezvoltată de plonjor crește. În figura 9 (c) s-au reprezentat următoarele curbe: curba 1- tub nemagnetic, carcasă electromagnet nemagnetică; curba 2- tub magnetică, carcasă electromagnet nemagnetică; curba 3- tub magnetic, carcasă electromagnet magnetică; curba 4- tub nemagnetic, carcasă electromagnet magnetică. Din grafic se observă că cea mai mare forță s-a obținut pentru curba 3.

3.2 Realizarea și testarea modelului experimental de lansator electromagnetic

Pe baza rezultatelor obținute pe cale computerizată și a desenului prezentat în figura 1 s-a realizat un model experimental de lansator electromagnetic prezentat în figura 10. Aceasta s-a realizat într-o construcție modulară astfel încât să fie testat în diferite configurații.



a)



b)

Fig. 10 Modelul experimental de lansator electromagnetic: a) circuitul electromagnetic și circuitul principal; b) bariera optică- circuitul secundar de comandă.

Montajul de testare a modelului experimental se regăsește în figura 11. Pentru alimentarea condensatorului (9), este utilizat un autotransformator (1) ce este conectat la rândul său la un transformator ridicător de tensiune (2) pentru a obține tensiuni de încărcare de până la 450V, valoarea nominală a condensatoarelor (9) utilizate în încercări. Pentru obținerea unui curent continuu am utilizat o punte redresoare (10). Ca elemente de comutație, sunt folosite un întreruptor de curent alternativ în amonte de puntea redresoare și un întreruptor de curent continuu în aval. Pentru probele efectuate cu o singură bobină s-a folosit un contactor (7) pentru descărcarea condensatorului pe bobină. Tensiunea de încărcare a condensatorului s-a măsurat cu ajutorul voltmetrului digital (8). În serie cu bobina, este introdus un șunt (4) ($R_s = 5,65 \text{ m}\Omega$) pentru a vizualiza formele de curent pe osciloscop (3). Testele inițiale au fost efectuate cu o singură bobină, urmând ca în a doua parte a încercărilor să introducem încă una pentru a compara rezultatele. Pentru a determina experimental viteza de deplasare a proiectilului s-a realizat o reprezentare grafică a variației în timp a tensiunii, utilizând două circuite de comandă, unul clasic asemenea celui explicat și unul asemănător, a cărui logică de detecție am inversat-o eliminând rezistența de pull-up. Cele două au rolul de a monitoriza trecerea obiectului propulsat prin tubul de lansare, primul detectând intrarea corpului în sistemul de propulsie, iar cel din urmă observând ieșirea proiectilului din sistem. Tensiunea de alimentare a circuitelor de comandă a fost furnizată de două surse de alimentare (11)

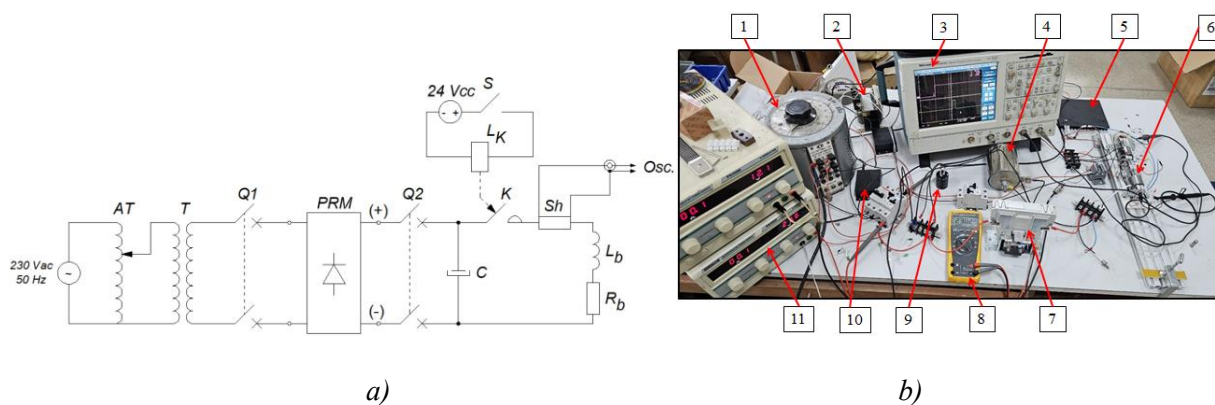
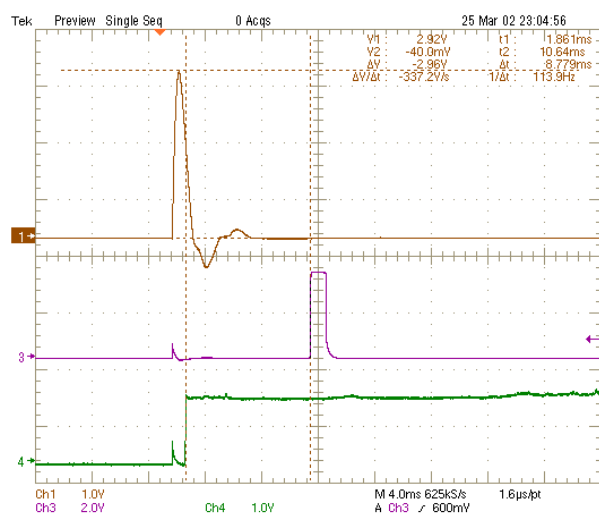


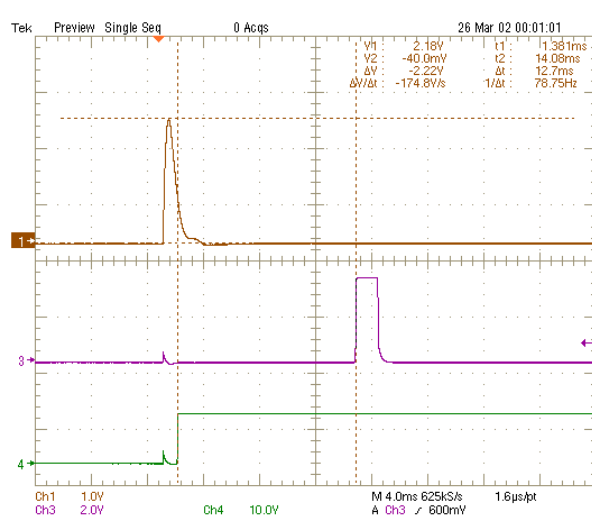
Fig. 11. Montajul realizat pentru testarea modelului experimental de lansator electromagnetic:
a) schema electrică; b) vederea de ansamblu.

În figura 11 (a) s-au utilizat următoarele notații: AT- Autotransformator 0-230 Vca; T- Transformator 230/140 Vca; PRM - Punte redresoare monofazată; Q1 - Întrepritor automat de curent alternativ; Q2 - Întrepritor automat de curent continuu; K - Contactor electromagnetic; C - Condensator electrolitic 450Vcc; Sh - Șunt coaxial; L_K - Bobina contactorului K; Osc - Osciloscop digital; L_b - Inductivitatea bobinei; R_b - Rezistența bobinei; S - Comutator alimentare bobină contactor K. Ulterior, după calibrarea circuitului de curent intens, contactorul electromagnetic K (7) a fost înlocuit cu un tiristor (5) a cărui comandă s-a realizat cu circuitul prezentat în figurile 4 și 10 (b).

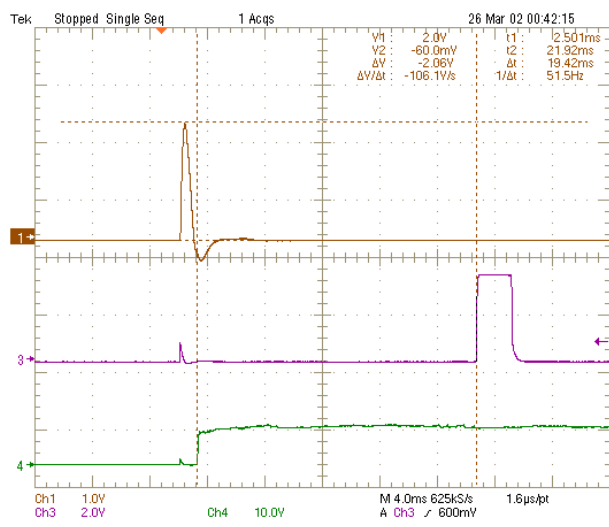
În oscilogramele din figura 12 se prezintă comportamentul celor două circuite, principal și secundar, prin reprezentarea formelor de undă achiziționate cu ajutorul unui șunt coaxial, a unor sonde de tensiune și a unui osciloscop digital TEKTRONIX. Forma curentului de descărcare s-a achiziționat pe canalul CH1. Graficul de pe canalul CH3 reprezintă rezultatul experimental al circuitului de comandă simplu, care, la trecerea proiectilului, transformă semnalul logic din 0 în 1 și marchează ieșirea acestuia din tubul modelului experimental. Canalul CH4 figurează funcționalitatea celui de-al doilea circuit și totodată momentul lansării. Se poate observa cursorul, care are rolul de a determina timpul de parcurgere al proiectilului.



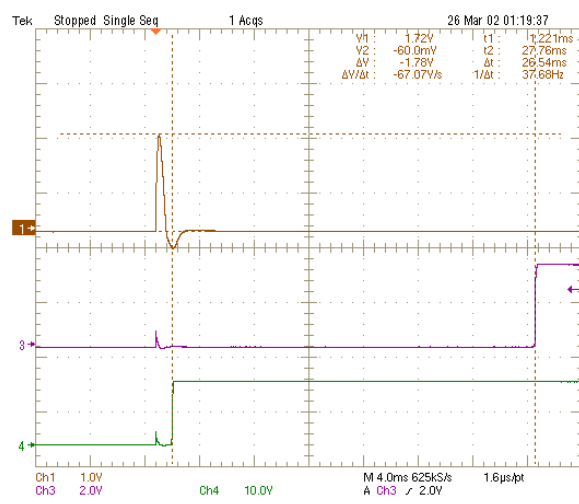
a)



b)



c)



d)

Fig. 12. Oscilogrammele înregistrate pentru diferite capacități:
a) $C=1000\ \mu\text{F}$; b) $C=680\ \mu\text{F}$; c) $C=470\ \mu\text{F}$; d) $C=330\ \mu\text{F}$.

3.3 Interpretarea rezultatelor obținute în urma testelor

În *tabelul 3* regăsim valorile pentru fiecare tensiune la care a fost testat condensatorul de $1000\ \mu\text{F}$. În urma efectuării testelor. Tensiunea de alimentare pentru care s-a obținut cea mai mare viteză a fost 420V , pentru valoarea de 450V viteza a scăzut, dar infim. Acest lucru se poate datora saturației circuitului magnetic. În *figura 13* se regăsesc formele de curent pentru toate încercările importate și suprapuse pe un singur grafic.

Tabel 3. Valori experimentale pentru diferite tensiuni

C [μF]	$U_C [\text{Vcc}]$	$\Delta X [\text{mm}]$	$\Delta t [\text{ms}]$	$\Delta V [\text{V}]$	I [A]	$v_m [\text{m/s}]$
1000	150	220	20,3	1,06	187,6	10,8
	180		17,02	1,28	226,5	12,9
	210		15,18	1,44	254,8	14,5
	240		14,06	1,66	293,8	15,64
	270		11,9	1,92	339,8	18,48
	300		11,26	2,14	378,7	19,5
	330		10,62	2,38	421,2	20,7
	360		9,8	2,56	453	22,4
	400		8,7	2,8	495,5	25,2
	420		8,29	3	531	26,5
	450		8,37	3,18	562,8	26,2

Au fost testate condensatoare cu diferite capacități alimentate pe rând la aceeași tensiune. S-a constatat experimental că scăzând capacitatea, scade și curentul de vârf generat de descărcarea condensatoarelor. Valorile pentru fiecare condensator se regăsesc în *figura de mai jos* alături de *tabelul 4*.

Tabel 4. Valori experimentale diferite capacități

C [μ F]	U _C [Vcc]	ΔX [mm]	Δt [ms]	ΔV [V]	I [A]	v _m [m/s]
330	400	230	8,77	1,72	305	8,5
470			19,4	2,06	365	11,8
680			12,7	2,22	393	18
1000			8,77	2,96	524	26

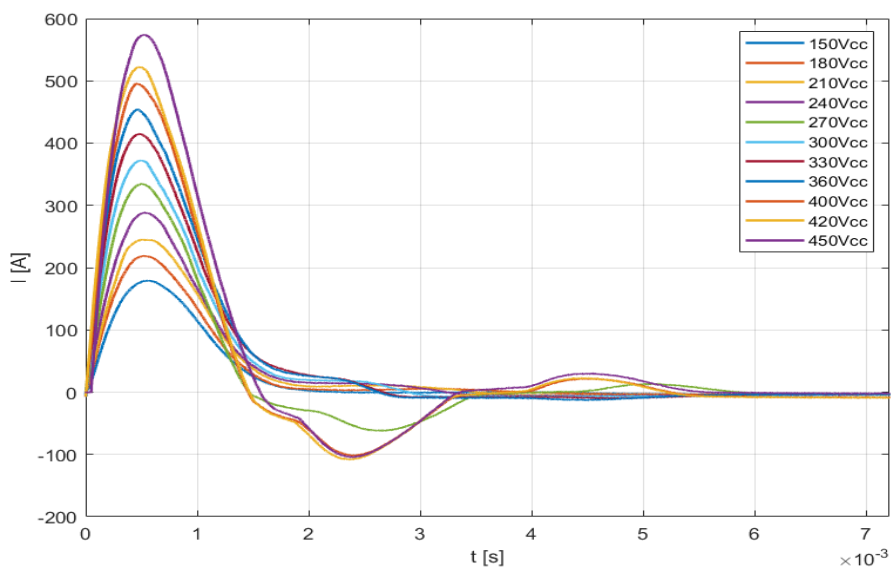


Fig. 13. Oscilogrammele curentilor de excitație măsurate cu osciloscopul la diferite tensiuni de încărcare

Un alt test important l-a constat poziționarea plonjorului la intrarea bobinei. Se constată faptul că rezultatul cel mai optim, conform tabelului 5, este obținut atunci când distanța x , care caracterizează cât de mult este introdus proiectilul în bobină, este de 19,5 mm. Lungimea totală a plonjorului este de 27mm.

Tabel 5. Valori experimentale pentru diferite poziții ale plonjorului

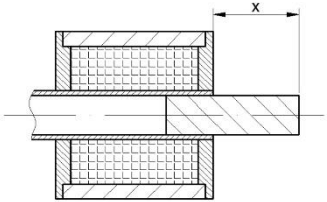
x [mm]	ΔX [mm]	C [μ F]	Δt [ms]	v _m [m/s]	
18,5	230	1000	8,29	27,74	
19,5			8,139	28,25	
20,5			8,219	27,98	
21,5			8,379	27,44	
22,5			8,699	26,43	
23,5			9,259	24,84	
24,5			9,899	23,23	

Fig. 14 Secțiunea bobinei și a plonjorului

Tabelul 6 prezintă rezultatele obținute în urma încercărilor efectuate pe un montaj experimental bazat pe existența a două bobine. De asemenea, este schimbată și poziția senzorului optic. Se constată faptul că viteza de deplasare a proiectilului este superioară cazului în care montajul este prevăzut cu o singură bobină de propulsie.

Tabel 6. Valori experimentale pentru încercări cu 2 bobine.

U _C [Vcc]	Δt [ms]	ΔX [mm]	C ₁ [μ F]	C ₂ [μ F]	m* [mm]	p* [mm]	v [m/s]
----------------------	-----------------	-----------------	---------------------------	---------------------------	---------	---------	---------

380	8,32	200	1000	0	50	0	24
	6,08			1000		0	32,9
	6,56			1000		2	30,48
	6,72			1000		4	29,7
	7,04			1000		6	28,4

* vezi figura 1.

4.Concluzii

În urma simulărilor și a testelor realizate pe modelul experimental de lansator electromagnetic s-a constatat că cea mai mare viteză s-a obținut pentru un lansator al cărui circuit magnetic este realizat integral din oțel laminat de tip OL37 și a cărui bobină este excitată cu un curent de 500 A obținut prin descărcarea unui condensator de 1000 μF și încărcat la o tensiune de 450 Vcc. S-a constatat că metoda de comandă optică utilizată este suboptimală, din cauza poziționării senzorului la o distanță prea mare față de intrarea bobinei, ceea ce determină o activare prematură a acesteia și o descărcare inefficientă a condensatorului. Materialul circuitului magnetic este esențial în generarea forței de atracție. Înlocuirea oțelului laminat ce are inducția magnetică de saturație de 1,5-1,7 T cu un aliaj de tip Fe49Co49V2 [9] care are 2,1-2,2 T, permite obținerea unor forțe ridicate la curenți de peste 300A. De asemenea, s-a constatat experimental că scăzând capacitatea condensatorului care excită bobina, valoarea de vârf a curentului scade chiar dacă a fost folosită aceeași tensiune de încărcare. Poziția inițială a proiectilului s-a dovedit a fi un parametru cheie pentru obținerea vitezei maxime. Prin rezultatelor obținute și prezentate în acest articol se creează premisele necesare pentru continuarea acestui proiect de cercetare în vederea măririi vitezei de deplasare a proiectului cu un ajutorul unui lansator electromagnetic compact.

5.Bibliografie:

- [1] Vlad, "Tunul electromagnetic (Tunul Gauss)," *Hobber.ro*, Jan. 08, 2024.
<https://www.hobber.ro/blog/tunul-electromagnetic-tunul-gauss/>
- [2] Muhammad Usama Manzoor, H. Asif, Shoaib-Ur-Rehman, and T. Abbas, "Split coil based design of a coilgun," Dec. 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/icet.2017.8281739>.
- [3] T. Cona, "Capacitor Discharge Current Theory."
<https://www.ecicaps.com/wp-content/uploads/Capacitor-Discharge-Current-Theory.pdf>
- [4] M. Sabău "Circuit oscilant,"
http://msabau.xhost.ro/?Fizic%E3:Curentul_alternativ:Circuit_oscilant
- [5] Karl, "Using Phototransistors," *g7smy.co.uk*, Sep. 26, 2017.
<https://www.g7smy.co.uk/2017/09/using-phototransistors/>
- [6] G. Cristea, I. Ardelean, "Elemente fundamentale de fizică," Ed. Dacia, Cluj-Napoca, 1985.
- [7] "Adams-Bashforth and Adams-Moulton methods - Wikiversity," *en.wikiversity.org*.
https://en.wikiversity.org/wiki/Adams-Bashforth_and_Adams-Moulton_methods
- [8] D Meeker, "Finite Element Method Magnetism Version 4.2 User's Manual," May 16, 2020
- [9] T. Riipinen, S. Metsä-Kortelainen, T. Lindroos, J. S. Keränen, A. Manninen, and J. Pippuri-Mäkeläinen, "Properties of soft magnetic Fe-Co-V alloy produced by laser powder bed fusion," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 25, no. 4, pp. 699–707, May 2019, doi: <https://doi.org/10.1108/rpj-06-2018-0136>.