

10.1. CÂMPUL MAGNETIC AL CURENTULUI ELECTRIC

1. Existența unei legături între fenomenele magnetice și cele electrice.

a) Hans Christian Oersted a arătat experimental, în 1820, deviația acului magnetic în apropierea unui conductor străbătut de curent electric.

b) Experimentele pun în evidență deviația acului magnetic, sau a unui conductor mobil parcurs de curent electric, în apropierea unui magnet sau a unui conductor parcurs de curent electric.

2. Acțiunea magnetică. Câmpul magnetic.

a) Un magnet are aceeași acțiune asupra unui conductor mobil parcurs de curent electric, ca și un conductor prin care trece curent.

Acastă acțiune este numită acțiune magnetică. Ea este posibilă datorită existenței în jurul magnetilor, ca și în jurul curenților electrice, a unei forme speciale de existență a materiei.

b) Numim câmp magnetic acea formă de existență a materiei care se manifestă prin acțiunea asupra acului magnetic sau asupra conductoarelor parcurse de curent electric.

Acastă formă de existență a materiei "diferă" de aceea de substanță.

3. Liniile de câmp magnetic. Spectrul magnetic.

Spectrul magnetic reprezintă forma liniilor de câmp.

a) Experimental pot fi vizualizate efectele cîmpului magnetic asupra piliturii de fier, obținându-se o configurație asemîntă spectrului cîmpului magnetic.

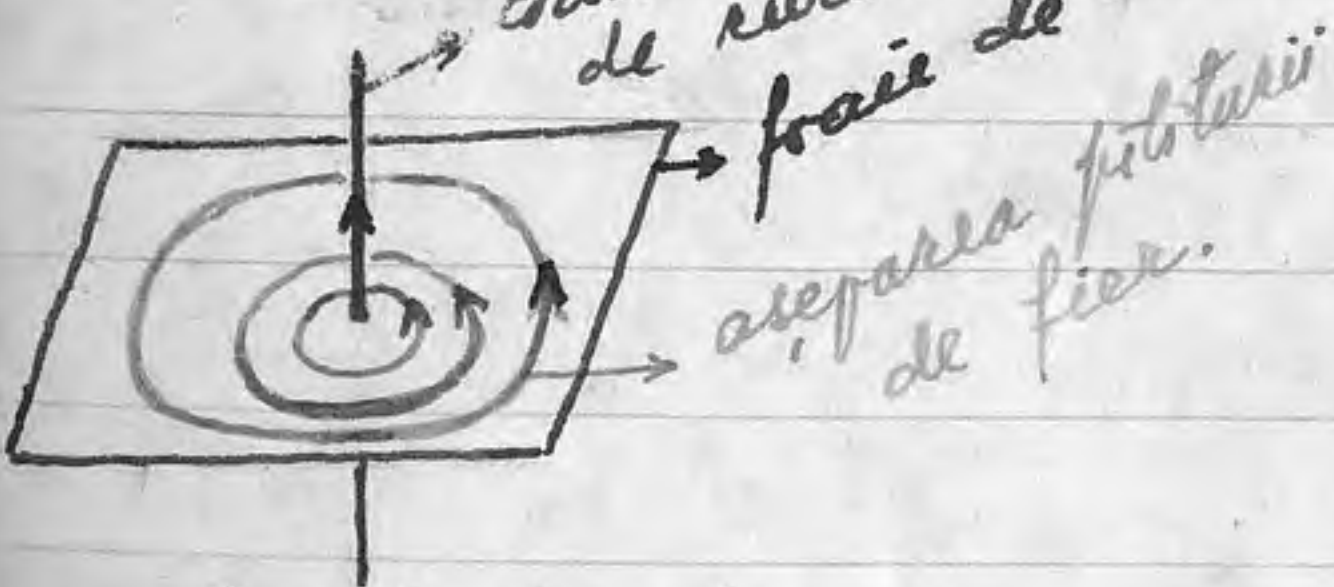
b) În spectru sînt puse în evidență existența unor linii de-a lungul cărora se exercită acțiunea magnetică, asemîntă liniilor de cîmp magnetic. Ele sînt linii închise.

c) Experimenta arată că un ac magnetic mobil plasat într-un punct al cîmpului magnetic se orientează întotdeauna pe direcția tangentei la linia de cîmp ce trece prin acel punct.

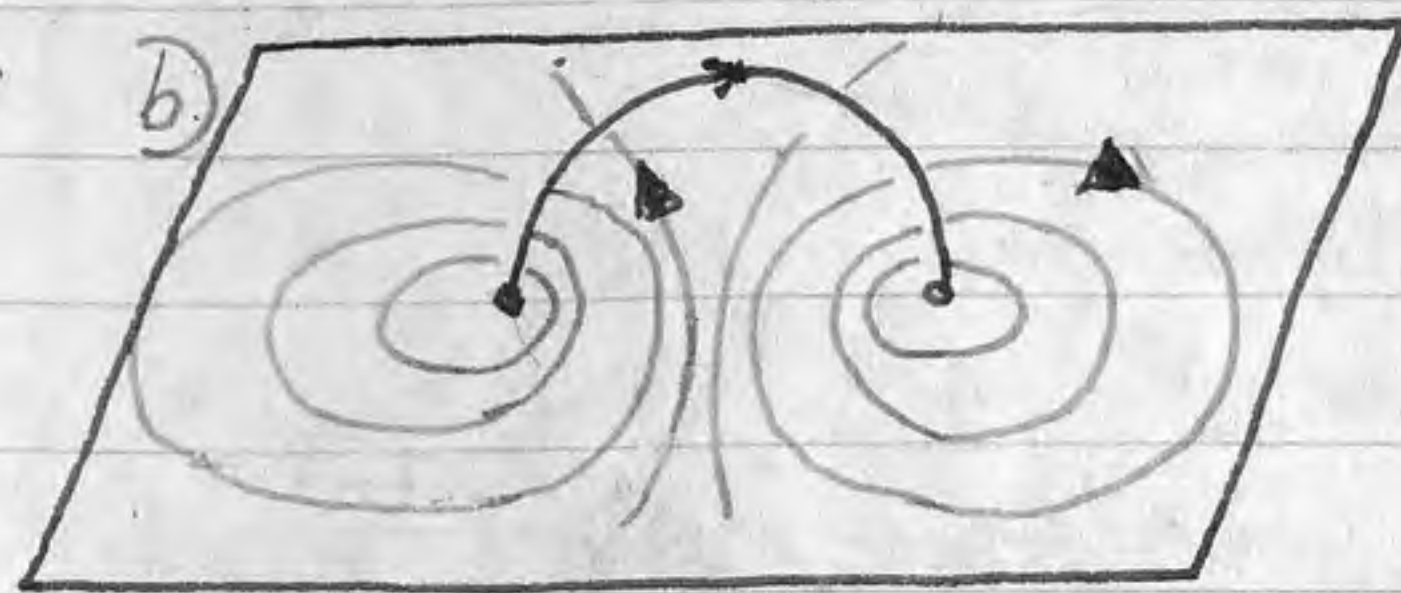
d) Se admite că prin orice punct al cîmpului magnetic trece o linie de cîmp, și numai una (deci liniile cîmpului nu se intersectează).

4. Dependența aspectului spectrului magnetic de forma circuitului generator de cîmp (sau a magnetului)

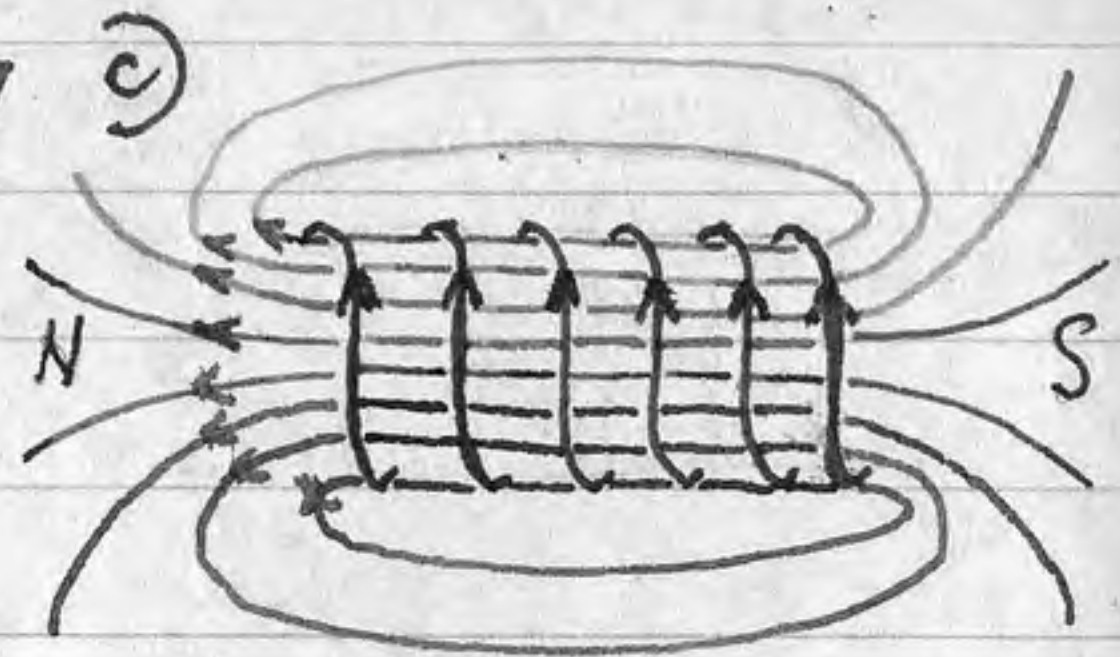
a) Liniile de cîmp sînt cercuri cu centrele pe conductor, în plane perpendiculare pe conductor.



Conductor traversat.



Conductor circular



Solenoid

5. Cîmpul magnetic uniform.

Este un cîmp magnetic ale cărui linii de cîmp sînt paralele și echidistante.

Exemple: în interiorul unui solenoid parcurs de curent, sau prea aproape de marginii (de fațetură).

6. Sensul liniilor de cîmp magnetic.

a) Realizînd spectrul cîmpului magnetic produs de un curent electric, vizualizat cu pilitură de fier, și plasînd într-un punct al cîmpului un ac magnetic foarte sensibil, acesta se așază tangent la linia de cîmp ce trece prin punct.

b) Schimbînd sensul curentului electric generator de cîmp, acșorul se așază tot tangent la linia de cîmp, dar cu polul nord orientat în sens opus față de situația anterioară.

c) Rezultă existența unui sens al liniilor de cîmp magnetic și dependența sa de sensul curentului generator de cîmp.

d) Convențional, se consideră că sensul liniei de cîmp magnetic este indicat de polul nord al acului magnetic tangent la acea linie de cîmp. Linia de cîmp iese din polul nord și intră în polul sud.

7. Reguli practice pentru stabilirea sensului liniei de câmp magnetic.

a) Regula burghiului pentru câmpul curentului liniar: este sensul de rotație a burghiului, așezat de-a lungul conductorului, pentru a înainta în sensul curentului.

b) Regula burghiului pentru conductorul circular: este sensul de înaintare a burghiului așezat perpendicular pe planul spirei circulare, dacă este rotit în sensul înfășurării din spirală.

c) Regula burghiului pentru spirală folosește și pentru a stabili sensul liniei de câmp magnetic al solenoidului parcurs de curent electric.

d) Regula de la (a) poate fi aplicată fără modificări și în cazurile (b) și (c). Corect?

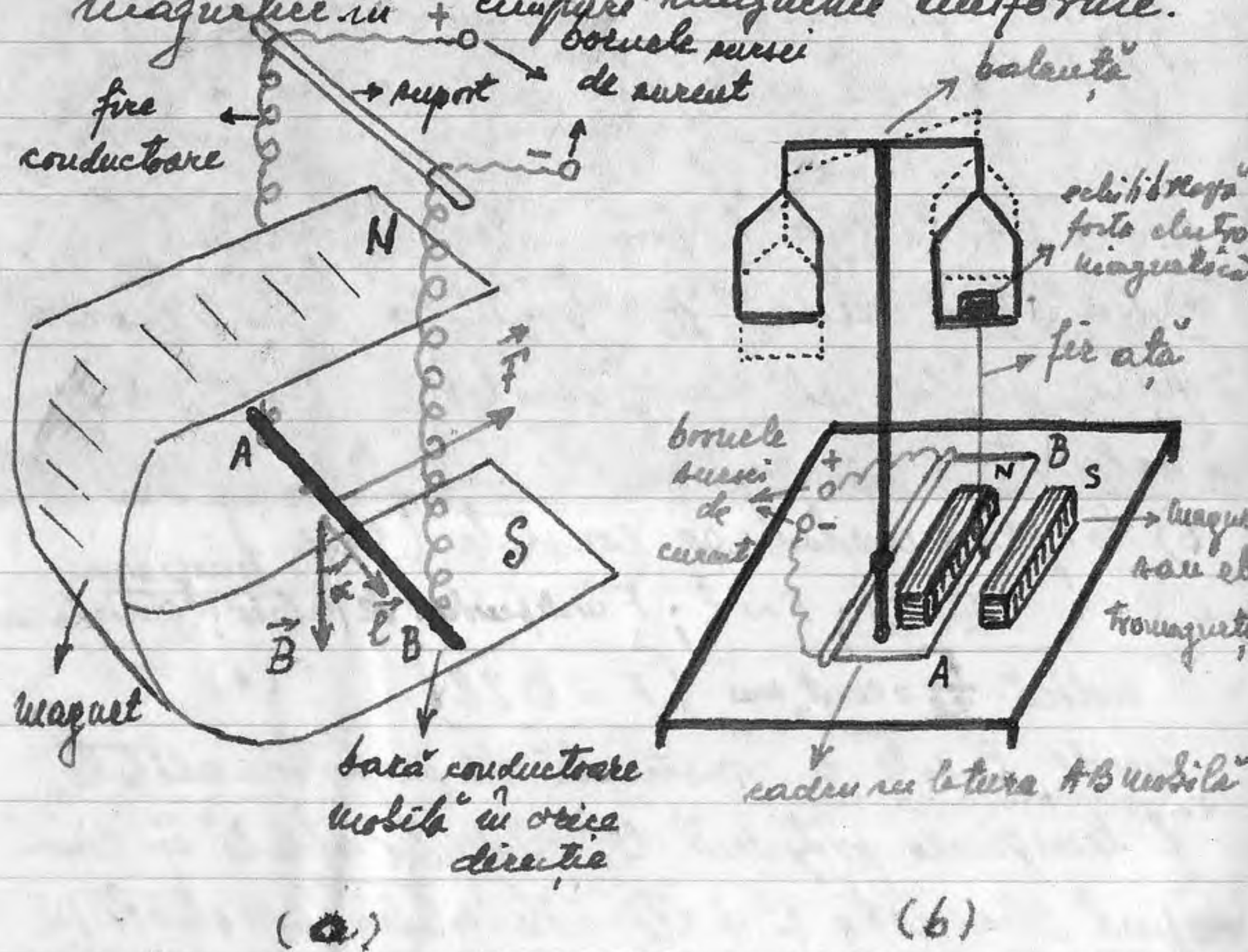
10.2. FORȚA ELECTROMAGNETICĂ. INDUCȚIA MAGNETICĂ

ÎN CÂMPURI MAGNETICE UNIFORME

1. Definiția forței electromagnetice.

Este forța care determină acțiunea magnetică, adică deviația conductorului mobil parcurs de curent electric, de către un magnet sau un alt conductor prin care trece curent electric.

2. Dispozitive experimentale pentru studierea forței electromagnetice în câmpuri magnetice uniforme.



3. Direcția și sensul forței electromagnetice.

a) Experimentele făcute cu dispozitivul din fig. (a) pun în evidență (cum?) că bara AB de lungime l (din aluminiu) perpendiculară pe liniile de câmp ($\alpha = 90^\circ$) este deviată la trecerea curentului cu o forță F a cărei direcție este perpendiculară pe planul

determinat de AB cu direcția liniilor de câmp (NS), sensul lui \vec{F} fiind dependent atât de sensul curentului prin AB, cât și de sensul liniilor câmpului magnetic.

b) Sintetizând rezultatele experimentale, sensul lui \vec{F} este dat de regula mîinii stîngi:

În așa fel mîna stîngă astfel ca liniile de câmp să intre în palmă, cele patru degete să arate sensul curentului prin conductorul AB, degetul mare îndreptat va indica atunci sensul forței care deriază pe AB.

4. Modulul F al forței electromagnetice \vec{F} .

a) Poate fi măsurat prin greutatea corpurilor care puse pe talerul din figura (b), reechilibrează balanta.

Aici l reprezintă o chiușă
care are a suspensiei care
susține porțiunea de conductor
din conductor.

b) Experimental se constată (cum?):

$$F \propto I; \quad F \propto l;$$

F independent de lungimea conductorului, grosimea, sau natura lui.

Așadar,
$$F = B I l \quad (1)$$

unde: B este o constantă de proporționalitate;
 l lungimea porțiunii de conductor aflată în câmp;
 I intensitatea (constantă) a curentului din conductor;

5. Interpretarea fizică a constantei de proporționalitate B .

a) Din (1) scriem:
$$B = \frac{F}{I l} \quad (2)$$

Cum F, I și l sînt măsurabile experimental,

7. Reguli practice pentru stabilirea sensului liniilor de câmp magnetice.

a) Regula burghiului pentru câmpul curentului liniar: este sensul de rotație a burghiului, așezat de-a-burgul conductorului, pentru a înainta în sensul curentului.

b) Regula burghiului pentru conductorul circular: este sensul de înaintare a burghiului așezat perpendicular pe planul spirii circulare, dacă este rotit în sensul întorsurii din spirală.

c) Regula burghiului pentru spirală folosește și pentru a stabili sensul liniilor de câmp magnetice al solenoidului parcurs de curent electric.

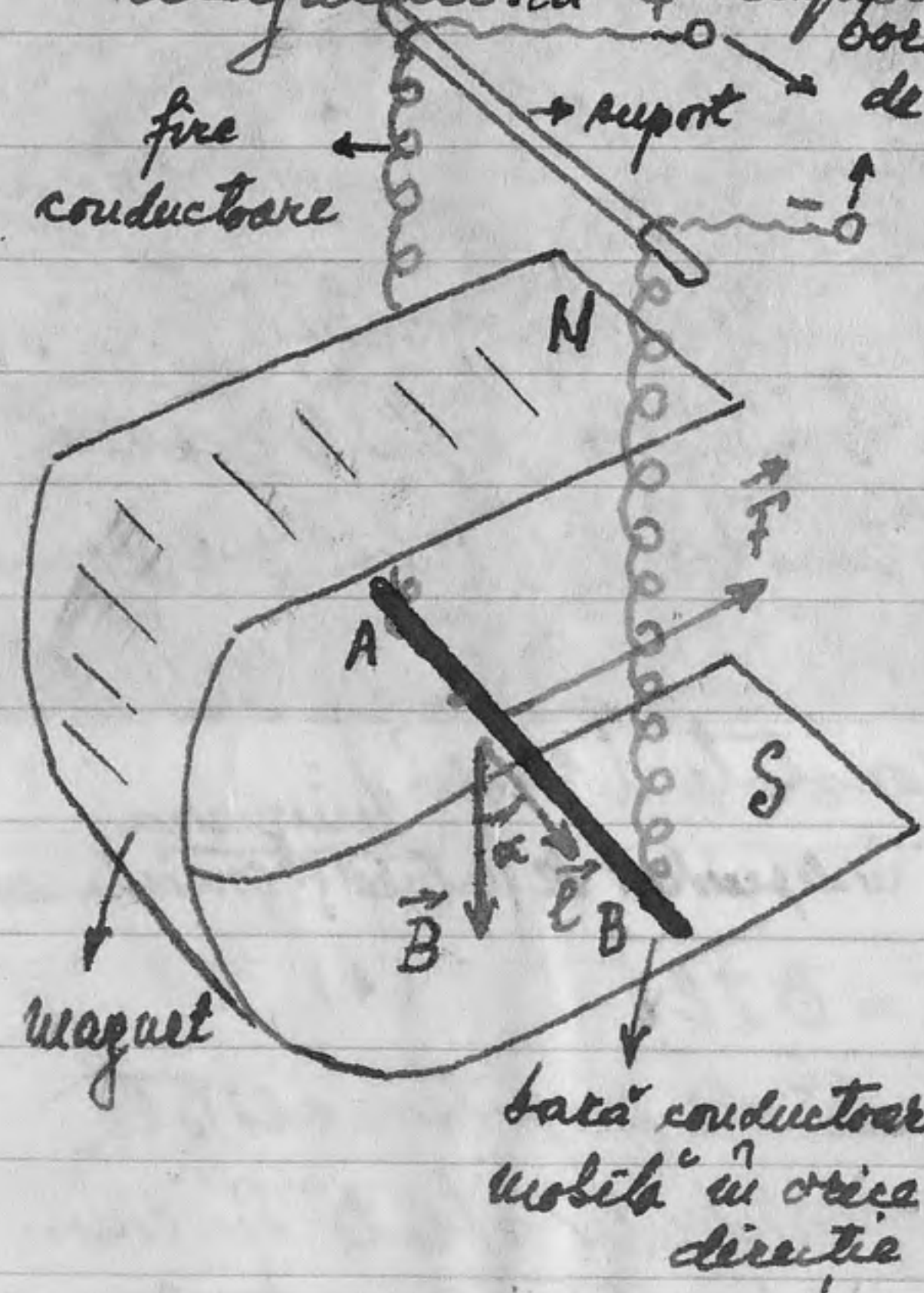
d) Regula de la (a) poate fi aplicată fără modificări și în cazurile (b) și (c). Cum?

10.2. FORȚA ELECTROMAGNETICĂ. INDUCȚIA MAGNETICĂ
ÎN CÂMPURI MAGNETICE UNIFORME

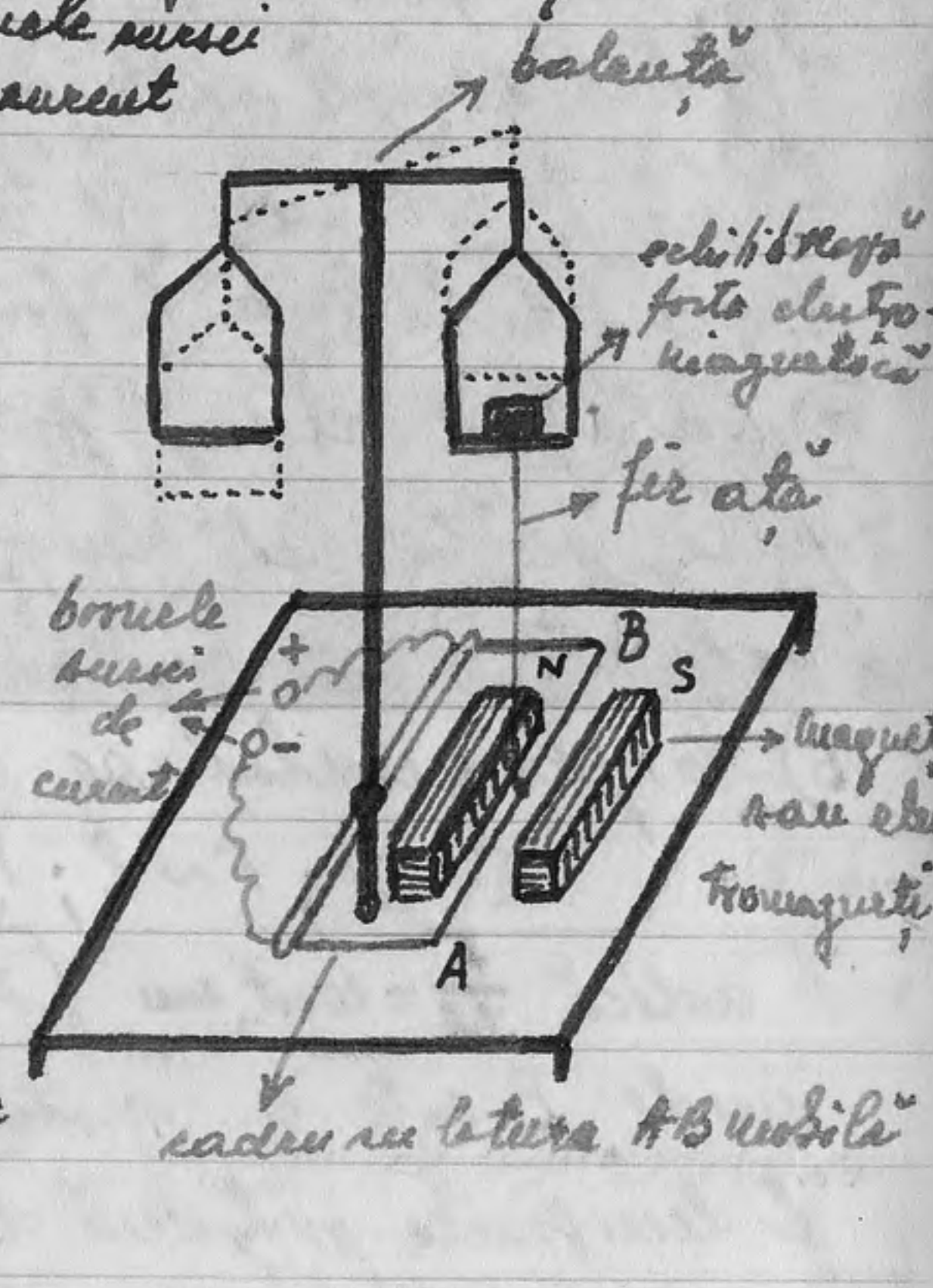
1. Definiția forței electromagnetice.

Sunt forțe care determină acțiunea magnetică, adică deviația conductorului mobil prin care trece curent electric, de către un magnet sau un alt conductor prin care trece curent electric.

2. Dispozitive experimentale pentru studierea forței electromagnetice în + câmpuri magnetice uniforme.



(a)



(b)

3. Direcția și sensul forței electromagnetice.

a) Experimentele făcute cu dispozitivul din fig. (a) pun în evidență (cum?) că bara AB de lungime l (din aluminiu) perpendiculară pe liniile de câmp ($\alpha = 90^\circ$) este deviată la trecerea curentului cu o forță \vec{F} a cărei direcție este perpendiculară pe planul

determinat de AB cu direcția liniilor de câmp
(NS), sensul lui \vec{F} fiind dependent atât de
sensul curentului prin AB , cât și de sensul
liniilor câmpului magnetic.

b) Sintetizând rezultatele experimentale, sensul
lui \vec{F} este dat de regula mîinii stîngi:

În așa fel mîna stîngă astfel ca liniile de
câmp să intre în palmă, cele patru degete să
arată sensul curentului prin conductorul AB , de-
getul mare îndreptat va indica atunci sen-
sul forței care deriază pe AB .

4. Modulul F al forței electromagnetice \vec{F} .

a) Poate fi măsurat prin greutatea corpului care
puse pe tîlerul din figura (b), reechilibrează
balanta.

b) Experimental se constată (cum?):

$$F \sim I; \quad F \sim l;$$

F independent de lungimea conductorului
grosimea, sau natura lui.

Așadar,
$$F = BIl \quad (1)$$

unde: B este o constantă de proporționalitate;

l lungimea porțiunii de conductor aflată în câmp;

I intensitatea (constantă) a curentului din conductor;

5. Interpretarea fizică a constantei de proporționali-
tate B .

a) Din (1) scriem:
$$B = \frac{F}{Il} \quad (2)$$

Cum F, I și l sînt măsurabile experimental,

B este calculabil.

Ținînd nemodificate I și l , dar modificînd
magnetul, experimental obținem alte valori pentru
 F , deci (2) conduce la alte valori pentru B .

Așadar, B depinde de influența magnetului
asupra conductorului mobil.

b) Repetăm experimentele cu același I și l , ace-
lasi magnet, dar situate în medii diferite
(aer, apă, ulei de transformator, etc.). Separa-
tă obținem alte valori pentru F , deci,
din nou (2) dă alte valori pentru B .

Așadar, B este influențat de mediul
în care se formează câmpul magnetic.

c) Concluzionăm că B exprimă proprietățile carac-
teristice ale ansamblului magnet-mediu, deci
ale câmpului magnetic, măsurînd acti-
unea câmpului magnetic uniform asupra
conductorului mobil.

6. Inducția magnetică, mărime ce caracteri-
zează câmpul magnetic uniform.

a) Privind conductorul mobil parcurs de
curent, drept corp de probă pe care ana-
lizăm proprietățile câmpului magnetic u-
niform, observăm că mărimea

$$B = \frac{F}{Il}$$

numită inducție magnetică, este indepen-
dentă de corpul de probă și caracterizează
câmpul magnetic uniform.

b) Definiem inducția magnetică a cîmpului magnetic uniform, măsurarea fizică vectorială \vec{B} al cărei modul este numeric egal cu forța ce deviază un conductor lung de un metru, străbătut de un curent de un amper, așezat perpendicular pe liniile cîmpului magnetic.

Direcția și sensul lui \vec{B} coincid cu ale liniei de cîmp.

c) Caracterul vectorial al inducției magnetice decurge din faptul că aceasta trebuie să caracterizeze cîmpul magnetic, iar cîmpul este alcătuit din linii de cîmp, al căror direcție și sens influențează, după cum s-a văzut, efectele cîmpului.

d) Inducția magnetică este aceeași în orice punct al cîmpului magnetic uniform.

7. Unitatea de măsură a inducției magnetice uniforme.

$$[B]_{SI} = \frac{[F]_{SI}}{[I]_{SI} [l]_{SI}} = \frac{N}{A \cdot m} = T \quad (3)$$

Un cîmp magnetic uniform are inducție de un tesla (T) dacă exercită o forță de un newton asupra fiecărui metru din lungimea unui conductor perpendicular pe liniile de cîmp, parcurs de un curent de un amper.

8. Inducția într-un punct al cîmpului magnetic nonuniform.

Orice cîmp magnetic poate fi împărțit în domenii suficiente de mici, încît, pe fiecare din ele, liniile de cîmp magnetic să poată fi

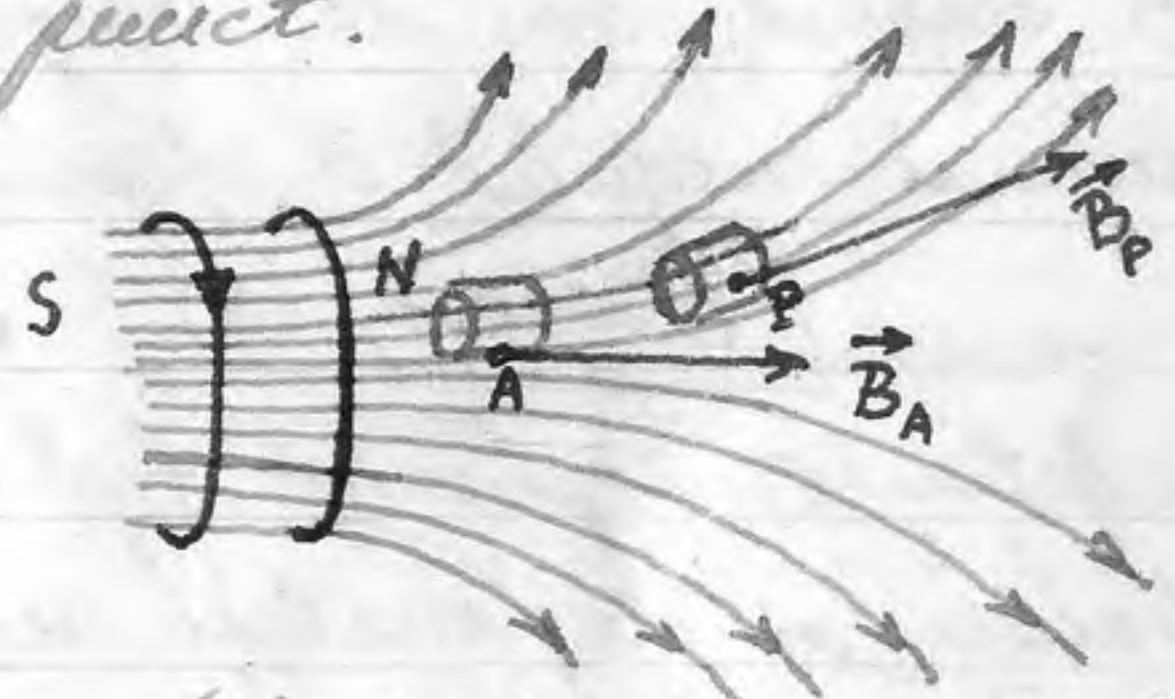
privite ca paralele și echidistante.

Altfel spus, într-un spațiu suficient de restrîns din cîmp, acesta poate fi privit ca uniform.

Decurge că \vec{B} într-un punct al cîmpului este tangent la linia de cîmp ce trece prin acel punct, avînd sensul același cu cel de trecere al liniei prin punct.



(a) Vectorul inducție în cîmpul magnetic uniform.



(b) Vectorul inducție în cîmpul magnetic nonuniform.

8. Expresia vectorială a inducției magnetice.

a) Reluînd experimentele cu un magnet și un mediu dat, păstrînd I și l dar modificînd unghiul α format de bara AB cu direcția liniilor de cîmp, pe care se iau ca sensuri cel al curentului, respectiv al liniei de cîmp, se constată:

$$F = I l B \sin \alpha \quad (4)$$

iar direcția și sensul lui \vec{F} justifică scrierea:

$$\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B}) \quad (5)$$

unde \vec{l} are $\|\vec{l}\| = l$, direcția conductorului și sensul curentului (\vec{l} este un vector con-

ventional atasat lungimii l), α fiind unghiul dintre \vec{l} și \vec{B} (vezi 10.2.2. fig. a)

b) Relatia (4) conține pe (1) ca un caz particular, când $\alpha = 90^\circ$, adică conductorul este perpendicular pe \vec{B} :

$$F = I l B \sin 90^\circ = I l B \text{ deci } F = B I l$$

c) Atunci $F = I l B \sin \alpha$

se vede că F este maximă pentru $\alpha = 90^\circ$ și minimă pentru $\alpha = 0^\circ$ (când $F = 0$).

10.3. FLUXUL MAGNETIC

1. Proprietățile cîmpului magnetic în raport cu „desimea” liniilor de cîmp.

a) Prin acțiune s-a căutat stabilirea proprietăților caracteristice ale cîmpului magnetic folosind acțiunea sa asupra unui corp de probă, cum ar fi pilitura de fier, acul magnetic sau conductorul mobil parcurs de curent electric.

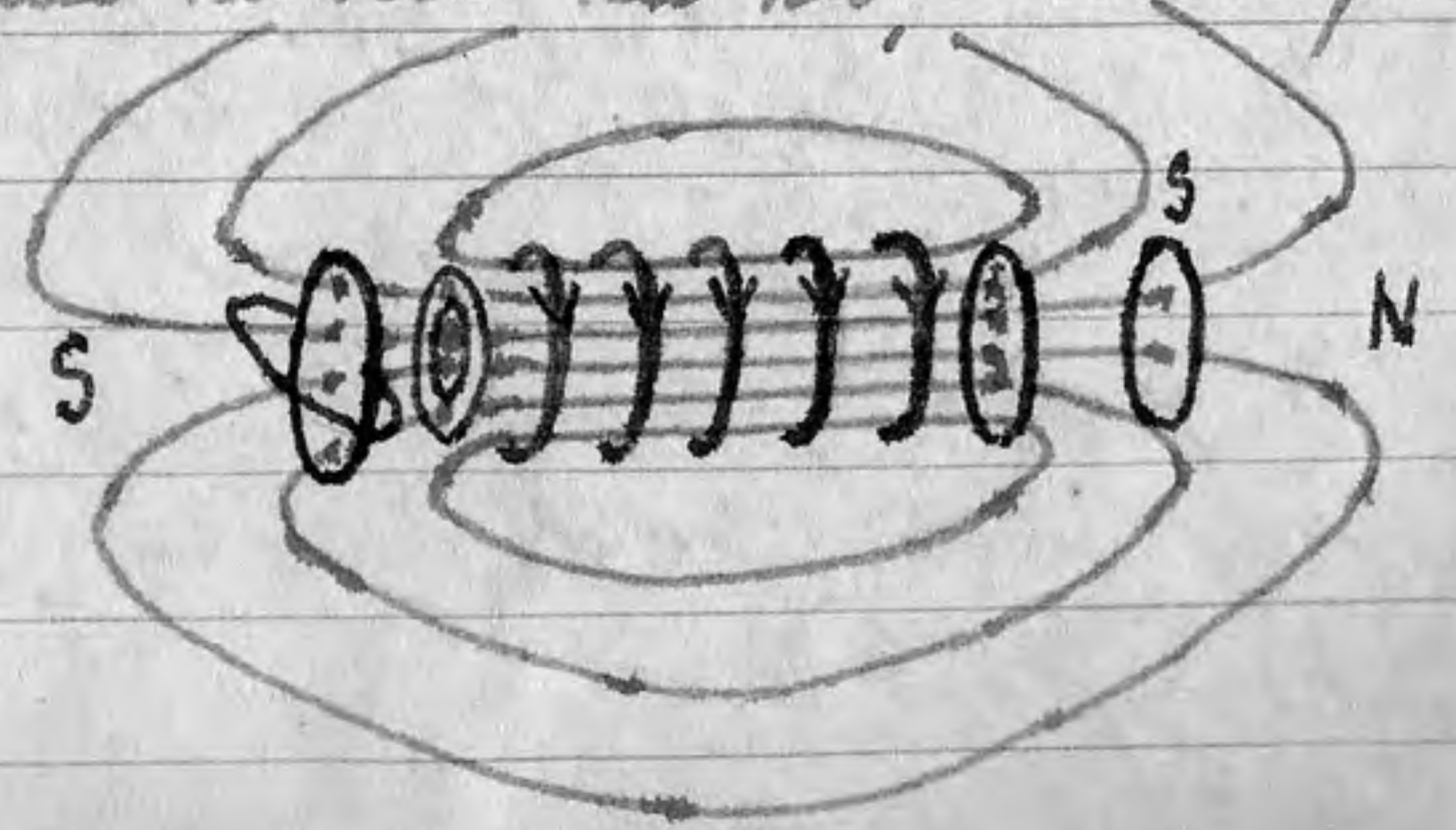
b) Pilitura de fier a folosit drept corp de probă doar pentru a vizualiza existența liniilor de cîmp, deci și a cîmpului magnetic.

Studiul spectrelor oferă însă posibilitatea devalorării unor proprietăți importante ale cîmpului magnetic, realizării unei acțiuni a sensului lor fizic, prin legătura care există între aceste proprietăți și „desimea” liniilor de cîmp.

2. Folosirea unei suprafețe S drept corp de probă pentru a realiza „desimea” liniilor de cîmp.

a) Termenul „desime” a liniilor de cîmp este vag, nepermițînd determinări cantitative. De aceea trebuie înlocuit cu noțiuni mai precise.

b) Din figură se vede că, folosind o suprafață S drept corp



faucet

de probă, numărul liniilor de câmp care o străbat depinde de:

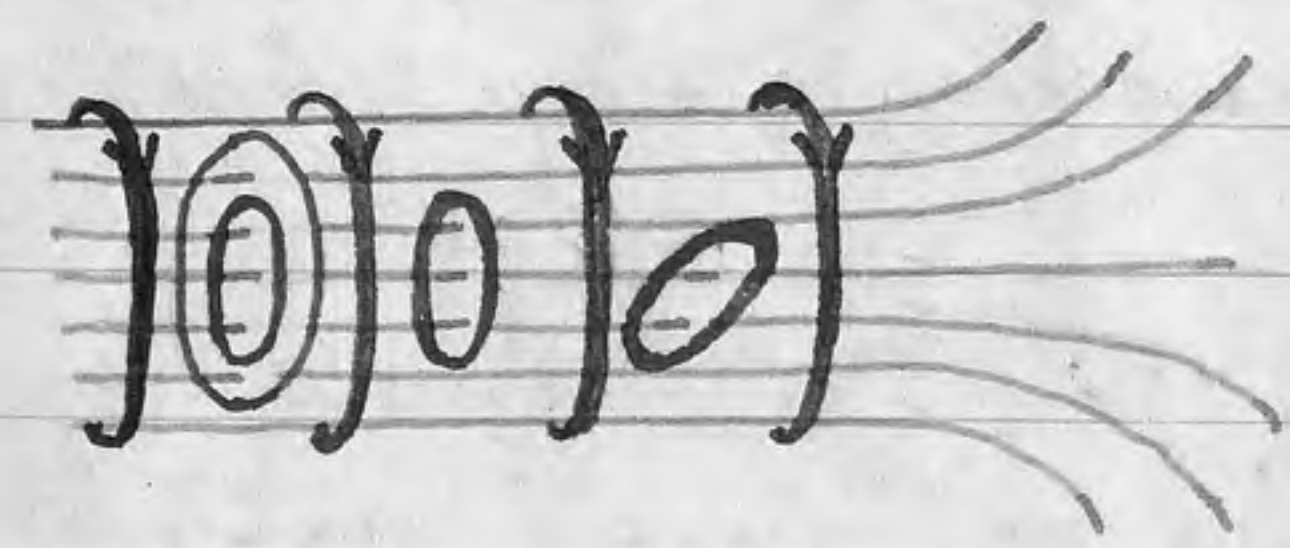
- locul în care este situată (vezi regiunea polului nord);
- orientarea ei față de liniile câmpului (regiunea polului sud);
- mărimea suprafeței S (regiunea polului sud).

c) „Desimea” liniilor de câmp magnetice într-o zonă a câmpului ar putea caracteriza câmpul dacă ar fi independentă de corpul de probă S și ar fi măsurabilă.

Pentru a realiza aceste condiții vom introduce definițiile care urmează.

3. Definiția fluxului magnetic al unei suprafețe S.

a) Numim flux magnetic al unei suprafețe S situată într-un câmp magnetic uniform, mărimea fizică scalară, notată Φ (Φ_s), determinată de numărul liniilor de câmp care o străbat.



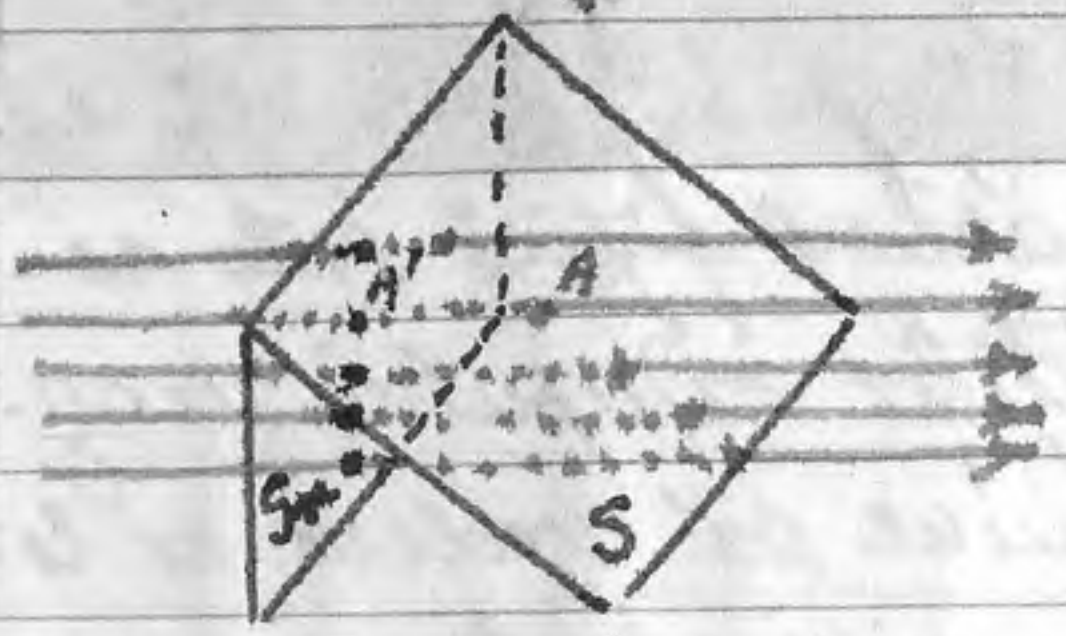
b) Din figura se vede că Φ depinde de câmp prin „desimea”

liniilor în zona suprafeței (câmpul fiind uniform în zona suprafeței, Φ nu depinde de locul plasării lui S în câmpul uniform), dar și de corpul de probă S, prin orientarea lui S față de direcția liniilor de câmp și prin mărimea suprafeței S.

Pradar, Φ nu poate caracteriza câmpul magnetic într-o zonă a sa.

4. Legătura dintre fluxul suprafeței S (il notăm Φ_s), și cel al proiecției sale pe un plan normal la direcția liniilor de câmp (Φ_{S_n}).

Aveam: $\Phi_s = \Phi_{S_n}$ pentru câmpul este uniform.



În altă ordine de idei, dacă o linie de câmp intersectează S într-un punct A, în întepa și pe S_n în A', proiecția lui

A pe S_n , și reciproc.

Pradar, cele două suprafețe S și S_n sunt străbătute de același număr de linii de câmp. Prin urmare, au același flux.

5. Parametri de care depinde fluxul Φ al unei suprafețe S_n normale la liniile de câmp.

Dacă suprafața S_n este perpendiculară la liniile de câmp, fluxul ei Φ depinde numai de „desimea” liniilor de câmp și de mărimea suprafeței S_n .

6. Definiția fluxului pe unitatea de suprafață normală la liniile de câmp magnetic. Independența sa de corpul de probă (suprafața S_n).

Fluxul pe unitatea de suprafață normală la liniile de câmp, sau fluxul unitar, sau densitatea de flux magnetic, este mărimea fizică numeric egală cu

fluxul

fluxul se străbate, într-un câmp magne-
tic uniform, fiecare unitate de suprafață
 S_n așezată perpendicular pe direcția li-
niilor de câmp.

b) Fluxul magnetic $\frac{\Phi}{S_n}$ nu mai depinde
de mărimea lui S_n , ca Φ , deci este inde-
pendent de corpul de probă S_n , și numai
de „densitatea” liniilor câmpului, adică de câmp.

Așadar, această mărime fizică reflectă pro-
prietățile câmpului magnetic uniform. Ea
ar putea folosi drept proprietate caracte-
ristică a acestui câmp, dacă am găsi o
cale de a o măsura. Evident, ne trebuie o măsură a lui Φ .

7. Dificultatea măsurării fluxului Φ porvind de
la definiția sa.

Deoarece numărul liniilor de câmp magnetice
care străbat o suprafață nu poate fi găsit prin mă-

surare directă, vom căuta o altă cale de a
măsura lui Φ o valoare numerică (o măsură).

8. Evidențierea interdependenței dintre densi-
tatea de flux magnetic $\frac{\Phi}{S_n}$ și mărimea in-
ductiei magnetice B.

a) Aproximarea piliturii de fier în unele
zone ale spectrului câmpului magnetic unimi-
form evidențiază că în acele zone:

1° liniile de câmp sînt mai dese (mai pro-
prie, densitatea de flux $\frac{\Phi}{S_n}$ este mai mare);

2° acțiunea câmpului asupra piliturii de fier
(cu rol de corp de probă) este mai mare. Dar
F mai mare implică B mai mare, du-
pă cum rezultă din relația

$$B = \frac{F}{\gamma l}$$

(valabilă pentru câmpul magnetic uniform,
dar orice câmp poate fi considerat uniform,
pe un spațiu suficient de restrîns din câmp.)

b) Conchidem că există o strînsă legătură între
densitatea de flux (densitatea liniilor de câmp) și mă-
rimea inductiei magnetice B, într-o anumită
zonă a câmpului magnetic.

densitatea

Acolo unde densitatea de flux este ^{mai} mare
(liniile de câmp sînt ^{mai} dese), inductia
magnetică B este ^{mai} mare, iar unde densi-
tea de flux este ^{mai} mică (liniile de câmp
sînt ^{mai} puțin dese) inductia B este ^{mai} mică.

9. Relația care exprimă legătura dintre densi-
tatea de flux magnetic $\frac{\Phi}{S_n}$ și inductia
magnetică B.

Vele de mai sus conduc la a admite
că:

Densitatea de flux $\frac{\Phi}{S_n}$ într-o zonă a
câmpului magnetic suficient de res-
trînsă sînt, înaintul ei, câmpul să
poată fi considerat uniform, este pro-
portională cu valoarea inductiei mag-
netice B în acea zonă.

$$\frac{\Phi}{S_n} = \kappa B$$

unde κ este o constantă de proporționalitate dependentă de unitățile de măsură alese.

În S.I. vom avea $\kappa=1$ și relația devine

$$\frac{\Phi}{S_n} = B \quad (6)$$

Această egalitate nu este identitate numerică, ci este o relație de proporționalitate.

Această relație este verificată experimental prin toate consecințele sale, și este admisă ca axioma.

10. Unitatea de flux magnetic. Măsurarea fluxului.

a) Din (6) obținem $\Phi = BS_n$ (7)

și de aici definiția unității de flux, weberul (Wb):

$$[\Phi]_{SI} = [B]_{SI} \cdot [S]_{SI} = T \cdot m^2 = Wb$$

Zicem că un câmp magnetic uniform creează printr-o suprafață S un flux de un weber, dacă inducția B a câmpului este de un tesla, iar proiecția lui S pe un plan normal la liniile de câmp este de un metru pătrat.

Altfel spus, weberul este fluxul unui câmp magnetic uniform, de inducție 1T, printr-o suprafață de $1m^2$, așezată normal pe liniile de câmp.

b) Din (7) se vede că B și S_n fiind măsurabile,

este calculabil.

Așadar, relația (7) stabilește o valoare numerică lui Φ .

11. Coincidența densității de flux, cu valoarea inducției magnetice B .

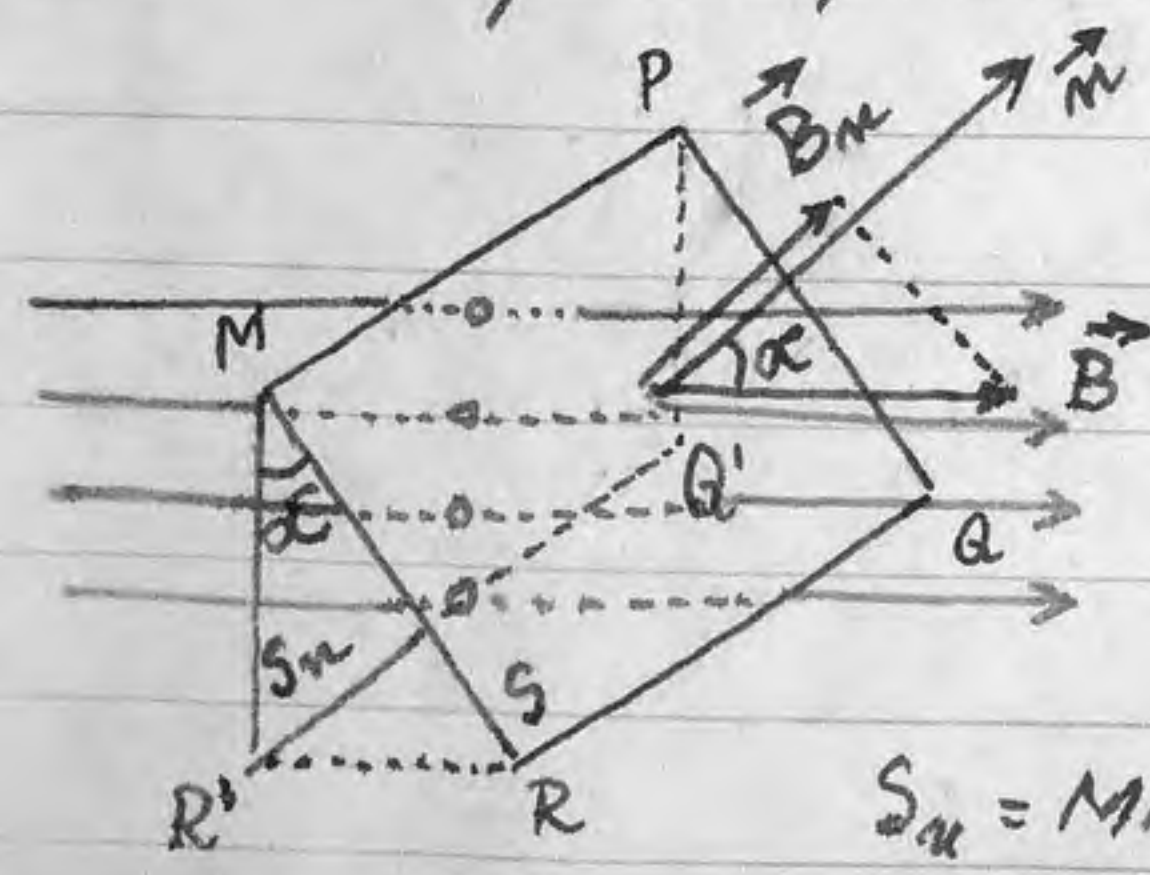
Este exprimată de relația (6) adunată ca axioma.

Știm că inducția magnetică este o mărime vectorială \vec{B} . Densitatea de flux magnetic este o mărime fizică scalară, determinată de desimea liniilor de câmp, egală cu valoarea numerică a mărimumi vectoriale B .

12. Expresia fluxului unui suprafață S orientată oricum față de liniile de câmp magnetic.

a) Fie un câmp magnetic uniform de inducție \vec{B} și o suprafață S oricareă. Fie α unghiul dintre \vec{B} și sensul pozitiv al normalei la suprafață. Versorul normalei la suprafață, \vec{n} , obisnuim să considerăm că străpunge S în același sens cu \vec{B} .

Fie B_n proiecția lui \vec{B} pe normală și S_n proiecția lui S pe un plan normal la liniile de câmp.



și figura:

$$B_n = B \cos \alpha \quad (8)$$

$$S_n = MP \cdot MR' = MP \cdot MR \cos \alpha = S \cos \alpha$$

adică $S_n = S \cos \alpha$ (9)

b) Ducând (9) în (7) obținem

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (10)$$

ceea ce se poate scrie și

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad (11)$$

dacă introducem, în mod convențional, un vector \vec{S} definit prin relația:

$$\vec{S} = S \cdot \vec{n} \quad (12)$$

c) Ducând (8) în (10) obținem

$$\Phi = B_n S \quad (13)$$

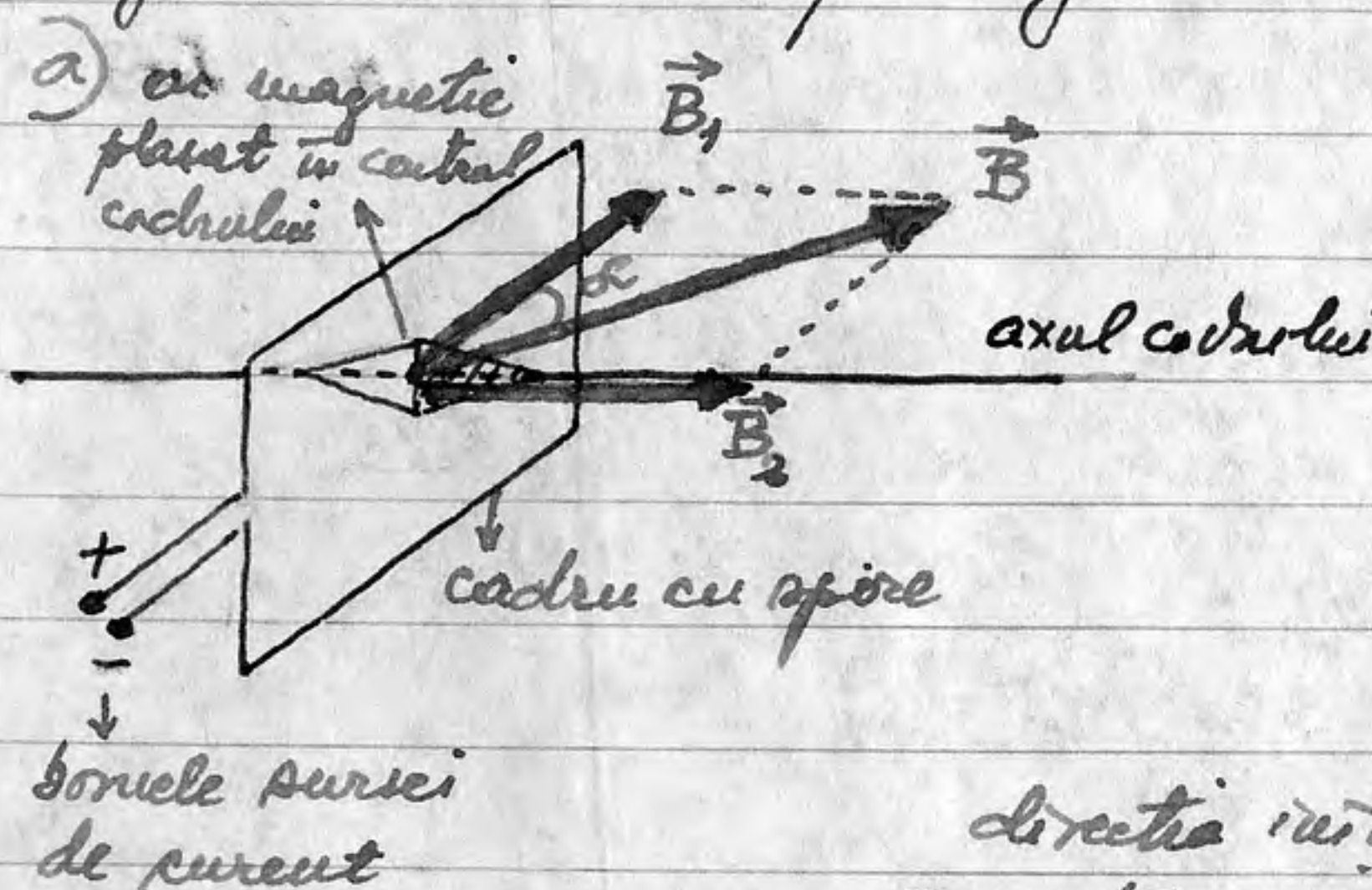
care, comparată cu (7), ne dă

$$BS_n = B_n S \quad (14)$$

10.4. CÂMPUL MAGNETIC AL UNOR CURENȚI ELECTRICE

STATIONARI

1. Dispozitiv pentru studiul experimental al dependenței inducției magnetice de intensitatea curentului generator de cîmp magnetic.



b) Acul magnetic are un cadru gradat care permite citirea unghiului de deviere față de direcția inițială.

c) Cadrul cu spire este astfel orientat încît axul său să fie perpendicular pe inducția B1 a cîmpului magnetic terestru.

d) Inducția B2 determinată de traversarea unui curent de intensitate I prin spirele cadrului are direcția axului și orientarea determinată de sensul curentului.

e) Acul magnetic se va aseza pe direcția și în sensul vectorului rezultat B:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2$$

B1 fiind constant, variația curentului I va duce la variația lui B2 în modul

$$B_2 = B_1 \tan \alpha \quad (*)$$

(direcția lui B2 fiind de asemenea constantă), reflectată în variația unghiului alpha de

deviații a acului magnetic față de poziția sa în absența curentului (care coincide cu B_1).

2. Desfășurarea experimentului.

a) Se potrivește un curent I_1 prin cadru, astfel încât unghiul $\alpha_1 = 45^\circ$. Se notează valoarea lui I_1 pentru această valoare a lui α .

b) Se face, succesiv, curentul egal cu $I_2 = 2I_1$, $I_3 = 3I_1$, $I_4 = 4I_1$, etc citind, de fiecare dată valoarea unghiului α . Se notează aceste valori: $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, etc.

3. Valoriificarea rezultatelor experimentale.

a) Se calculează B_2 din relația (*):

$B_{21} = B_1 \tan \alpha_1 = B_1 \tan 45^\circ = B_1$

$B_{22} = B_1 \tan \alpha_2 = 2B_1$

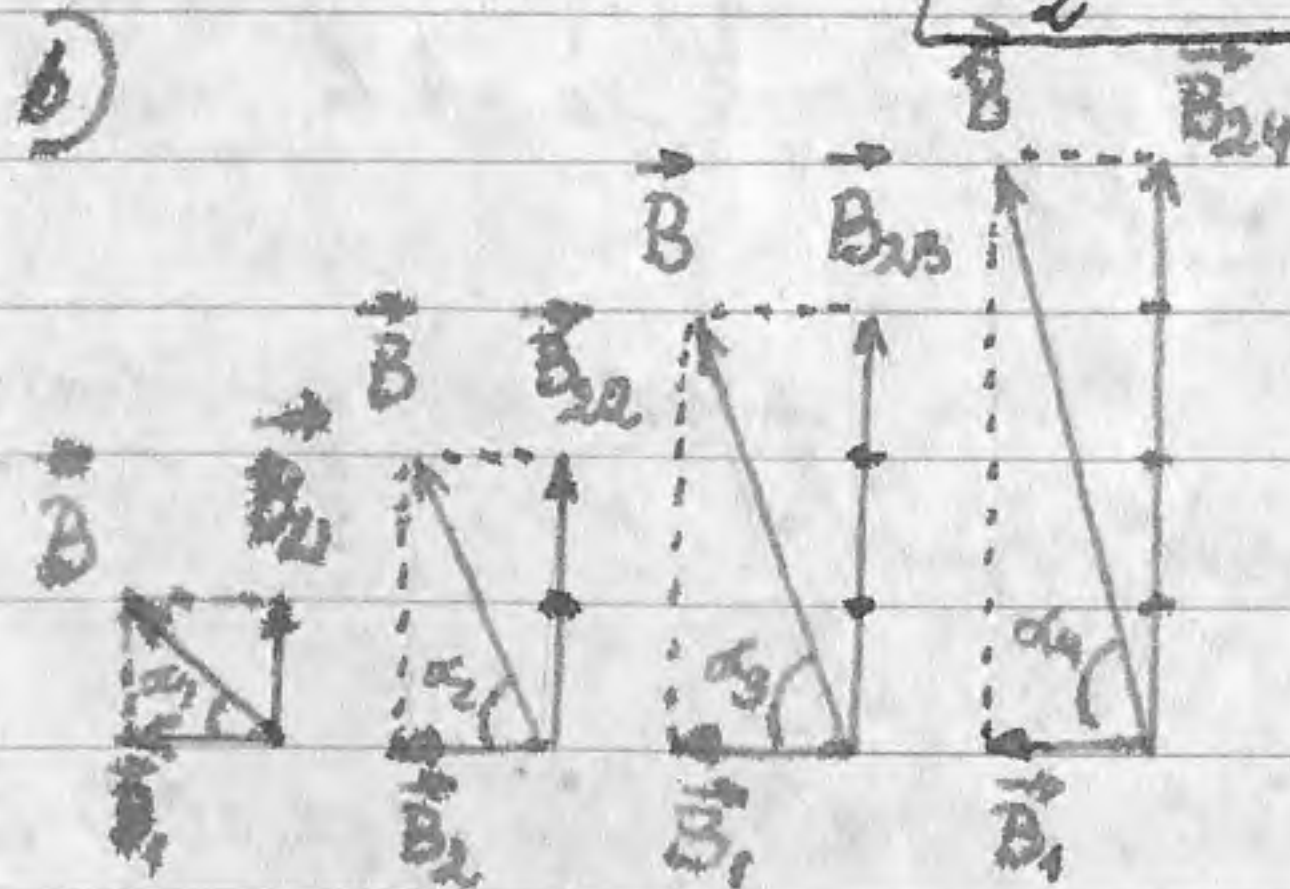
$B_{23} = B_1 \tan \alpha_3 = 3B_1$

$B_{24} = B_1 \tan \alpha_4 = 4B_1$ etc.

Se observă: $\frac{B_{21}}{I_1} = \frac{B_{22}}{I_2} = \frac{B_{23}}{I_3} = \frac{B_{24}}{I_4} = \dots = \text{const.}$

sau

$B_2 \sim I$



$I_1 \quad I_2 = 2I_1 \quad I_3 = 3I_1 \quad I_4 = 4I_1$

parăm pe B_1 și apoi să verificăm multiplăcarea de 2, 3, 4 ori a lui B_2 la unu-tplicarea de 2, 3, 4 ori a lui I , față de valoarele corespunzătoare lui $\alpha = 45^\circ$.

Calcululele de mai sus arată că pentru deducerea proporționalității dintre B_2 și I este suficient să mă-

4. Dependența inducției magnetice de distanța la circuitul generator de cîmp magnetic.

Folosind același dispozitiv experimental, se păstru- ză constantă intensitatea I a curentului din spire, de părătunde-se, treptat, acul magnetic cu cadru, de planul cadrului. Se constată scăderea unghiului de deviere α , deci B_2 scade.

Așadar, inducția magnetică scade cu distanța față de curentul electric generator de cîmp magnetic.

5. Dependența inducției magnetice de forma circuitului generator de cîmp magnetic.

a) Se poate arăta că inducția magnetică a cîmpului generat de un curent electric depin- de de forma circuitului generator de cîmp.

Ca urmare, nu se poate da o expresie generală pentru inducția B generată de curentul ce străbate un circuit electric, aceasta fiind forme specifice diverselor circuite

b) Pentru determinarea lui B în cazul di- verselor circuite a fost găsită legea Biot- Savart-Laplace, care nu face obiectul nostru de studiu. Vom da doar rezultatele ce se obțin prin aplicarea ei la unele cir- cuite neci des rîtîluite.

Așa cum rezultă din legea Biot-Savart- Laplace, oricare ar fi circuitul, B este direct proporțional cu intensitatea I a curentului

care îl străbate și depinde de mediul în care se formează câmpul magnetic.

6. Inducția generată de un conductor rectiliniu lung, parcurs de curent electric.

a) În 1820 Biot și Savart au arătat că în acest caz, într-un punct aflat la distanță r de conductorul străbătut de curentul electric I , avem:

$$B \sim \frac{1}{r}$$

După cum s-a spus, indiferent de forma circuitului se constată:

$$B \sim I.$$

Prin urmare, în cazul conductorului rectiliniu

$$B \sim \frac{I}{r} \text{ sau } B = k \frac{I}{r} \quad (**)$$

unde k este o constantă de proporționalitate dependentă de unitățile de măsură și de natura mediului în care se formează câmpul.

b) Scriem pe k din (***) sub forma:

$$k = k^* \cdot \mu \quad (***)$$

unde k^* este o constantă dependentă exclusiv de unitățile de măsură, iar μ este constantă ce caracterizează influența mediului asupra câmpului, numită permeabilitate magnetică a mediului.

În S.I. se ia

$$k^* = \frac{1}{2\pi}$$

și (***) devine

$$k = \frac{\mu}{2\pi} \quad (15)$$

c) Aceasta duce în (***) ne dă:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (16)$$

7. Permeabilitatea magnetică relativă a unui mediu

a) Prin definiție, numim permeabilitate magnetică relativă a unui mediu, raportul dintre permeabilitatea aceluia mediu și permeabilitatea vidului.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (17)$$

Fiind un raport, μ_r este constantă de material, adimensională.

b) Din (17) avem $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$ (18)

care exprimă μ în funcție de μ_r și μ_0 .

c) Folosind (18), relația (16) devine

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r} \quad (19)$$

8. Direcția și sensul inducției B generate de un conductor rectiliniu lung, parcurs de curent electric. Se determină cu regula burghielui.

9. Unitatea de măsură pentru permeabilitatea magnetică.

Se determină din (19):

$$\mu_0 = \frac{2\pi B r}{\mu_r I}$$

$$[\mu_0]_{SI} = \frac{[B]_{SI} \cdot [r]_{SI}}{[I]_{SI}} = \frac{T \cdot m}{A} = \frac{\frac{N}{A \cdot m} \cdot m}{A} = \frac{N}{A^2}$$

10. Caracterul uniform sau neuniform, al cîmpului magnetic generat în jurul conductorului

rectiliniu lung, parcurs de curent electric.

Din (16) se vede că B depinde de distanța r de conductor, deci ia valori diferite în puncte aflate la distanțe diferite. Deci câmpul este neuniform.

11. Inducția generată în centrul unei spire parcurse de curent electric.

a) Din legea Biot-Savart-Laplace se deduce

$$B = \frac{\mu I}{2r} \quad (20)$$

unde r este raza spirei.

Evident câmpul creat de curentul din spirală este neuniform.

b) Dacă avem un cadru cu N înfășurări (multiplicator):

$$B = \frac{\mu NI}{2r} \quad (21)$$

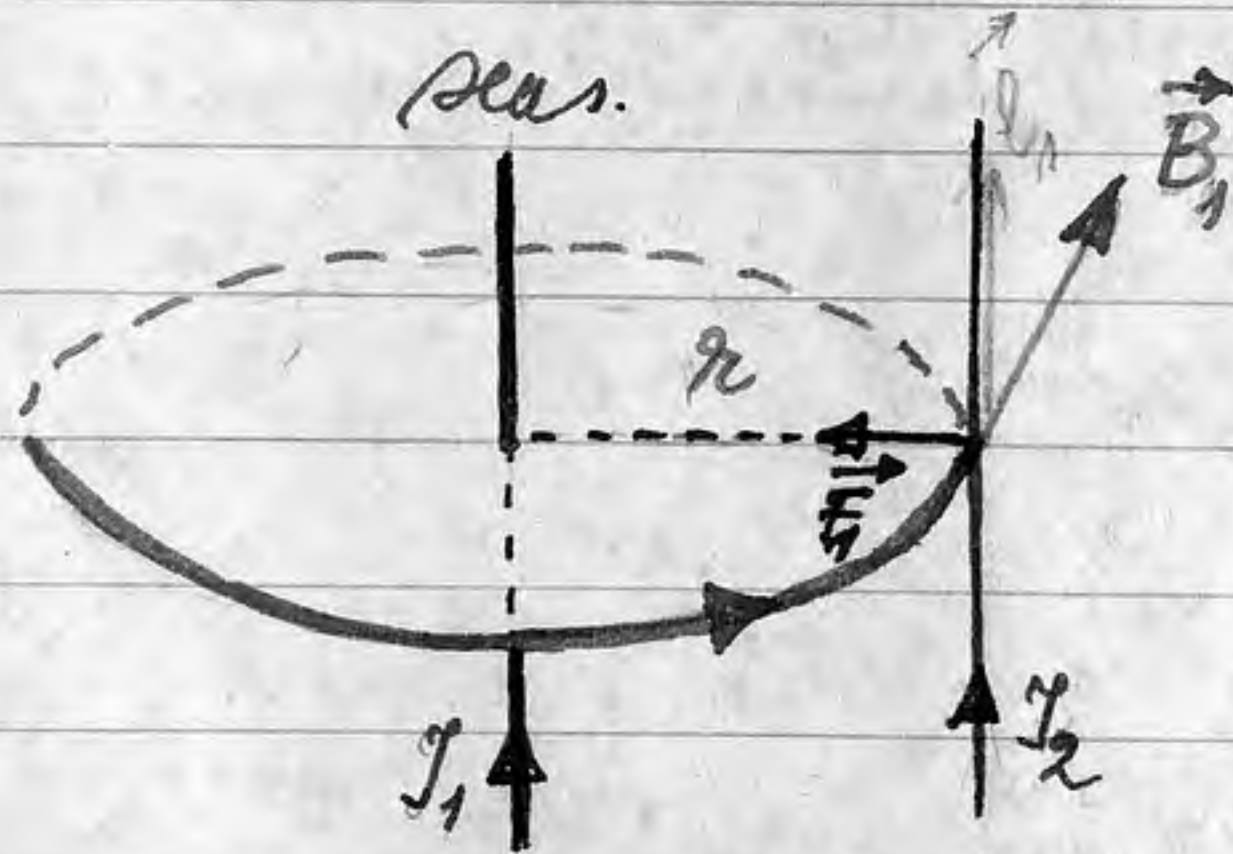
12. Inducția magnetică în interiorul unui solenoid, de lungime l, având N spire, parcurse de curentul I

$$B = \mu \frac{NI}{l} \quad (22)$$

10.5 INTERACȚIUNEA MAGNETICĂ A CURENȚILOR ELECTRICI. AMPERUL.

1. Interacțiunea dintre două circuite parcurse de curent. Acestea interacționează prin câmpurile magnetice din jurul lor. Asupra fiecărui circuit câmpul magnetic al celuilalt va acționa cu o forță electromagnetice și, dacă circuitul este mobil, el se va deplasa sub acțiunea acestei forțe.

2. Direcția și sensul forței de interacțiune dintre doi conductori rectilini, paraleli, parcurși de curent de același sens.



a) Curentul I1 creează într-un punct prin care trece conductorul parcurse de curentul I2 o inducție magnetică

$$B_1 = \frac{\mu I_1}{2\pi r}$$

unde r este distanța între conductori. Direcția și sensul lui B1 se stabilesc cu regula șurubului și sunt indicate pe figură.

b) Conductorul mobil străbătut de I2, aflându-se în câmpul de inducție B1 creat de I1, va fi acționat de forța electromagnetice F1, al cărei modul este

$$F_1 = B_1 I_2 l$$

și a cărei direcție și sens sunt date de regula mâinii stângi și sunt indicate pe figură (pot fi stabilite și cu Regula burghiului).

dacă ținem seama de $\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$.

Trebuie observat că conductorul mobil stabilit de I_2 este perpendicular pe inductia \vec{B}_1 , deci $(\vec{l}_1, \vec{B}_1) = 90^\circ$.

c) Se observă că forța \vec{F}_1 cu care I_1 acționează asupra lui I_2 , când I_1 și I_2 au același sens, este atractivă.

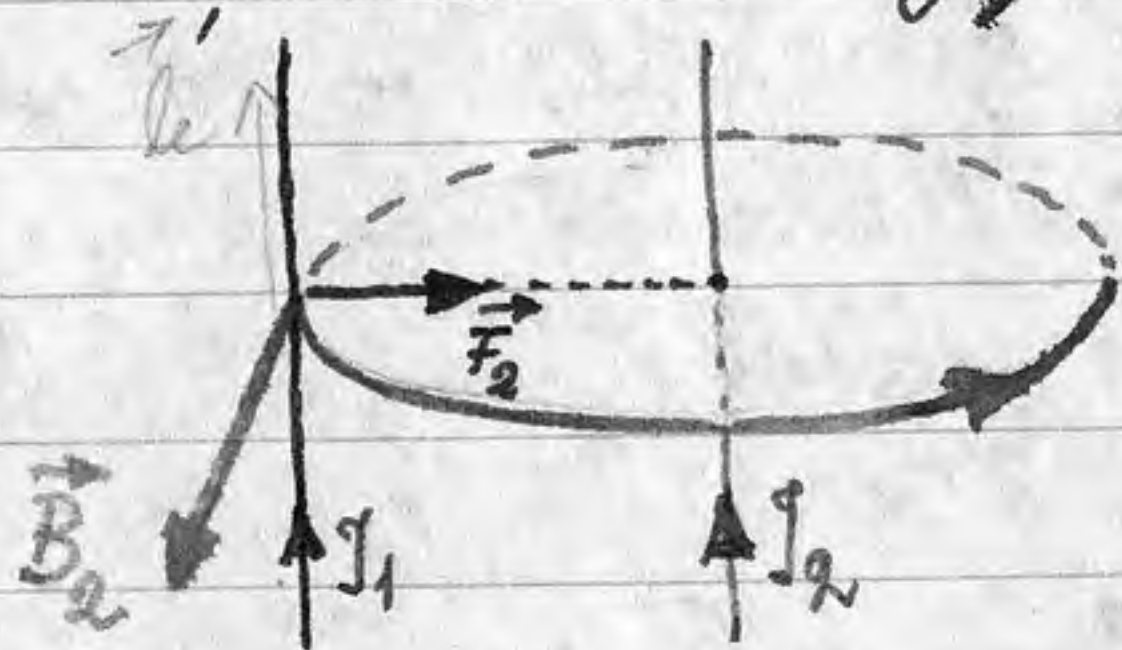
3. Modulul forței de interacțiune dintre doi conductori rectilinii, paraleli, parcurși de curenți de același sens.

Înlocuind în F_1 de mai sus pe B_1 cu expresia sa cunoscută anterior, obținem

$$F_1 = \frac{\mu I_1 I_2 l}{2\pi r}$$

4. Reciprocitatea interacțiunii dintre doi conductori rectilinii, paraleli, parcurși de curenți de același sens.

Răzînd analog, se găsește că conductorul parcurși de I_2



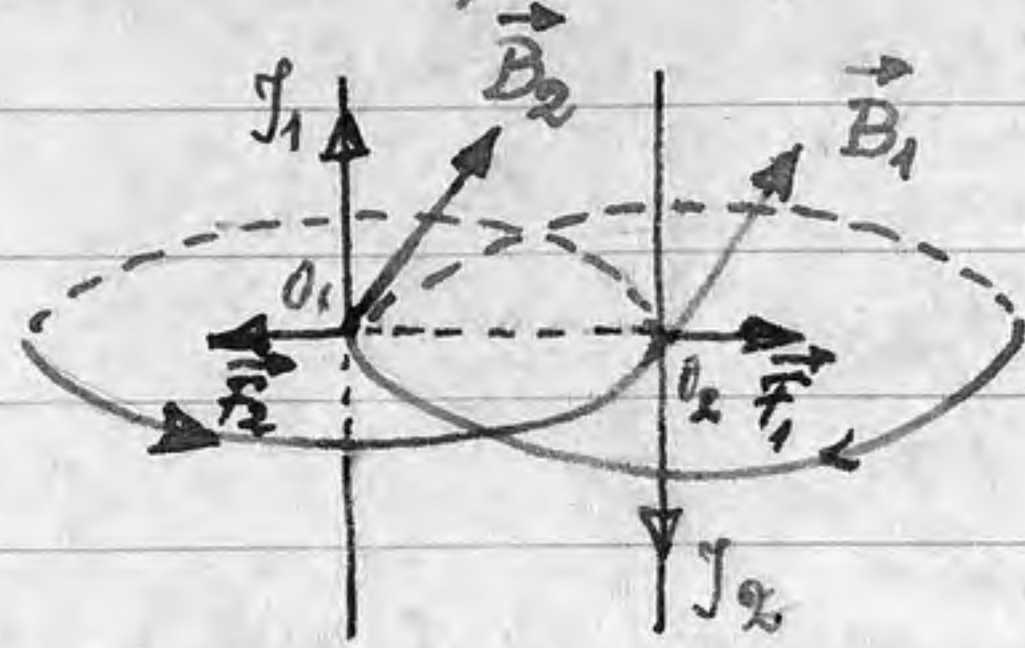
acționează asupra celui parcurși de I_1 cu o forță \vec{F}_2 atractivă, de

același modul cu \vec{F}_1 : $F_2 = F_1$

Așadar:
$$F = \frac{\mu I_1 I_2 l}{2\pi r} \quad (23)$$

exprimă modulul forței de interacțiune între cei doi conductori.

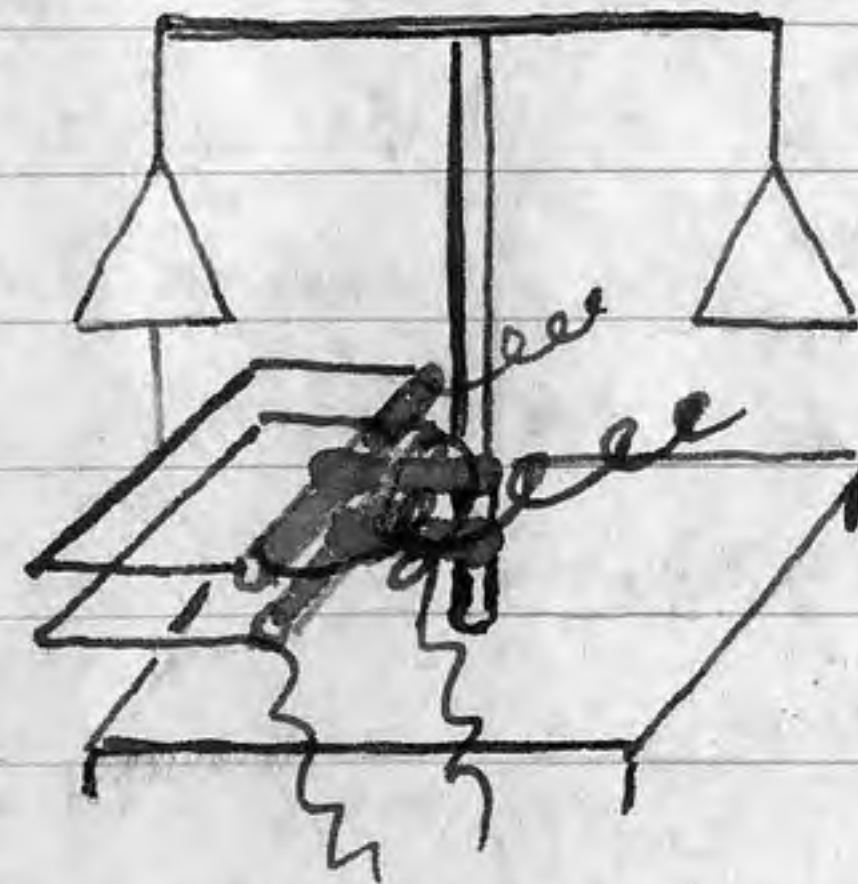
5. Interacțiunea dintre doi conductori rectilinii, paraleli, parcurși de curenți de sens opus.



Procedînd ca în cazul curenților de același sens, se constată că pentru curenți de sens opus forțele de interacțiune sînt

de respingere, avînd modulele date de aceeași expresie ca și în cazul curenților de același sens.

6. Verificarea experimentală a concluziilor teoretice obținute mai sus privind direcția, sensul și modulul forțelor de interacțiune dintre doi conductori rectilinii, paraleli, parcurși de curenți electrici.



a) Cele două cadre se aranjează în plane paralele, cel de jos fiind fix, cel de sus mobil și legat de talerul unei balanțe.

În absența curenților prin cadre se echilibrează balanța.

b) Se face a fi parcurse cadrele de curenți de același sens. Se constată atracția cadrelor. Se inversează sensul curenților în unul din cadre și se constată respingerea lor.

În ambele cazuri sensul deviației corespunde sensului forței electromagnetice (se verifică).

c) Simultan cu atracția sau respingerea scadelor balanta se dezechilibrează. Pentru reechilibrarea ei se măsoară pe scara din talera scara etalon și se determină modulul forței electromagnetice.

Păstrând distanța dintre cadre și menținând intensitatea curentului din ele ($I_1 = I_2$), se determină de fiecare dată forța electromagnetice prin reechilibrarea balantei. Se calculează pentru fiecare valoare a intensității I a curentului prin cadre, valoarea forței electromagnetice, folosind relația (23) scrisă sub forma

$$F = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi r} \quad (24)$$

Se constată obținerea unor valori apropiate ale lui F cu cele găsite experimental.

d) Menținând constantă intensitatea I a curentului se modifică distanța r dintre cadre, măsurând forța electromagnetice prin reechilibrarea balantei. Se calculează apoi F folosind (24) și se găsesc rezultate apropiate cu cele determinate experimental.

7. Definierea amperului, simbol A.

a) Din (24) obținem: $I^2 = \frac{2\pi r F}{\mu_0 l}$ (25)

Pentru definierea unității de intensitate I a curentului electric vom alege $r = 1\text{m}$ și vom căuta ce forță F trebuie să acționeze pe fiecare metru de lungime a conductorului (deci $l = 1$) pentru ca rezultatul drept

al relației (25) să fie egal cu 1.

$$I^2 = \frac{2\pi \cdot 1 \cdot F}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1} \quad \text{sau} \quad I^2 = \frac{F}{2 \cdot 10^{-7}}$$

Se vede că fiind $F = 2 \cdot 10^{-7} \text{N}$, avem $I^2 = 1 \text{A}^2$ sau $I = 1 \text{A}$.

b) Din cele de mai sus se poate formula următoarea definiție a amperului:

Numim amper intensitatea unui curent electric constant care se stabilește prin două conductoare rectilinii, paralele, foarte lungi, așezate în vid la distanța de un metru unul de altul, între care se exercită o forță de $2 \cdot 10^{-7} \text{N}$ pe fiecare metru de lungime.

10.6. FORTA LORENTZ

1. Condiția actiunii cîmpului magnetic asupra unui conductor.

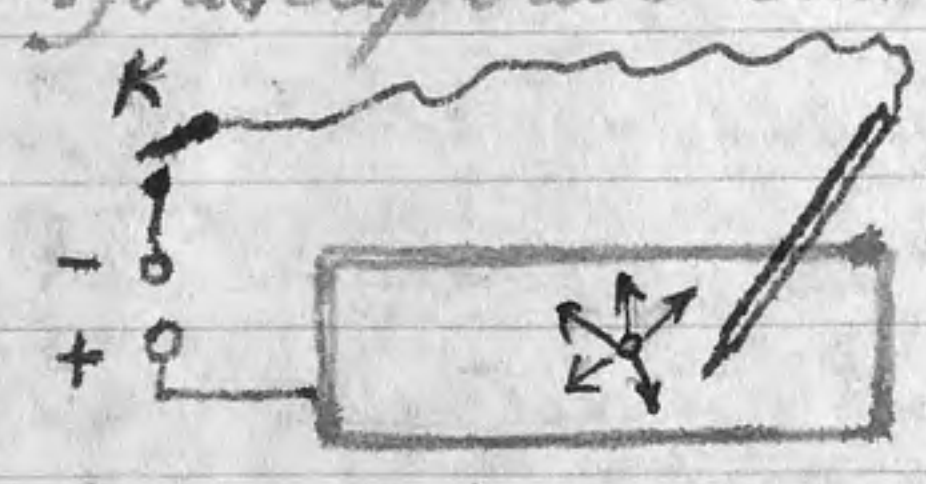
Este prezența curentului prin conductor, deci existența mișcării purtătorilor de sarcină electrică.

2. Verificarea experimentală a actiunii cîmpului magnetic asupra purtătorilor de sarcină electrică în mișcare.

Vom arăta că în absența conductorului, cîmpul magnetic acționează cu o forță - forță electromagnetice - asupra purtătorilor de sarcină electrică în mișcare.

3. Dispozitiv experimental.

a) Susceptorul din țesut de fibră. Libertatea de mișcare realizată în apă se pune în cristal de permanganat de potasiu

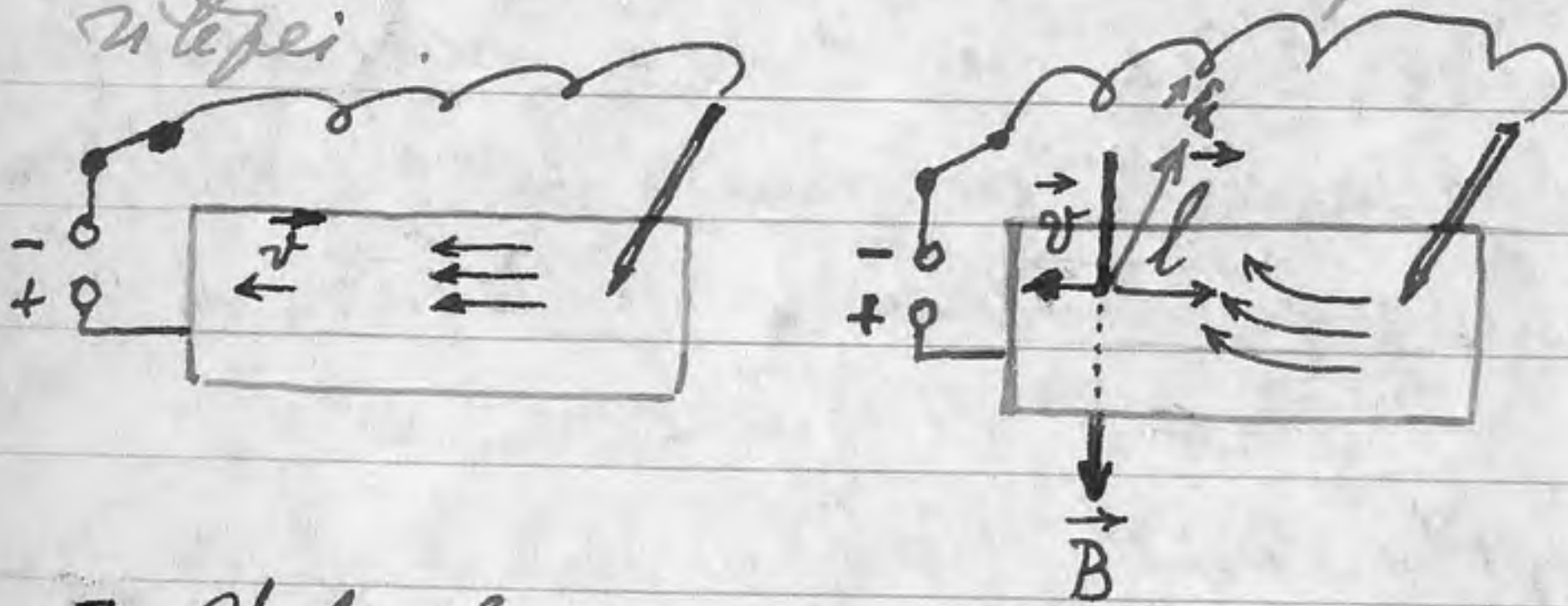


($KMnO_4$). Acesta disociază în ioni negativi MnO_4^- de culoare violetă, și ioni pozitivi K^+ . Colorația violetă se extinde în toate direcțiile.

b) Se pot utiliza și alți coloranți: ioni pozitivi obținuți din sulfat de cupru și amoniu ($Cu(NH_3)_4SO_4$), sau din azotat de cobalt, $Co(NO_3)_2$.

4. Desfășurarea experimentului.

Aplicând o tensiune electrică constantă, colorată violetă se deplasează prin cuod. Aplicând apoi și un câmp magnetic perpendicular pe planul țes. țes de filon, colorata violetă este deviată astfel încât îndreaptă spre unii forte, de aceeași direcție ^{ca} a fortei electromagnetice exercitate asupra unii conductor stabilit de curent electric, conductor de direcția vitezei ionilor negativi înaintea opticării câmpului magnetic, stabilit de un curent de sens opus sensului vitezei.



5. Valorificarea rezultatelor experimentului.

a) Deviația purtătorilor de sarcină electrică în mișcare fără ca acestea să se găsească într-un conductor metallic dovedește că, acțiunea câmpului magnetic are loc nu asupra conductorului, ci a purtătorilor de sarcină electrică în mișcare aflați în câmpul magnetic.

b) În concluzie: asupra oricărui purtător de sarcină electrică în mișcare în câmp magnetic se exercită o forță.

Această forță o numim forță Lorentz, în cinstea fizicianului cu același nume.

6. Determinarea expresiei modulului

forței Lorentz

a) În mod evident, numărul electronilor care intră în conductor printr-un capăt la un moment dat coincide cu al electronilor care ies prin celălalt. Deci, numărul total N al electronilor în mișcare aflați în conductor este constant în timp.

Acest număr N de electroni este „expulzat” din conductor prin „secțiunea de ieșire” în timpul t necesar electronilor, ca să ajungă la un moment dat prin „secțiunea de intrare”, ca să ajungă la cea de ieșire (deci ca să parcurgă distanța l , lungimea conductorului).

Prin secțiunea de ieșire ies deci N electroni în timpul t . Avem evident

$$j = \frac{N \cdot e}{t}$$

unde e este sarcina electronului

b) Forța Lorentz cu care câmpul de inducție magnetică \vec{B} acționează asupra fiecărui electron în mișcare din conductorul de lungime l va fi

$$\vec{f} = \frac{\vec{F}}{N} \quad \text{cu modulul} \quad f = \frac{I l B \sin \alpha}{N}$$

$$\text{Scriem: } f = \frac{N e}{t} \frac{l}{N} B \sin \alpha = e \frac{l}{t} B \sin \alpha$$

Cum $\frac{l}{t} = v$, viteza medie a electronilor liberi antrenat de câmpul creat de tensiunea electrică de la capetele conductorului, avem:

$$f = e v B \sin \alpha$$

c) O particulă având sarcina electrică q , se deplasează cu viteza \vec{v} într-un câmp magnetic de inducție \vec{B} va fi acționată de o forță Lorentz ($\vec{v} = \text{const}$, $\vec{B} = \text{const}$):

$$\vec{f} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (26) \quad \text{sau} \quad \vec{f} = q (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (27)$$

Ultima relație justificându-se, având în vedere direcția și sensul lui \vec{f} în raport cu cele lui \vec{v} și \vec{B} și cu sensul sarcinii q .

d) Dacă $(\vec{v}, \vec{B}) = 90^\circ$ avem:

$$f = q v B \quad (28)$$

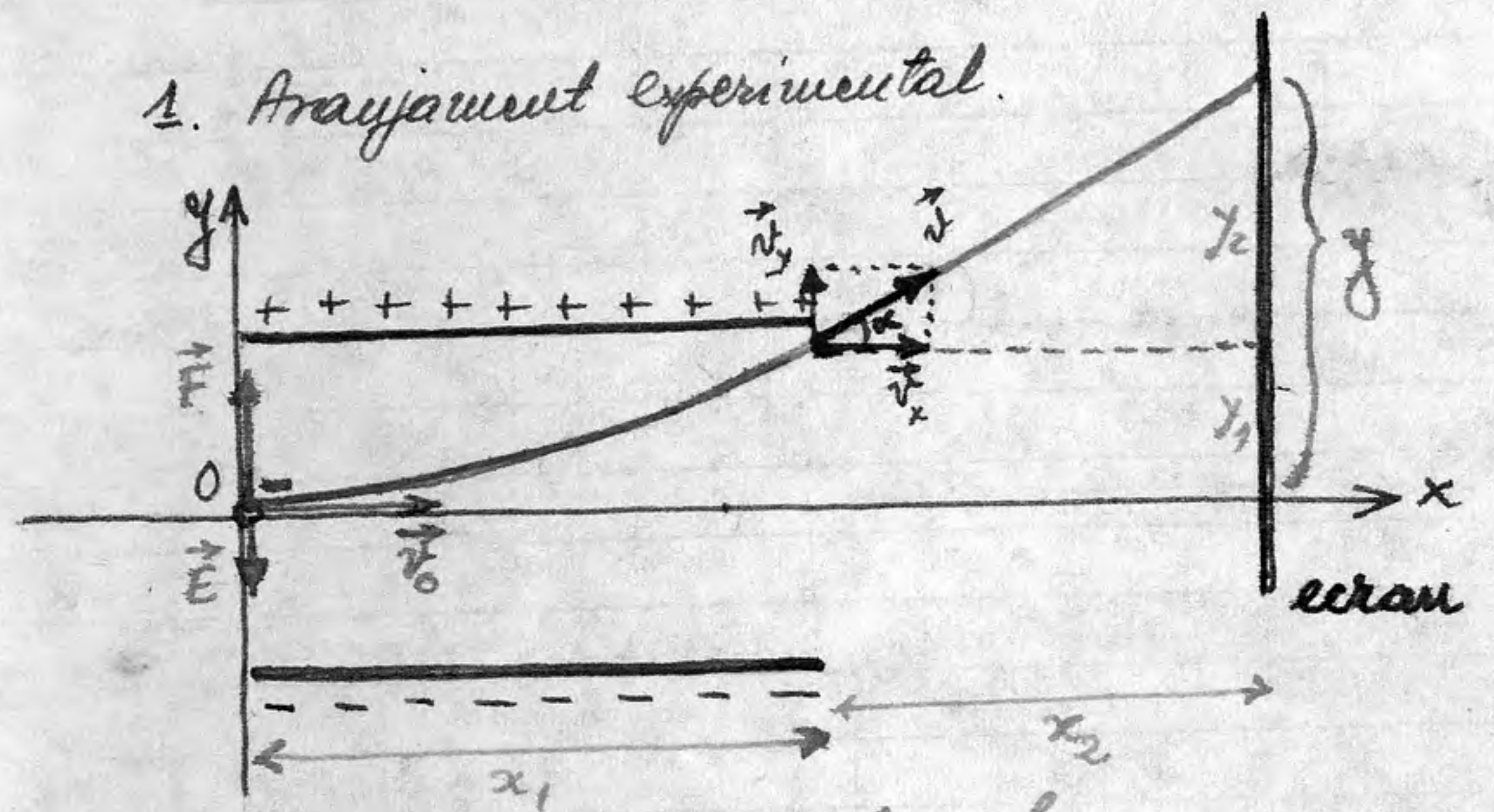
aici literele reprezintă modulele vitezelor respective.

e) Pentru stabilirea direcției și sensului lui \vec{f} în (27) se folosește regula burghinului (surubului).

Se poate folosi și regula mâinii drepte pe care am utilizat-o la forța electromagnetice, cu observația că, pentru $q > 0$, vom utiliza am „curent echivalent”, având direcția și sensul lui \vec{v} , iar pentru $q < 0$, vom utiliza un „curent echivalent”, având direcția lui \vec{v} iar sensul opus celui al lui \vec{v} .

10.7. MISCAREA PURTĂTORILOR DE SARCINĂ ÎN CÂMP ELECTRIC UNIFORM

1. Aranjament experimental.



a) Fie un condensator plan care creează între armături un câmp electric uniform de intensitate \vec{E} . În acest câmp intră o particulă de masă m , având sarcina electrică $q < 0$ (dacă $q > 0$ ea va fi deviată în sens opus) și viteza la intrare \vec{v}_0 normală la liniile de câmp.

b) În drumul particulei se află, la ieșirea din condensator, un ecran, la distanță x_2 de armăturile condensatorului. Sursimea armăturilor în direcția deflexiunii inițiale a particulei este x_1 .

Deviația particulei la ieșirea din crucea de
este y_1 , iar deviația totală pe ecran este y , cu

$$y = y_1 + y_2$$

c) Se asociază dispozitivului un sistem orto-
gonal de axe xoy .

2. Mișcarea particulei pe axa ox .

a) Asupra particulei acționează forța electrică

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

care proiectată pe ox dă

$$\vec{F}_x = 0$$

b) Urmează că pe ox avem accelerația

$$\vec{a}_x = \frac{\vec{F}_x}{m} = \frac{0}{m} = 0 \text{ deci } \vec{a}_x = 0 \quad (29)$$

adică $\vec{v}_x = \text{const}$, și mișcarea de-a-lungul
axei ox este rectilinie și uniformă, cu

viteza inițială:

$$\vec{v}_x = \vec{v}_{ox} = \vec{v}_0 \quad (30)$$

c) Spațiul parcurs în momentul t va fi

$$x = v_0 t \quad (31)$$

iar x_1 va fi parcurs în timpul t_1 , cu

$$x_1 = v_0 t_1 \quad (32)$$

3. Mișcarea particulei pe oy .

a) Proiecția lui \vec{F} pe oy este chiar \vec{F} :

$$\vec{F}_y = \vec{F}$$

adică $\vec{F}_y = q\vec{E}$ și $\boxed{F_y = qE}$ sau $F = qE$ (33)

unde F_y , F și E sînt componentele vectorilor
 \vec{F}_y , \vec{F} și \vec{E} pe axa oy .

b) Accelerația pe oy va fi:

$$\vec{a}_y = \frac{\vec{F}_y}{m} \text{ de componentă } \boxed{a_y = \frac{qE}{m}} \quad (34)$$

Cum $q < 0$, $E < 0$ și $m > 0$ avem $a_y > 0$,
deci mișcarea pe oy va fi accelerată. Mai
mult, q , E și m sînt constante, deci și a_y
este constant, adică mișcarea pe oy este chiar
uniform accelerată.

c) Viteza pe direcția oy va fi:

$$\vec{v}_{oy} = 0; \quad \vec{v}_y = \vec{a}_y t \text{ de componentă } \boxed{v_y = a_y t} \quad (35)$$

d) Spațiul parcurs pe direcția oy pînă la momen-
tul t :

$$y = \frac{1}{2} a_y t^2; \quad \boxed{y = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2} \quad (36)$$

4. Traiectoria particulei între armăturile condensatorului.

a) Întorcând în (36) pe t din (34), avem:

$$y = \frac{1}{2} \frac{qE}{m v_0^2} x^2$$

și știind că în câmp uniform

$E = \frac{U}{d}$, obținem:

$$y = \frac{1}{2} \frac{qU}{md v_0^2} x^2 \quad (37)$$

care, pentru $x > 0$, este ecuația unui arc de parabolă.

Pradar, traiectoria particulei între armăturile condensatorului este un arc de parabolă.

b) Din (37) se vede că deviația unei particule electrice, în câmp electric uniform dintre plăcile condensatorului plan este proporțională cu tensiunea U dintre armături.

5. Mărima deviației particulei electrice la ieșirea dintre armăturile condensatorului.

Făcând $x = x_1$ în (37) obținem: $y_1 = \frac{qU}{2md v_0^2} x_1^2 \quad (38)$

6. Deviația y_2 a particulei după ieșirea dintre armăturile condensatorului.

a) La ieșirea din câmpul electric uniform particula se va mișca în continuare rectiliniu și uniform, cu viteza \vec{v} avută în momentul ieșirii. Avem:

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$$

cu $v_x = v_0$ și $v_y = a_y t_1$ (vezi (30) și (35)), unde t_1 este timpul de parcurgere a câmpului electric. Scotem t_1 din (32) și ducem în (35):

$$t_1 = \frac{x_1}{v_0}; \quad v_y = a_y \cdot \frac{x_1}{v_0} \quad \text{Cum din (34)}$$

avem a_y , obținem, întorcând și $E = \frac{U}{d}$:

$$v_y = \frac{qE}{m} \frac{x_1}{v_0}; \quad \boxed{v_y = \frac{qU}{md v_0} x_1}$$

b) Din figura, alegând convenabil triunghiurile dreptunghice, putem scrie:

$$y_2 = x_2 \cdot \gamma_2; \quad \gamma_2 = \frac{v_y}{v_x} = \frac{qU}{md v_0^2} x_1 \cdot \frac{1}{v_0}$$

$$\gamma_2 = \frac{qU}{md v_0^2} x_1 \quad \text{deci} \quad \boxed{y_2 = \frac{qU}{md v_0^2} x_1 x_2} \quad (39)$$

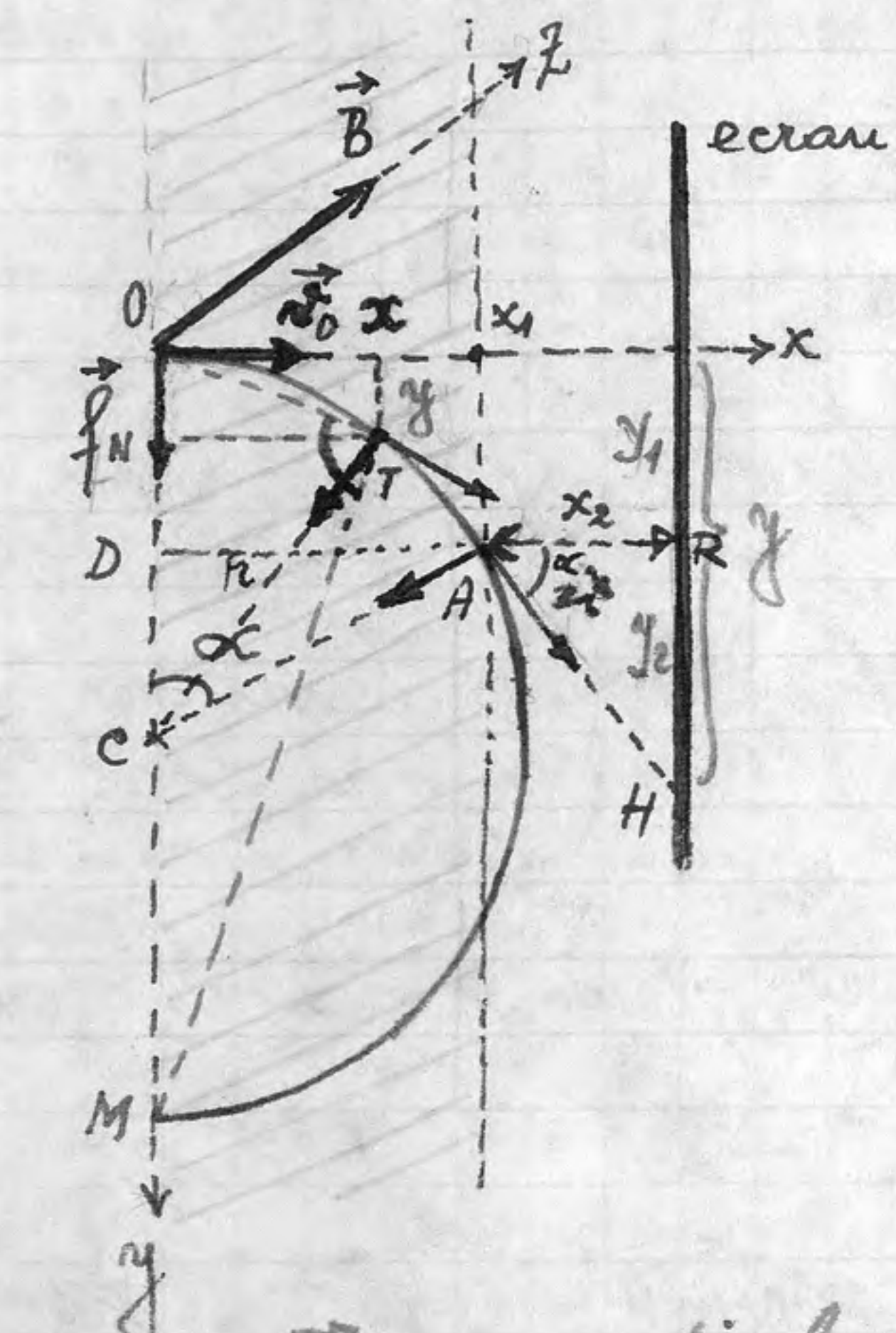
7. Deviația totală y .

$$y = y_1 + y_2 = \frac{qU}{2md v_0^2} x_1^2 + \frac{qU}{md v_0^2} x_1 x_2$$

$$\boxed{y = \frac{qU}{2md v_0^2} (x_1^2 + 2x_1 x_2)} \quad (40)$$

10.8. MISCAREA PURTĂTORILOR DE SARCINĂ

ÎN CÂMPUL MAGNETIC UNIFORM.



1. Trajectoria experimentală.

Falsăm câmp magnetic de inducție \vec{B} parționale o particulă de masă m și sarcină electrică

$q < 0$, cu viteza ini-

tială \vec{v}_0 perpendiculară pe \vec{B} .

2. Formula traiectoriei.

De partea cîmpului va acționa asupra particulei forța Lorentz

$$\vec{f} = q(\vec{v}_0 \times \vec{B})$$

orientată ca în figura, întrucât $q < 0$. Cum

$\vec{f} \perp \vec{v}_0$, \vec{f} nu va modifica modulul

vitezei, ci doar direcția ei. \vec{f} fiind

constantă în modul, va determina

mișcarea particulei pe un cerc

3. Calculul razei traiectoriei.

Având $\vec{v}_0 \perp \vec{B}$, raza are

$$r = \frac{mv_0}{qB}$$

\vec{F} având rol de forță centripetă, putem scrie:

$$qv_0B = \frac{mv_0^2}{r}$$

de unde scoatem raza traiectoriei:

$$r = \frac{mv_0}{qB} \quad (41)$$

4. Calculul deviației y la un anumit det, când particula a pătruns în câmp la o "adâncime" x .

Dim triunghiul dreptunghiular înscris în semicercul din figură, avem, aplicând teorema înălțimii ($HN=x$),

OTM, $x^2 = y(2r-y)$ sau $x^2 = 2ry - y^2$

$$x^2 = y(2r-y) \text{ sau } x^2 = 2ry - y^2$$

Cum deviația y este mică, y^2 este neglijabil, și

$$x^2 \approx 2ry$$

$$y \approx \frac{x^2}{2r}$$

sau, înlocuind pe r din (41):

$$y \approx \frac{qB}{2mv_0} x^2 \quad (42)$$

5. Deviația y_1 la ieșirea din câmpul magnetic de adâncime x_1 :

$$y_1 = \frac{qB}{2mv_0} x_1^2 \quad (43)$$

6. Calculul deviației y_2 a particulei după ieșirea din câmpul magnetic.

La ieșirea din câmpul magnetic de adâncime x_1 , particula se va mișca rectiliniu și uniform pînă la ecran, cu viteza \vec{v} avută în momentul ieșirii. Se observă din ΔARH și ΔADC :

$$y_2 = x_2 \tan \alpha \quad ; \quad \tan \alpha \approx \sin \alpha = \frac{x_1}{r}$$

deoarece α este foarte mic. Atadar:

$$y_2 = \frac{x_1 x_2}{r} \quad ; \quad y_2 = \frac{qB x_1 x_2}{mv_0} \quad (44)$$

7. Calculul deviației totale y .

$$y = y_1 + y_2 = \frac{qB}{2mv_0} x_1^2 + \frac{qB}{mv_0} x_1 x_2$$

$$y = \frac{qB}{2mv_0} (x_1^2 + 2x_1 x_2) \quad (45)$$

8. Calculul vitezei angulare a particulei.

$$\omega = \frac{v}{r} \quad ; \quad \omega = \frac{qB}{m} \quad (46)$$

9. Calculul frecvenței mișcării circulare a particulei în câmp magnetic.

$$a) \quad \nu = \frac{\omega}{2\pi} \quad ; \quad \nu = \frac{qB}{2\pi m} \quad (47)$$

M.1. FENOMENUL DE INDUCȚIE ELECTROMAGNETICĂ

44-
Dacă câmpul este constant ($B = \text{const}$),
v) depinde doar de $\frac{q}{m}$, care este specific
particulei. Asadar, și frecvența este specifică
particulei și nu depinde de viteza acesteia.

b) Dacă viteza particulei crește, din

$$r = \frac{mv}{qB}$$

decurge că ea va descrie un cerc de rază
mai mare, dar timpul necesar pentru
parcurgerea unei circumferințe rămâne cons-
tant. În afară:

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi}{B} \cdot \frac{m}{q}$$

La $B = \text{const}$ (câmp constant), iar $\frac{m}{q} = \text{const}$. pentru

- o) particulele slăbi, evident $T = \text{const}$.
- 10. Aplicații ale mișcării particulelor încărcate în câmp magnetic:
a) Proprietatea anterioară stă la baza construcției
ciclotronului, dispozitiv accelerator de particule.

b) De baza relației (44) se determină
masa ionilor cu ajutorul unui dispo-
zitiv numit spectrograf de masă.

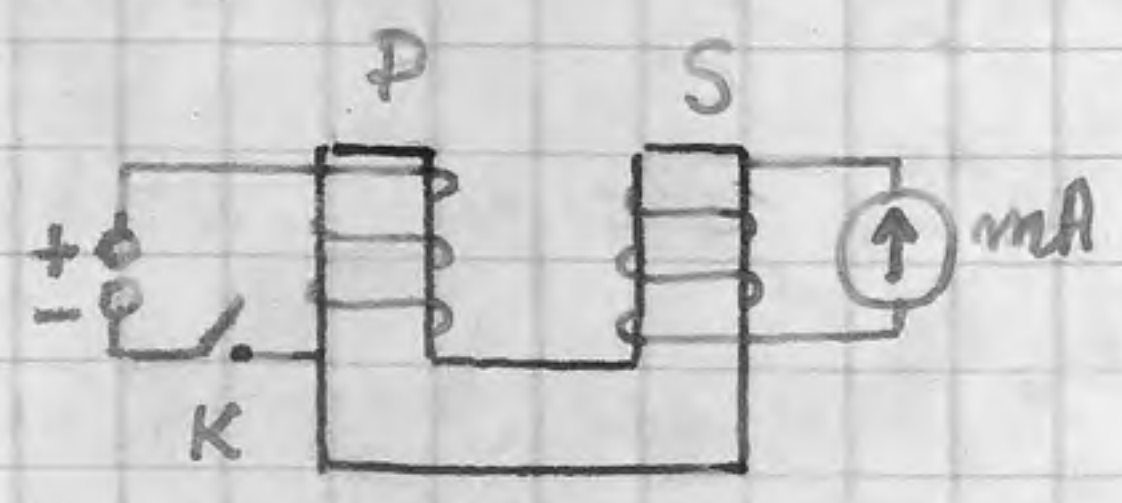
1. Esența fenomenului de inducție electromagnetice.

a) Constă în generarea unui curent electric
de către un câmp magnetic variabil în timp.

b) A fost descoperit de M. Faraday în 1831, care
porund de la descoperirea lui H. Oersted din 1820,
aceea că un curent electric generează un câmp
magnetic, și-a pus problema dacă legătura cu
este și reciprocă, adică, dacă în anumite con-
diții, un câmp magnetic nu poate genera
un curent electric.

2. Evidențierea fenomenului pe cale experimentală.

a) Generarea curentului indus într-o bobină



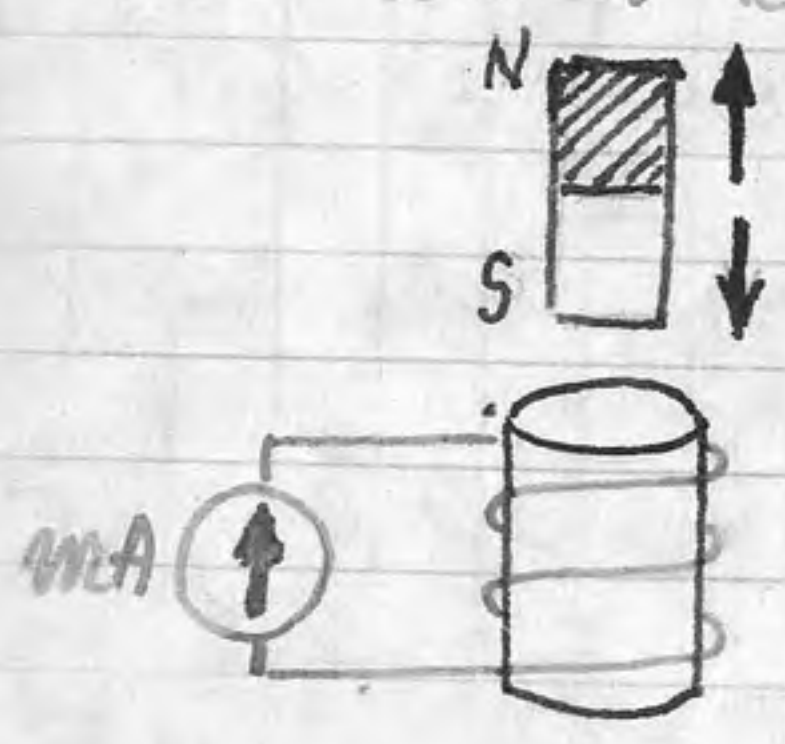
S - fire secundar - aflată
în circuit închis cu un
miliampermetru, dar

fără sursă de curent, situată în câmpul
magnetic generat de o altă bobină P - fire
primar - alimentată la o tensiune continuă

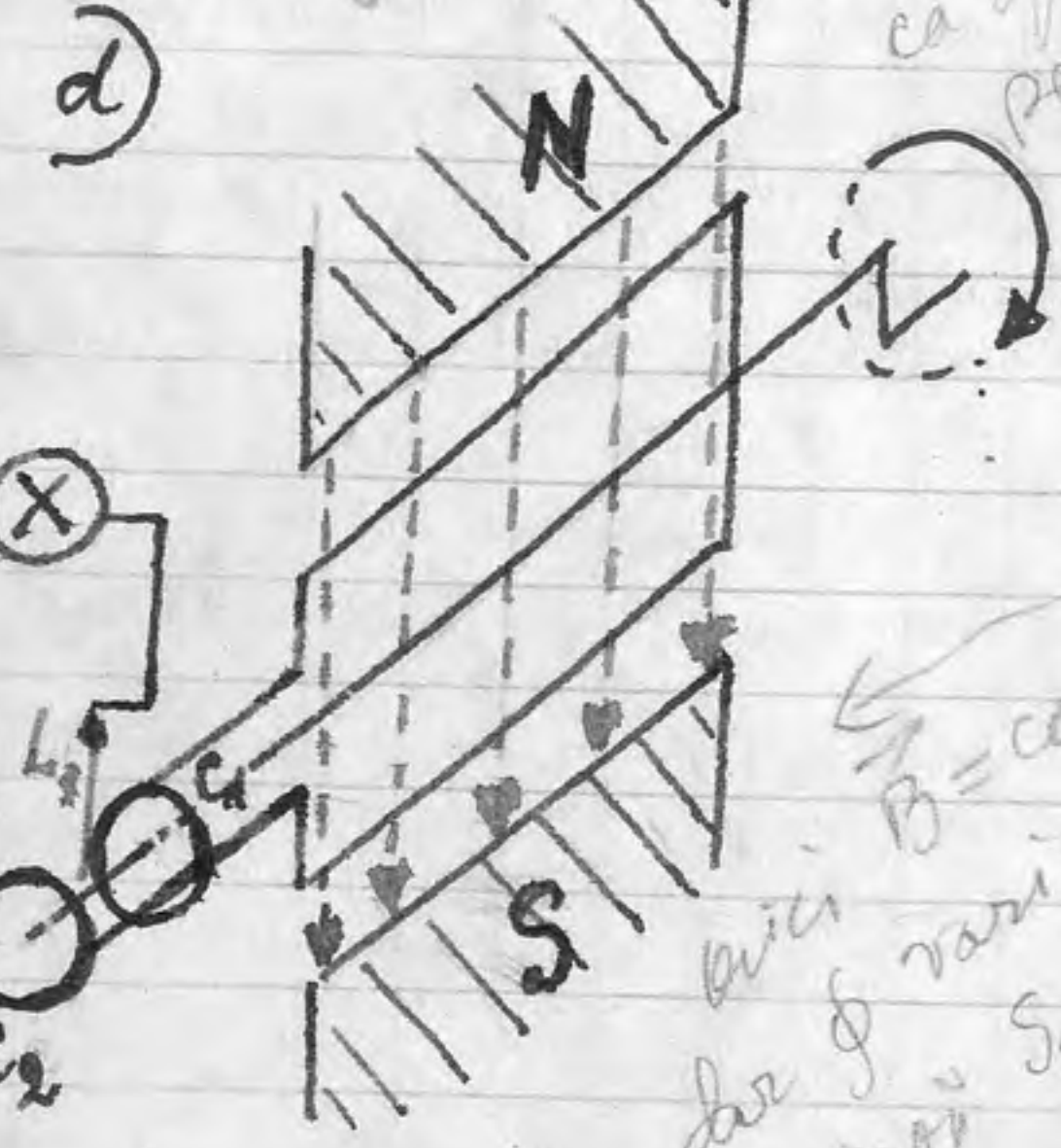
și arând în circuit un întrerupător K (prin sta-
bilitatea și întreruperea curentului electric în primar).

b) Obținerea aceluiași efect prin mișcarea se-
cundarului S pe miezul său de fier, dacă în
primar există curent staționar.

c) Inducerea curentului într-o bobină reali-
mentată la o sursă de curent, aflată în cir-
cuit închis cu un miliampermetru, și situ-



și magnet.



d) Inducția curentului
electric într-un cadru
aflat în circuit închis
cu un bec (sau un mi-
liampermetru), într-un
câmp magnetic cons-
tant, prin variația neeghivalenței dintre supra-

ata în câmpul unui mag-
net natural ^{pe de} prin miș-
carea ^{relativă} dintre bobina
și magnet.

Inducția curentului
electric într-un cadru
aflat în circuit închis
cu un bec (sau un mi-
liampermetru), într-un
câmp magnetic cons-
tant, prin variația neeghivalenței dintre supra-

fața spirei și inducția magnetică (rotirea cadrului).

3. Interpretarea rezultatelor experimentale pentru
dezvăluirea cauzelor producerii curentului de inducție

Se constată că,
a) în fiecare din experimentele prezentate, curen-
tul indus într-o spirală apare și dispare
cât timp spira este străbătută de un
flux magnetic Φ variabil în timp.

(Afirmarea va fi riguros justificată pentru
fiecare experiment).

b) Deducem că producerea curentului de in-
ducție este determinată de variația fluxu-
lui magnetic prin suprafața delimitată de
circuitul indus.

4. Apariția unei tensiuni electromotoare într-un
circuit străbătut de un flux magnetic va-
riabil în timp.

a) Se repetă, pe rând, fiecare din expe-
rimentele anterioare, cu circuitul se-
cundar întrerupt. Se intercalează

un voltmetru între capetele întrerupte și se constată existența unei tensiuni, atât timp cât variază fluxul magnetic (vezi mai departe fig. 4a).

b) Dacă se închide circuitul, această tensiune electromotoare va da naștere curentului indus. (Vezi mai departe fig. 4b').

5. Definiția fenomenului de inducție electromagnetice.

Poate fi dată pe baza celor spuse anterior:

Fenomenul de inducție electromagnetice constă în apariția unei tensiuni electromotoare într-un circuit străbătut de un flux magnetic variabil.

6. Generarea unui cîmp electric de către un flux magnetic variabil în timp.

a) Apariția curentului indus dovedește existența unui cîmp electric, care deplasează purtătorii de sarcină electrică liberi din circuit.

Acest cîmp electric nu se datorează circuitului, el există și în absența a-

restuia, fiind naștere datorită variației fluxului magnetic.

b) J. C. Maxwell a demonstrat teoretic și ulterior s-a confirmat experimental că în jurul unui flux magnetic variabil în timp apare un cîmp electric cu linii de cîmp închise (vezi fig. 6b).



7. Altă definiție, mai generală, a fenomenului de inducție electromagnetice.

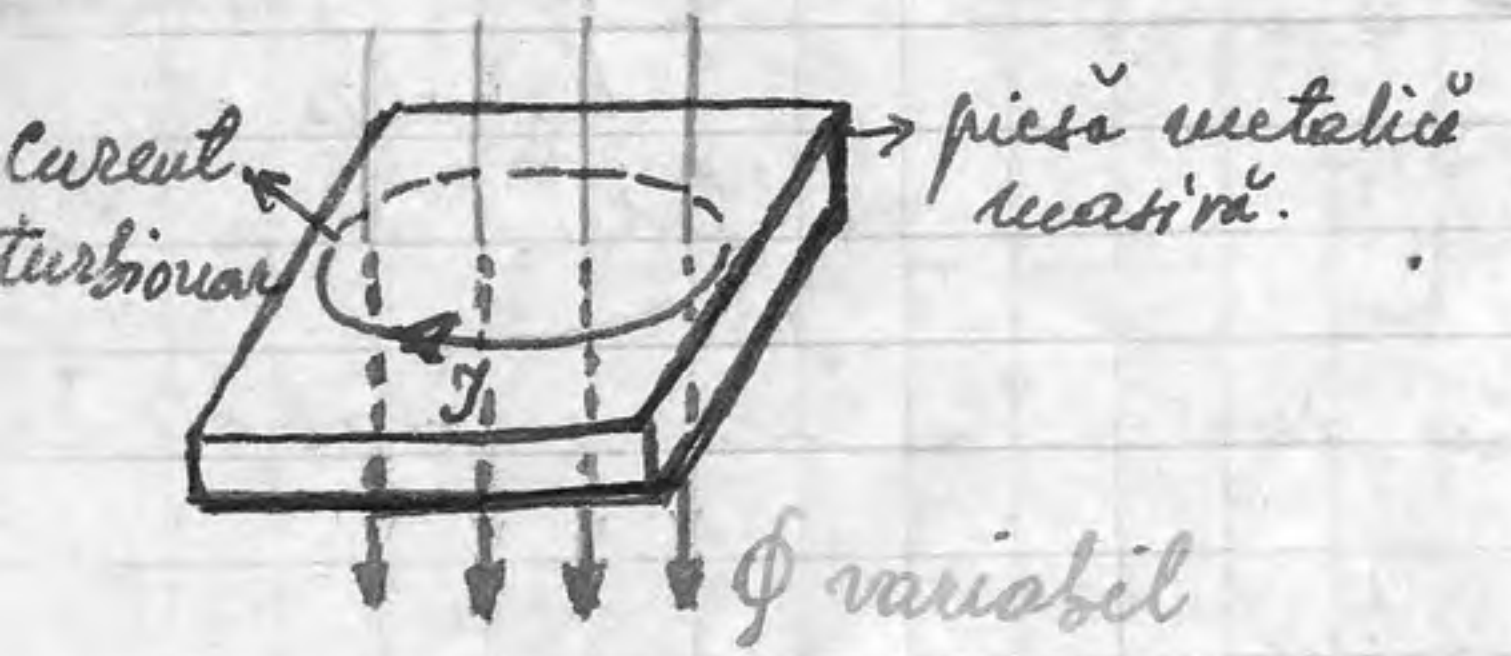
Fenomenul de inducție electromagnetice constă în apariția unui cîmp magnetic electric cu linii de cîmp închise în regiunea în care există un flux magnetic variabil în timp.

8. Curenti turbionari sau curenti Foucault.

a) Sînt curenti electrici care apar, asemănători unor vârtejuri, în piesele metalice mari din diverse masini electrice, dacă acestea

sunt străbătute de fluxuri magnetice variabile, fie datorită rotației pieselor în cîmpuri magnetice constante, fie datorită variației cîmpurilor magnetice.

Cîmpul electric indus în acest mod deplasază electronii liberi ai metalului de-a lungul liniilor de cîmp, formîndu-se curenți electrice ca urmare a vitezei.

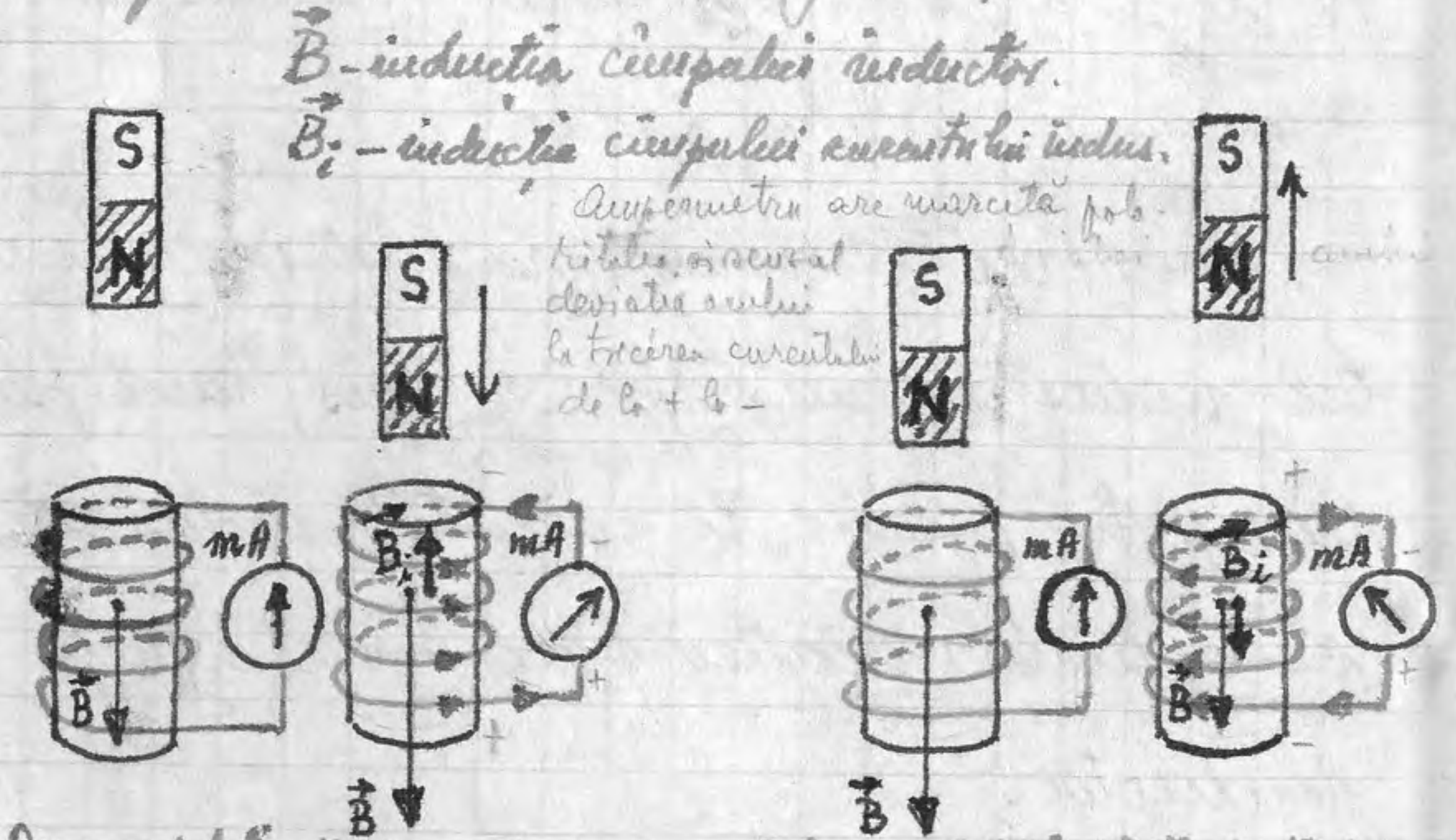


b) În general, curenții turbionari au efecte nedorite: încălzesc piesele metalice, consumă energie, etc. Pentru a evita formarea lor, este necesar a se întrerupe „circuitul” prin care se formează. În acest scop piesele masive metalice din dispozitivele electrice se înlocuiesc cu foite metalice alăturate (tole metalice).

9. Sensul curentului electric indus.

a) În toate experimentele prin care s-a pus în evidență fenomenul de inducție electromagnetică se constată că sensul curentului indus este unul la creșterea și altul la descreșterea fluxului magnetic inductor.

b) În cazul experimentului expus la (2c) sensul curentului indus este redat în figura alăturată pentru cazul apropierii, apoi pentru cazul îndepărtării dintre magnet și bobină.



a) Repaus relativ	b) Apropiere	c) Repaus relativ	d) Îndepărtare
$\vec{B} = \text{const.}$	\vec{B} crește	$\vec{B} = \text{const.}$	\vec{B} scade
$\Phi = \text{const.}$	Φ crește	$\Phi = \text{const.}$	Φ scade
$\vec{B}_i = 0$	\vec{B}_i sens opus lui \vec{B}	$\vec{B}_i = 0$	\vec{B}_i același sens cu \vec{B}
$\Phi_i = 0$	Φ_i se opune creșterii lui Φ	$\Phi_i = 0$	Φ_i se opune scăderii lui Φ

c) Evident, curentul indus în bobina creează la rândul său un câmp magnetic, de inducție \vec{B}_i , al cărei direcție și sens se stabilesc cu regula burghinului, funcție de sensul curentului indus.

d) În toate cazurile se constată un asemenea sens a curentului indus, înțit, prin fluxul magnetic pe care îl generează, se opune variației fluxului inductor (fluxul indus se opune cauzei care îl generează).

10. Regula lui Lenz pentru determinarea sensului curentului indus.

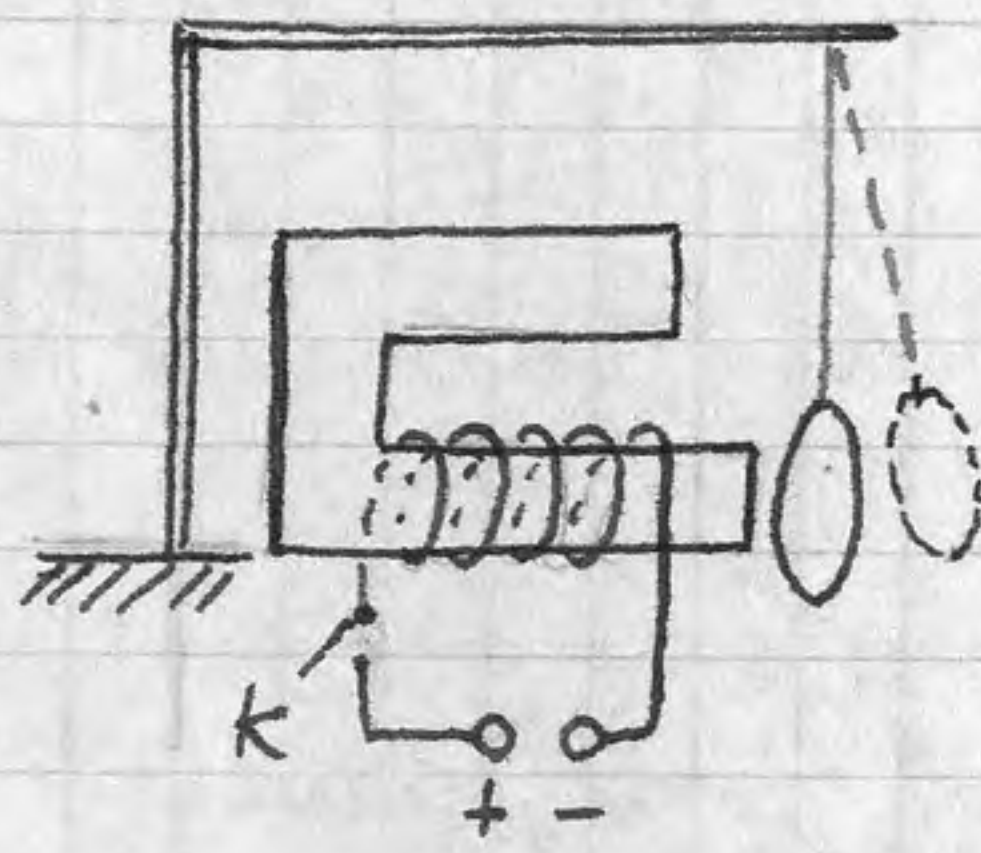
Tensiunea electromotoare indusă și curentul indus au un astfel de sens, înțit fluxul magnetic produs de curentul indus să se opună variației fluxului magnetic inductor.

11. Verificarea experimentală a regulii lui Lenz.

a) Se face cu oricare din experimentele

cu care se pune în evidență fenomenul de inducție electromagnetică (expuse anterior).

b) În același scop servește experimentul următor:



La un niș de fier în formă de U se introduce o ramură în interiorul unei bobine, care are rol de primar. În fața acestei ramuri este așezat de un

fir de alai sau inel de aluminiu, ce are rol de secundar. Când primarul este pus la o sursă de tensiune continuă prin intermediul întrerupătorului K, inelul este respins de bobină. În timpul întreruperii curentului în primar, inelul este atras de bobină.

c) Efectele observate ne arată că la stabilirea curentului în primar, inelul ia naștere un curent indus de sens contrar celui din primar (de aceea se

resping). Dar curenții de sens opus dau induc-
ții magnetice de sens opus.

Asadar, la închiderea circuitului în
primar, când curențul inductor și fluxul
magnetic inductor cresc, cîmpul mag-
netic al curențului indus este de sens
opus celui inductor, deci se opune
creșterii:

d) La întreruperea curențului în primar
atragera metalului dovedeste că, în primar
și în el curenții au același sens. Deci și
inducțiile magnetice ale lor vor avea a-
celași sens.

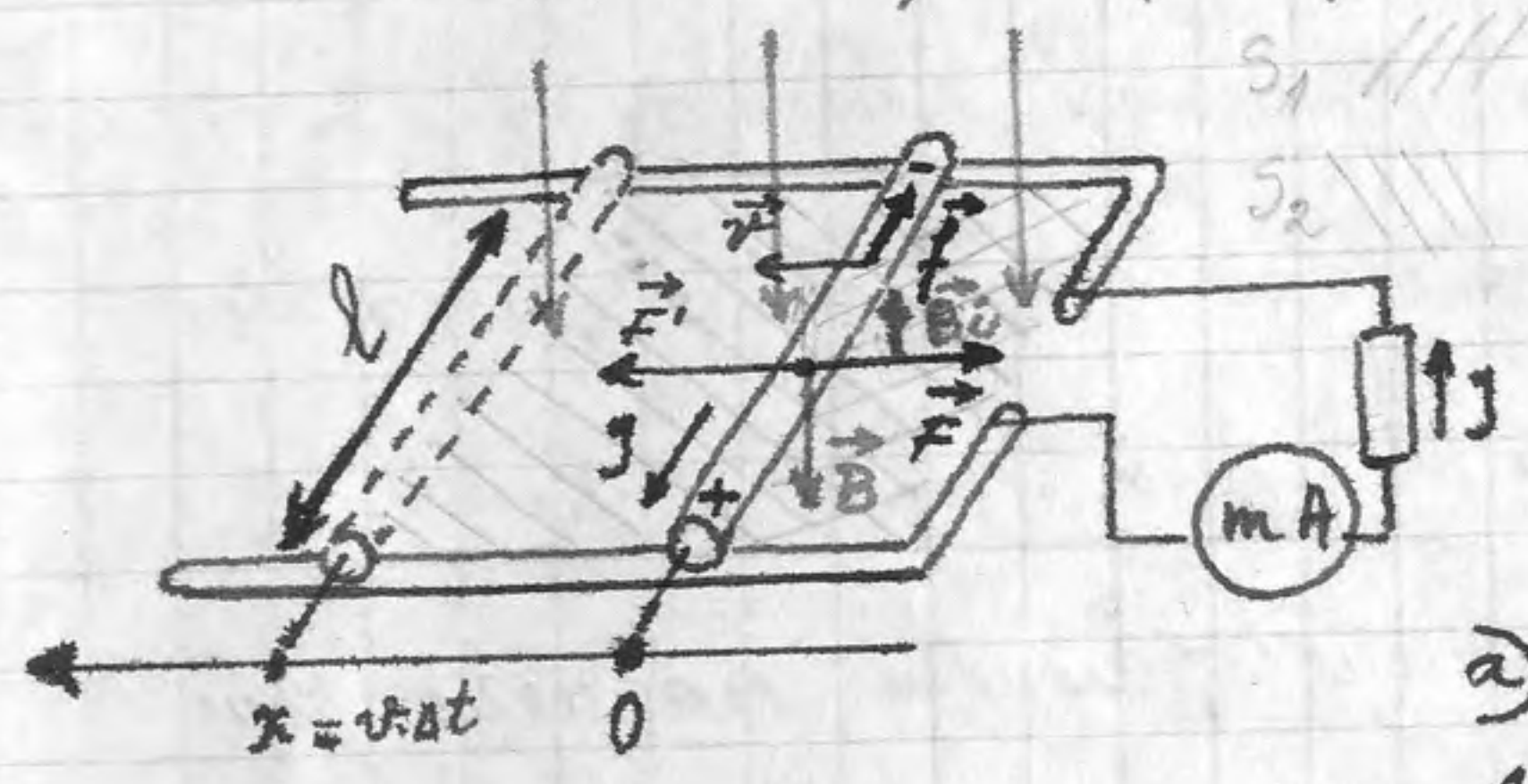
Asadar, la întreruperea circuitului în
primar, când curențul inductor și fluxul
magnetic inductor scad, cîmpul magne-
tic al curențului indus este de același
sens cu cel inductor, deci se opune
scăderii acestuia.

11.2. LEGEA INDUCIEI ELECTROMAGNETICE

1. Sa se refere ea.

Stabilește legătura între tensiunea electro-
motive (t. e. m.) indusă și variația fluxu-
lui magnetic inductor.

2. Schema de principiu pentru deducerea legii:



capul unei spire
dreptunghiulare cu
o latură mobilă.

a) Conductorul
de lungime l (deci $l > 0$) alunecă fără frecări
cu $\vec{v} = \text{const.}$ pe suporturile conductoare care
formează alte două laturi ale spirei, sub
acțiunea unei forțe exterioare \vec{F}' aflată
în planul spirei și perpendiculară pe latura
mobilă.

b) Spira este străbătută de un cîmp

magnetic uniform de inducție \vec{B} , perpendiculară pe planul spirei. Avem $\vec{B} \perp \vec{v}$.

c) Așazăm spirei o axă ox paralelă la \vec{F} , cu originea la intersecția axei cu suportul laturii mobile în poziția sa inițială și sensul spre stânga figurii.

d) Notăm: $\|\vec{B}\| = B$, deci $B > 0$;
pr. ox $\vec{v} = v$, deci $v > 0$ dacă \vec{v} are sensul lui ox și $v < 0$ dacă \vec{v} are sens opus lui ox.
Sensul lui \vec{v} depinde de cel al lui \vec{F} , adică de sensul deplasării laturii mobile a spirei.

3. Calculul variației fluxului magnetic prin cadrul la deplasarea laturii mobile.

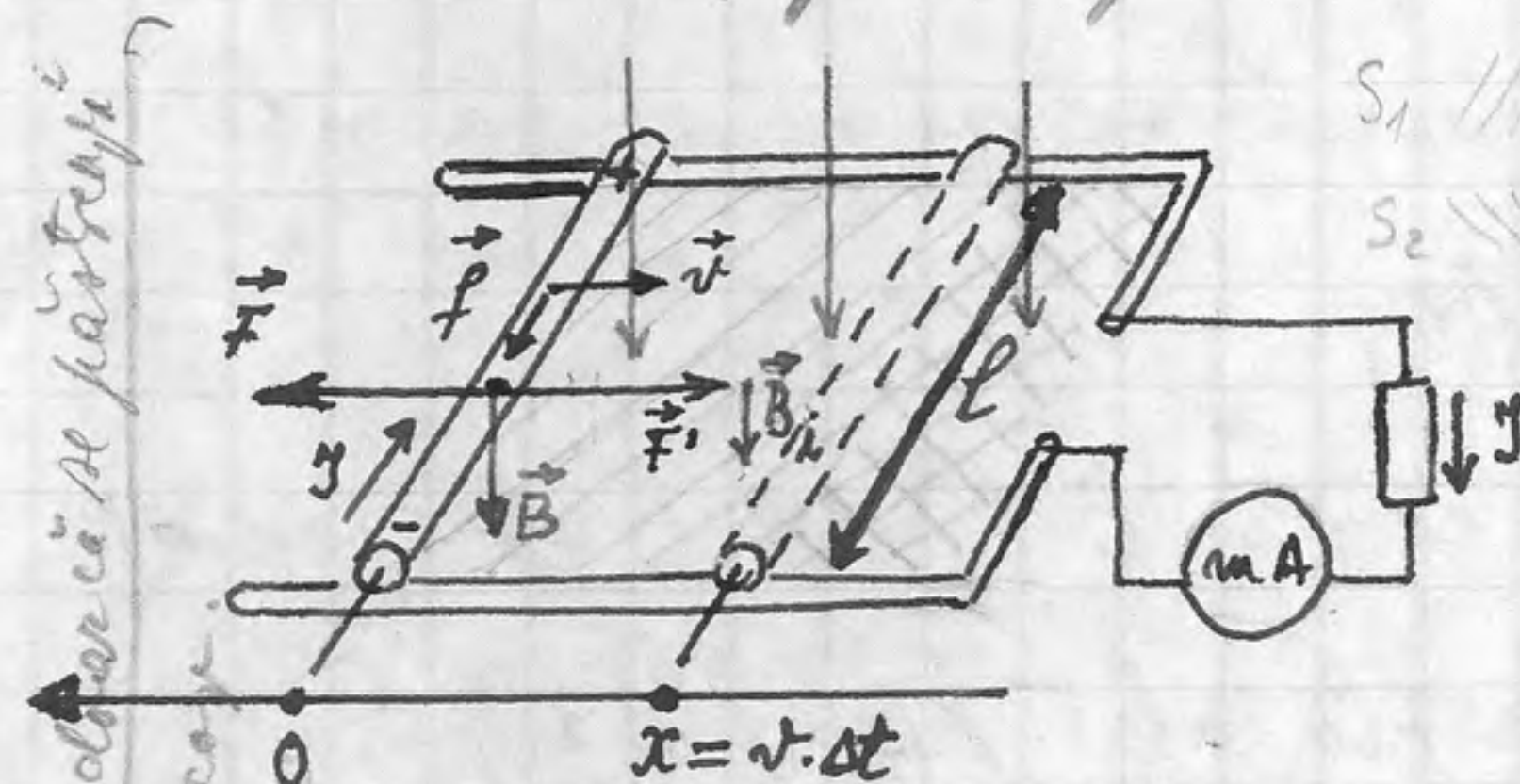
a) Dacă \vec{F} are sensul din figura anterioară, aria circuitului străbătut de câmpul magnetic de inducție $\vec{B} = \text{const.}$ este de la S_1 la S_2 , deci fluxul prin suprafața cadrului crește cu

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = BS_2 - BS_1 = B(S_2 - S_1) = B \cdot \Delta S.$$
$$\boxed{\Delta\phi = B \cdot \Delta S} \quad (1)$$

Ajutându-ne de figură (1) poate fi scrisă și:

$$\boxed{\Delta\phi = Blx} \quad (2) \quad \text{sau} \quad \boxed{\Delta\phi = Blv \cdot \Delta t} \quad (3)$$

b) Dacă \vec{F} are sensul opus celui din figura anterioară, prin deplasarea laturii mobile



aria circuitului străbătut de $\vec{B} = \text{const.}$ scade de la

S_1 la S_2 , deci fluxul prin suprafața spirei scade cu

$$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = B(S_2 - S_1) = B \cdot \Delta S < 0 \text{ deoarece } S_2 < S_1.$$

Observând că, în acest caz avem:

$$\Delta\phi < 0; \Delta S < 0; x < 0; v < 0$$

putem scrie:

$$\Delta\phi = B \cdot \Delta S \quad \Delta\phi = Blx \quad \Delta\phi = Blv \cdot \Delta t$$

Concluzionăm că (1), (2) și (3) sînt valabile în ambele alternative, dacă ținem seama de semnele lui x și v .

4. Explicarea apariției t.e.m. induse și a sensului ei pe baza regulii lui Lenz.

Observație: Dintre (4) și (5) este suficientă cunoașterea uneia din explicații, de preferință (5).

Facultativ:
Pe egal semnificație se va spione de parcă se păstrează
relatiile anterioare și în acest caz

a) Variatia de flux $\Delta\phi$ prin spiră, conform regulii lui Lenz, va induce în ea o t.e.m. „e”

b) Aceasta va avea un astfel de sens, încât, prin inducția magnetică \vec{B}_i a curentului electric indus în spiră se va opune variației fluxului inductor.

Se observă că $\vec{B}_i \parallel \vec{B}$ (perpendicularare pe spiră).

c) La creșterea fluxului ϕ (fig. 2a), \vec{B}_i va avea sens opus lui \vec{B} , în tendința de a micșora pe \vec{B} , și a se opune astfel creșterii lui ϕ ($\phi = B \cdot S$). Pentru acest sens a lui \vec{B}_i , regula burghielui arată că prin spiră trebuie să treacă curentul indus I în sensul arătat în fig. 2a. T.e.m. indusă trebuie să aibă polaritatea indicată în figura respectivă prin + și - puse la capetele conductorului mobil.

d) La scăderea fluxului ϕ (fig. 3b), \vec{B}_i va avea același sens cu \vec{B} , în tendința de a măări pe \vec{B} și a se opune

facultati

astfel scăderii lui ϕ . Pentru acest sens a lui \vec{B}_i regula burghielui arată că prin spiră curentul indus trebuie să treacă în sensul arătat pe figura respectivă 3b (iar vers deit în capul figurii 2a). T.e.m. indusă are polaritatea indicată prin + și - scrise la capetele conductorului mobil.

5. Explicarea apariției t.e.m. induse și a sensului ei, folosind forța Lorentz aplicată electronilor liberi din conductorul mobil.

a) Electronii liberi din latura mobilă a spirii se mișcă cu viteza $\vec{v} = \text{const.}$ a acesteia. Fiind particule electrizate în mișcare într-un câmp magnetic uniform de inducție \vec{B} , asupra lor acționează forța Lorentz

$$\vec{f} = -e(\vec{v} \times \vec{B})$$

b) La urmare, în capul figurii 2a electronii se acumulează la capatul îndepărtat, care se încarcă cu potențial electric negativ, având loc o sărăcire în electroni

a capătului apropiat, care se încarcă cu potențial pozitiv.

Între capetele laturii mobile apare o diferență de potențial ce reprezintă t.e.m. inclusă, care va determina în circuitul exterior un curent de inducție orientat de la + la -.

c) În cazul figurii 3b lucrurile se petrec asemănător, numai că polaritatea t.e.m. la capetele laturii mobile, deci și sensul curentului de inducție, se inversează.

6. Apariția unei forțe electromagnetice \vec{F} ce acționează asupra conductorului mobil.

Conductorul în mișcare în câmpul magnetic de inducție $\vec{B} = \text{const}$, fiind parcurs de curentul indus I , va fi acționat de o forță electromagnetice

$$\vec{F} = I(\vec{l} \times \vec{B})$$

în carei direcție coincide cu cea a lui \vec{F}' , dar sensul lui \vec{F} este opus sensului lui \vec{F}' .

7. Condiția deplasării uniforme a conductorului mobil.

Vom avea $\vec{v} = \text{const}$. dacă $\vec{F}' = -\vec{F}$, adică atunci când modulele vectorilor \vec{F}' și \vec{F} sunt egale
 $F' = F$
(cu $\|\vec{F}'\| = F'$ și $\|\vec{F}\| = F$)

8. Calculul lucrului mecanic al forței exterioare \vec{F}' .

a) Indiferent în ce sens se deplasează latura mobilă, \vec{F}' își deplasează punctul de aplicatie în direcția și sensul ei, deci lucrul mecanic L' efectuat de ea este pozitiv: $L' > 0$.

b) Dacă \vec{F}' acționează în sensul pozitiv al lui Ox , avem $x > 0$ și cum $F = BIl$:

$$L' = F'x = Fx = IBlx = IB\Delta S, \text{ cu } \Delta S > 0$$

adică $L' = IB\Delta S$ sau $L' = IB|\Delta S|$

c) Dacă \vec{F}' acționează în sensul negativ al lui Ox , avem $x < 0$ și

$L' = F' \cdot |x| = F \cdot |x| = JB' |x| = JB |\Delta S|$ cu $\Delta S < 0$,
 adică $L' = -JB \Delta S$ sau $L' = JB |\Delta S|$

d) Așadar, indiferent de sensul deplasării
 laturii mobile, lucrul mecanic L' al
 forței exterioare \vec{F}' va fi:

$L' = JB |\Delta S|$

Cum avem simultan și relația (1), din ea
 obținem: $|\Delta \phi| = B \cdot |\Delta S|$

care introdusă în cea anterioară ne dă

$L' = J |\Delta \phi|$ (4)

9. Calculul modului t.e.w. "e" induse
 în spirală.

a) Prin lucrul mecanic L' al forței
 exterioare \vec{F}' se transmite în circui-
 it energia necesară deplasării par-
 ticularilor electrice libere din conductorul
 mobil (electronii), spre capetele lui,
 creându-se astfel cîmpul electric in-
 dus și curentul indus.

b) Energia transmisă din exterior, numeric egală
 cu L' , este reutilizată pentru a transporta prin
 întregul circuit parciua electrică $|Q|$.

T.e.w. indusă "e" reprezintă, în modul,
 energia necesară pentru a transporta prin în-
 tregul circuit al spirii unitatea de sarcină po-
 zitivă:

$|e| = \frac{L'}{|Q|}$ (5)

c) Folosind (4), relația (5) devine, dacă ținem
 seama că: $|Q| = J \cdot \Delta t$

$|e| = \frac{J |\Delta \phi|}{J \cdot \Delta t}$ sau $|e| = \frac{|\Delta \phi|}{\Delta t}$ (6)

10. Convenția de semn pentru t.e.w. indusă într-o
 spirală.



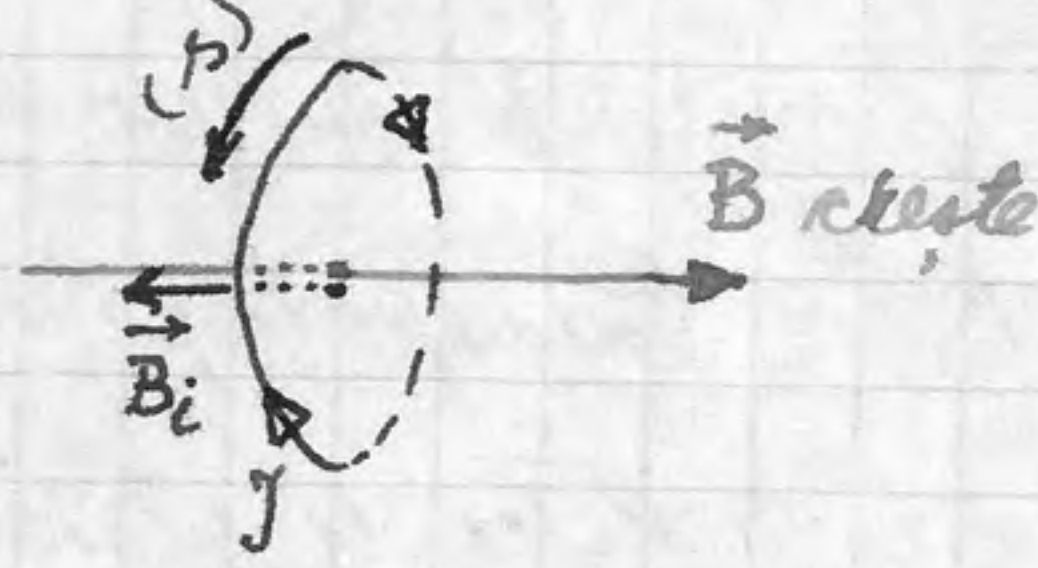
a) Fie o spirală străbătută de cîm-
 pul magnetic inductor \vec{B} .
 Se alege ca sens (s) de

parcursere a spirii, sensul de rotație a
 burghiului așezat perpendicular pe spirală,
 ca să rămîna în sensul lui \vec{B} .

b) Se va considera $\epsilon > 0$ dacă geo-

reața nu curent indus de același sens cu
(12) și $e < 0$ în caz contrar.

11. Sursul t.e.m. induse „e” dacă ϕ crește.



a) Suprafața S a spirei fiind constantă, avem dacă ϕ crește:

$\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 = B_2S - B_1S = S(B_2 - B_1) > 0$ ($\phi_2 > \phi_1$).

Deci, $\Delta\phi > 0$ implică $B_2 > B_1$, adică \vec{B} crește.

b) Regula lui Lenz spune că \vec{B}_i va fi paralel cu \vec{B} , dar de sens opus, fiind ea se opune creșterii lui ϕ .

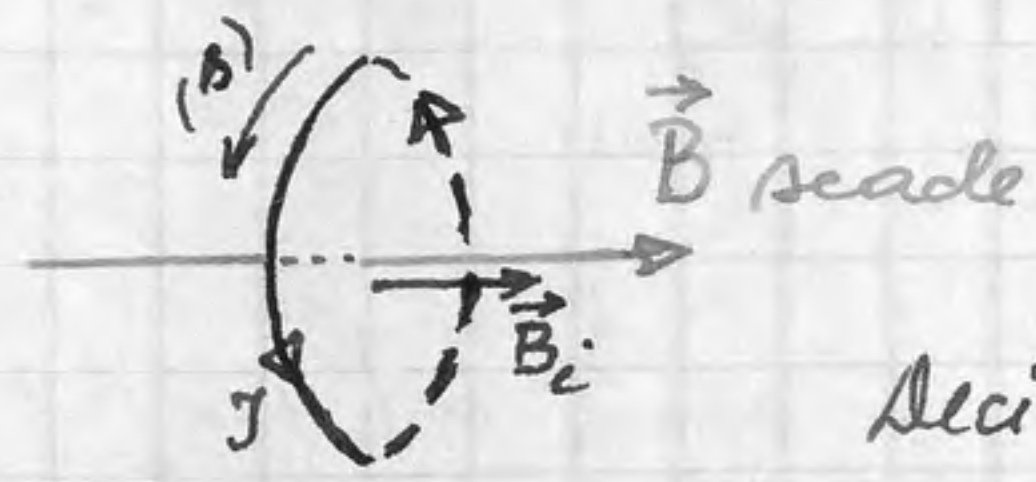
c) \vec{B}_i are un asemenea sens, dacă curentul indus I are sensul arătat în figură (găsit cu regula burghiuului).

d) În această situație convenția de semn pentru „e” ne dă $e < 0$.

Observăm că $\Delta\phi > 0$ atrage $e < 0$.

12. Sursul t.e.m. induse „e” dacă ϕ scade.

a) Dacă ϕ scade, avem



$\phi_2 < \phi_1$ și $\Delta\phi = \phi_2 - \phi_1 < 0$.

Deci $\Delta\phi = S(B_2 - B_1) < 0$

de unde $B_2 < B_1$. Rezultă că \vec{B} scade.

b) Conform regulii lui Lenz, \vec{B}_i va fi paralel cu \vec{B} și de același sens, fiind ea se opune scăderii lui ϕ .

c) Pentru ca \vec{B}_i să aibă un astfel de sens, este necesar să avem pentru curentul indus I sensul arătat în figură (găsit cu regula burghiuului).

d) În această situație convenția de semn pentru „e” ne dă $e > 0$.

Observăm că $\Delta\phi < 0$ atrage $e > 0$.

13. Expresia t.e.m. „e” induse într-o spire.

a) Din cele de mai sus rezultă că t.e.m. indusă „e” și variația fluxului prin spire $\Delta\phi$ sunt întotdeauna

nuca de sensuri contrare.

b) Această concluzie justifică scrierea relației (6) sub forma:

$$e = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad (7)$$

Raportul $\frac{\Delta \phi}{\Delta t}$ se numește viteză de variație a fluxului magnetic inductor.

c) Din (7) deducem următorul enunț al legii inducției electromagnetice (sau legea lui Faraday):

Tensiunea electromotoare indusă într-o spira este egală cu viteza de variație a fluxului magnetic prin suprafața spirei, luată cu semn schimbat.

d) Relația (7) demonstrată pe un caz particular de variație a fluxului magnetic inductor, se verifică în toate situațiile experimentale, indiferent de modul în care are loc variația fluxului magnetic inductor.

14. Dispozitiv ce transformă energia mecanică în energie electrică.

a) Un dispozitiv ca cel folosit pentru stabilirea legii inducției electromagnetice într-o spira străbătută de un flux magnetic variabil realizată, în fond, transformarea energiei mecanice chetuite prin lucrul făcut de forța exterioară \vec{F} , în energie electrică, prin intermediul câmpului magnetic de inducție \vec{B} .

Un asemenea dispozitiv are rol de generator de energie electrică.

b) După cum se va vedea, traversând acest principiu de obținere a energiei electrice va furniza curentul electric la scară industrială.

15. T.e.m. indusă într-o bobină cu N spire aflată într-un câmp ^{produs în exterior} magnetic variabil.

a) Fiecare spira a bobinei include o suprafață străbătută de același flux magnetic variabil. În fiecare spira se induce o

t. e. m. dată de (7). Notăm-o cu "e₀" avem:

numărul din care e = N e₀ = -N Δφ / Δt

e₀ = - Δφ / Δt

bobina cu N spire echivalentă d.p.v. al t.e.m. induse cu o grupare unică de N genera-

b) deoarece t.e.m. induse în fiecare din spirele bobinei se însumează, t.e.m. totală e = N e₀

"e" indusă în bobina cu N spire va fi de N ori mai mare decât e₀:

e = N e₀ = -N Δφ / Δt sau e = -N Δφ / Δt (8)

unde Δφ este variația fluxului inductor care străbate o singură spirală.

16. Spirală echivalentă cu o bobină din punctul de vedere al inducției electromagnetice.

a) Dacă notăm cu φ₀ fluxul printr-o spirală a bobinei, din (8) obținem:

e = -N Δφ₀ / Δt = - Δ(N φ₀) / Δt

Introducând notația: φ = N φ₀ avem:

e = - Δφ / Δt (9)

valabilă pentru bobina cu N spire.

b) Ce semnificație fizică are φ în

(9)?

Formulă de la formula relației

φ = N · φ₀

există uneori tendința a considera că, în timp ce φ₀ este fluxul inductor printr-o spirală "izolată", φ este fluxul inductor prin una din cele N spire alăturate ce compun bobina. Ca și cum prin alăturarea a N spire, fluxul fiecăreia din ele s-ar amplifica de N ori.

c) Acest mod de a privi lucrurile vine în contradicție cu faptul ușor de observat că prin alăturarea celor N spire, aceleasi linii de câmp care străbat o spirală, le străbat și pe celelalte.

Cum fluxul φ₀ este determinat de numărul liniilor care străbat normal suprafața spiralei, se vede că prin alăturarea celor N spire în cadrul bobinei fluxul φ₀ al unei spirale nu se modifică.

d) Scriem φ₀ = B S₀ și φ = N φ₀ = N B S₀

unde S_0 este suprafața unei spire. Avem:

$$\Phi = B(N S_0)$$

Notăm $S = N \cdot S_0$

și obținem $\Phi = BS$

Această relație exprimă fluxul magnetic creat de câmpul magnetic uniform de inducție \vec{B} printr-o spirală de suprafață $S = NS_0$.

e) Concluzem că Φ din (9) reprezintă fluxul creat de câmpul magnetic uniform de inducție \vec{B} în care se află bobina, printr-o spirală (imaginată eventual) de arie de N ori mai mare decât aria S_0 a unei spire a bobinei.

f) Întrucât câmpul magnetic inductor de inducție \vec{B} va crea aceeași t.e.m. de inducție într-o bobină cu N spire având suprafața unei spire S_0 , ca și într-o spirală de arie $S = NS_0$, vom

spune despre o asemănarea spirală ca este echivalentă cu bobina, din punct de vedere al inducției electromagnetice.

Bobina va putea fi deci asociată cu spirală echivalentă în sensul de mai sus, și numai în ce privește t.e.m. indusă.

17. T.e.m. indusă într-un conductor rectiliniu deplasat cu viteza \vec{v} constantă într-un câmp magnetic uniform de inducție \vec{B} , perpendicular pe linia de câmp.

Nu ar putea defini "convțional" fluxul unei bobine
sau $\Phi = N \vec{B} S_0 = NBS_0 \cos \alpha$?

a) La (3a) s-a obținut pentru acest caz relația (3) $\Delta \Phi = Blv \Delta t$

Substituind în (7) obținem:

$$\boxed{e = -Blv} \quad (10)$$

b) Observăm că pentru Φ crescător avem $\Delta \Phi > 0$ și $v > 0$, deci $e < 0$, iar pentru Φ descrescător avem $\Delta \Phi < 0$ și $v < 0$, deci $e > 0$, ceea ce este în acord cu convenția de semn pentru "e".

c) Lucrul (10) se scrie:

$$e = Blv \quad (11)$$

Întelegând prin toate literele care intervin
modurile mărimilor respective.

În acest caz sensul lui e este dat de:

Regula mîinii drepte: Se aşază mîna
dreaptă în lungul conductorului, astfel
încît vectorul \vec{B} să intre în palmă,
iar degetul mare să aibe direcția
și sensul lui \vec{v} . Cele patru degete
vor indica atunci sensul curentului
indus I .

Cum cînd sensul curentului indus, se
găsește sensul lui „ e ” folosind convenția avertată.

18. T.e.m. indusă într-un conductor rectiliniu
dacă \vec{v} face unghiul α cu \vec{B} .

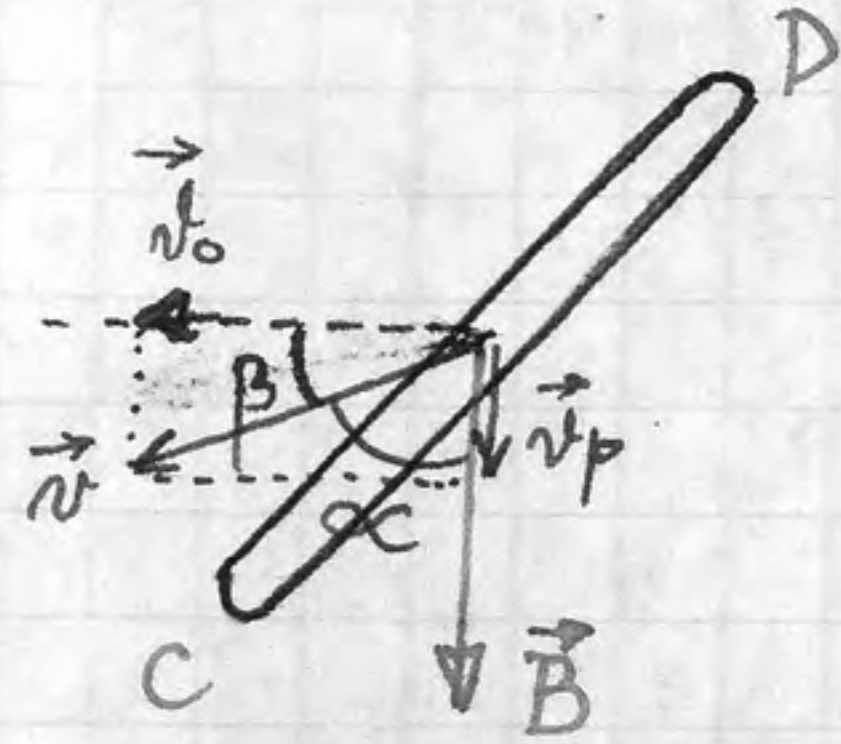
Se demonstrează că avem:

$$e = -Blv \sin \alpha \quad (12)$$

sau în moduli

$$e = Blv \sin \alpha \quad (13)$$

În adevăr, fie conductorul mobil CD
care este deplasat cu
viteza \vec{v} ce face un-
ghiul α cu \vec{B} .



\vec{v}_0 fiind vectorul ob-

ținut prin proiecția lui \vec{v} pe direcția per-
pendiculară pe liniile de câmp și \vec{v}_p proiec-
ția sa pe o direcție paralelă la \vec{B} ,
avem

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{v}_p$$

Decomponînd mișcarea pe cele două
conductorului CD în cele două mișcări
componente, de-a-lungul lui \vec{v}_0 și
de-a-lungul lui \vec{v}_p , observăm că una
din mișcări nu duce la variația de
flux, deci nici la scara de t.e.
m. de inducție - cea pe direcția lui
 \vec{v}_p .

Atadar, toată t.e.m. de inducție
„ e ” este creată de mișcarea pe direc-

ția lui \vec{v}_0 . Ori, aceasta a fost calculată:

$$e = -Blv_0$$

Din figura obținem:

$$N_0 = N \cos \beta = N \sin \alpha$$

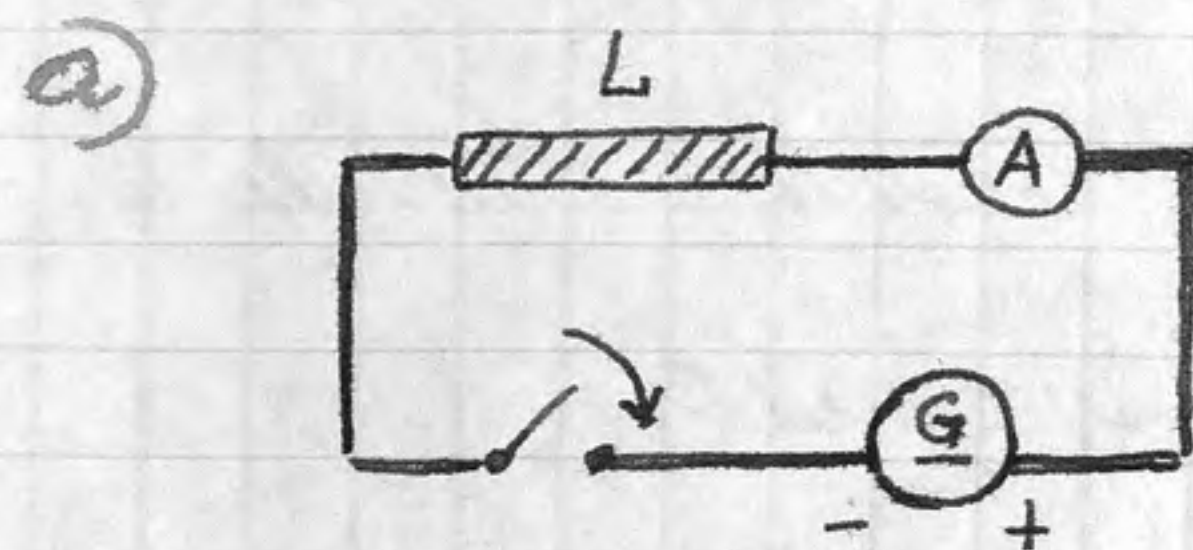
adică

$$e = -Blv \sin \alpha$$

c.t.d.

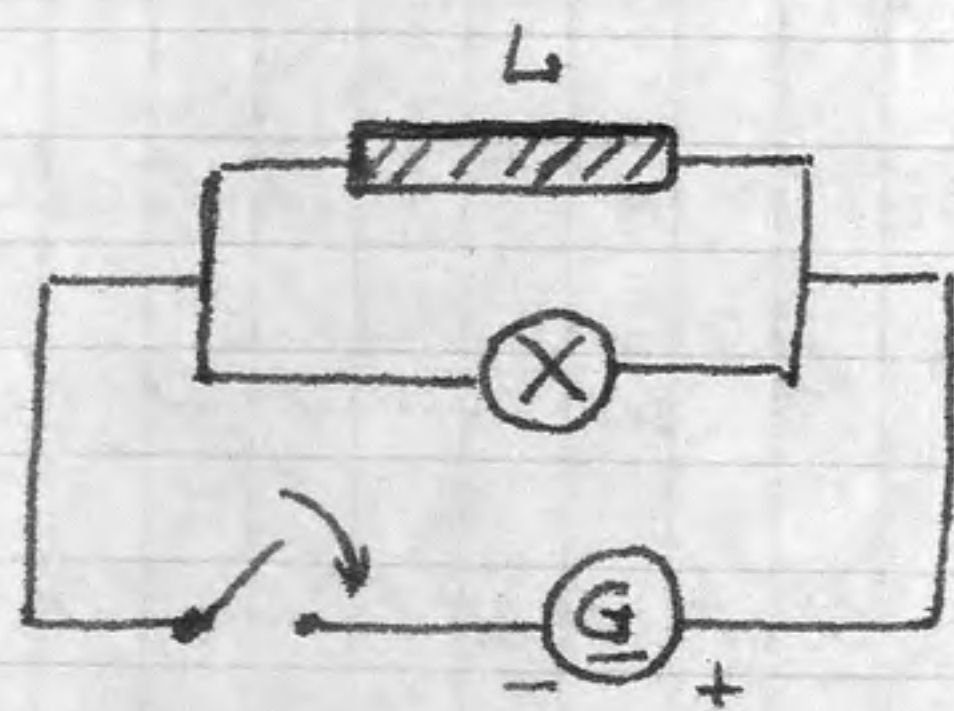
4.3. AUTOINDUCTIA. INDUCTANTA UNUI CIRCUIT

1. Evidențierea experimentală a fenomenului.



În circuitul din figura alăturată la închiderea

întrerupătorului acul ampermetrului deviază lent spre valoarea finală a intensității. De ce? Se știe că stabilirea curentului are loc practic instantaneu. Care este cauza întârzierii creșterii curentului de la valoarea $I=0$ la I final?



b) În circuitul alăturat t.e.m. dată de sursă este de circa 2V, iar tensiunea nominală a becului este de circa

6V. La închiderea circuitului și a-tita vreme cât sta închis, becul nu luminează (normal, de ce?). La între-

ruperea circuitului becul luminează pu-
tomic, dar pentru scurt timp, deși sursa
de tensiune continuă este deconectată.

Și în acest caz se constată o "amurită" în-
târziere" a curentului în circuit.

2. Explicarea observațiilor experimentale.

a) Remarcăm faptul că ambele circuite
conțin bobine cu miez de fier. În absen-
ta acestora, întârzierea menționată nu
este observabilă.

b) În ambele experimente este comun
faptul că intensitatea curentului în cir-
cuit variază (crește de la 0 la I sau
scade de la I la 0). Odată cu I și cîm-
pul magnetic produs de curent varia-
ză, deci și fluxul magnetic prin su-
perfata circuitului, produs chiar de
curentul din circuit, este variabil.

c) Urmare a variației fluxului se

străbate circuitul, în circuit apare curent
de inducție.

La creșterea intensității curentului in-
ductor, curentul indus în propriul cir-
cuit va fi de sens opus, în tendința sa
prin cîmpul magnetic pe care îl creează
să se opună creșterii fluxului inductor.

Așa se explică întârzierea atingerii in-
tensității finale I la închiderea întreprî-
torului.

d) La descreșterea intensității curentului
inductor, curentul indus în propriul
circuit va avea același sens, în tendința
sa prin cîmpul magnetic pe care îl cree-
ază să se opună scăderii fluxului inductor.

Viteza mare de variație a fluxului
(în $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ la întreprindere și este foarte mic,
ceea ce dă o valoare mare a lui $|e| = \frac{1}{L} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$
și deci a intensității curentului indus), face

ca pentru scurt timp, la întreprere, t.e.u. rindus să depășească, chiar în absența tensiunii de alimentare, tensiunea nominală a becului, și acesta luminează puternic.

3. Definiția fenomenului de autoinducție.

a) Autoinducția este fenomenul de inducție electromagnetice produs în t - luc circuit datorită variației intensității curentului din acel circuit.

b) Observăm că circuitul inductor este în același timp și circuit indus.

c) Fenomenul trebuie să se producă ori de câte ori fluxul magnetic propriu ce străbate circuitul este variabil, indiferent de cauza variației.

d) Cel mai adesea variația fluxului propriu al circuitului are drept cauză variația intensității din circuit.

4. Inductanța circuitului unei spire.

a) S-a văzut că inducția magnetică B generată de un circuit parcurs de curentul I este proporțională cu I :

$B \sim I$ ~~$\Phi = k_1 I$~~ (14)

b) Într-o spire fluxul magnetic Φ este proporțional cu inducția B care o străbate:

$\Phi \sim B$ ~~$\Phi = k_2 B$~~ (15)

c) ~~$\Phi = k_1 I$~~ ~~$\Phi = k_2 B$~~ deci $\Phi \sim B \sim I$ avem: $\Phi \sim I$ sau $\Phi = L_0 I$ (16)

~~$k_1 = \text{const}$~~ ~~$k_2 = \text{const}$~~ L_0 este o constantă de proporționalitate.

d) Numim L_0 din (16) inductanța spirei. ea este constantă caracteristică spirei.

(16) ~~repetăm~~ că fluxul magnetic propriu prin suprafața unei spire este direct proporțional cu intensitatea I a curentului din spire.

5. Unitatea de măsură a inductanței.

se numește henry, și se notează cu H (în SI)

Din (16) obținem:

$$L_0 = \frac{\Phi}{I}; \quad [L_0]_{SI} = \frac{[\Phi]_{SI}}{[I]_{SI}} = \frac{Wb}{A} = H$$

Un henry este inductanța unei spire prin a cărei suprafață fluxul magnetic propriu este de un weber, când spira este parcursă de un curent de un amper.

6. T.e.m. autoindusă într-o spirală.

a) La o variație a intensității curentului prin spire de la I_1 la I_2 , fluxul magnetic propriu prin suprafața spirei variază de la

$$\Phi_1 = L_0 I_1 \quad \text{la} \quad \Phi_2 = L_0 I_2, \quad \text{adică:}$$

$$\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = L_0 (I_2 - I_1) = L_0 \Delta I$$

$$\text{deci} \quad \Delta \Phi = L_0 \Delta I$$

b) Substituind în (7) obținem t.e.m. autoindusă în spirală, e_0 :

$$e_0 = -L_0 \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (17)$$

Asadar, tensiunea autoindusă într-o spirală este direct proporțională cu

viteza de variație a intensității curentului din spire, factorul de proporționalitate fiind inductanța L_0 a spirei.

7. T.e.m. autoindusă într-o bobină cu N spire.

a) În interiorul bobinei, la un anumit t_1 , \vec{B}_1 este același în orice punct și avem:

$$B_1 = \frac{\mu N I_1}{l}$$

Asadar, la acel moment, fluxul printr-o spirală oarecare va fi $\Phi_1 = B_1 S$.

La un alt moment t_2 vom avea

$$\Phi_2 = B_2 S \quad \text{cu} \quad B_2 = \frac{\mu N I_2}{l}$$

Variația de flux prin acea spirală va fi

$$\Delta \Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = S(B_2 - B_1) = S \cdot \Delta B = \frac{\mu S N}{l} \Delta I$$

adică
$$\Delta \Phi = \frac{\mu N S}{l} \Delta I$$

b) T.e.m. autoindusă în N_1 din cele N spire: cele N_1 spire echivalente cu N_1 generatoare identice cuplate serie:

$$e = N_1 e_0 = -N_1 \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -N_1 \frac{\mu N S}{l} \frac{\Delta I}{\Delta t} = -\frac{\mu N_1 N S}{l} \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

adică:

$$(18) \quad e = -\frac{\mu N_1 N S}{l} \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{sau} \quad e = -\frac{\mu N^2 S}{l} \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (19)$$

deci $N_1 = N$

8. Inductanța unui circuit format din N_1 spire ale unei bobine cu N spire.

a) Notăm $L = \frac{\mu N_1 N S}{l}$ (20)

Observând că L este constantă caracteristică circuitului ales, o numim inductanța circuitului.

b) Pentru $N_1 = N$ avem inductanța bobinei:

$$L = \frac{\mu N^2 S}{l} \quad (21)$$

c) Folosind (20) și (21), relațiile (18) și (19) se scriu:

$$e = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (22)$$

Comparând (22) cu (14) se vede că L are rolul lui L_0 din (17), ceea ce justifică denumirea de inductanță dată mai sus pentru L .

12.9. Bobină cu inductanță variabilă.

În penta fier este de sute, chiar de mii de ori mai mare decât pentru aer. Ca urmare, introducând în interiorul unei bobine un miez de fier, din (21) rezultă că inductanța bobinei crește foarte mult.

Introducând mai mult, sau mai puțin, miezul de fier în bobină, putem varia inductanța L a bobinei.

12.10. Inductanța echivalentă a unei multor bobine grupate în serie.

a) Dacă prin defecție, inductanța unei bobine unice cu care, înlocuind gruparea, variația ΔI a curentului din circuit produce aceeași t.e.m. de autoinducție.

b) Presupunând toate bobinele grupării ca având spire înfășurate în același sens, t.e.m. de autoinducție produsă în

facultativ

total de grupare este egală cu suma t.e.m. de autoinducție produse de fiecare bobină în parte:

$$e = \sum_{i=1}^n e_i \quad (27)(23)$$

c) Cum toate bobinele sînt parcurse de același curent, curent se va parcurge și bobina echivalentă cu care vom înlocui gruparea, avem:

$$e = -L \frac{\Delta J}{\Delta t}; \quad e_i = -L_i \frac{\Delta J}{\Delta t}$$

care duse în (27) ne dau:

$$-L \frac{\Delta J}{\Delta t} = -\sum_{i=1}^n L_i \frac{\Delta J}{\Delta t} \quad \text{sau} \quad L = \sum_{i=1}^n L_i \quad (28) \quad (24)$$

d) Relația (24) spune că, la gruparea în serie a inductanțelor, inductanța echivalentă L este suma inductanțelor L_i ce se grupează.

M.4. ENERGIA CÂMPULUI MAGNETIC

1. Evidențierea experimentală a existenței energiei în câmpul magnetic.

În experimentul de la M.3.1.6 s-a văzut că, după deconectarea sursei de tensiune, prin bobina continuă să circule curent electric, pentru scurt timp, datorită t.e.m. autoinduse. Cum lucrul mecanic efectuat pentru deplasarea sarcinilor electrice prin circuit nu poate fi efectuat pe seama energiei furnizate de sursa deconectată, trebuie să adăugăm că el este efectuat pe seama energiei câmpului magnetic din bobină, care scade la zero în acest timp.

2. Principiul de calcul al energiei în câmpul magnetic.

Această energie o vom calcula prin găvirea energiei electrice W transferată circuitului după deconectarea sursei,

de către câmpul magnetic: $W_m = W$.

Datorită t.e.m. autoinduse e'' , prin circuit este deplasată sarcina electrică q .

$$W = e \cdot q \quad (29) \quad 25$$

reprezintă energia electrică transportată prin circuitului bobinei prin autoinducție, de către câmpul magnetic din interiorul bobinei.

3. Calculul t.e.m. autoinduse la întreruperea curentului.

$$e = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -L \frac{0 - I}{\Delta t} = \frac{LI}{\Delta t} \quad \text{adică} \quad \boxed{e = \frac{LI}{\Delta t}} \quad (30) \quad 26$$

4. Calculul sarcinii electrice q transportată prin circuit în timpul în care curentul scade de la I la 0 .

a) Aduntem (ceea ce se poate arăta ușor) că aceeași sarcină q ar fi transportată pe durata scăderii curentului de la I la 0 , de un curent de intensitate constantă $\frac{I+0}{2}$, numită intensitate medie \bar{I} :

$$\bar{I} = \frac{I+0}{2} ; \quad \bar{I} = \frac{I}{2}$$

b) Definim intensitatea medie a curentului pe durata Δt a scăderii intensității la zero, curentul de intensitate \bar{I} constantă care în perioada Δt ar transporta prin secțiune transversală a circuitului aceeași cantitate q de electricitate ca și curentul de intensitate variabilă I .

c) Atadar, $q = \bar{I} \cdot \Delta t = \frac{I}{2} \Delta t$
adică $\boxed{q = \frac{I}{2} \cdot \Delta t} \quad (31) \quad (27)$

5. Expresia energiei W_m a câmpului magnetic al bobinei.

Ducând ²⁶(30) și ²⁷(31) în ²⁵(29) obținem:

$$\boxed{W_m = \frac{LI^2}{2}} \quad (32) \quad (28)$$

12.1. CURENT ALTERNATIV
GENERAREA LUI

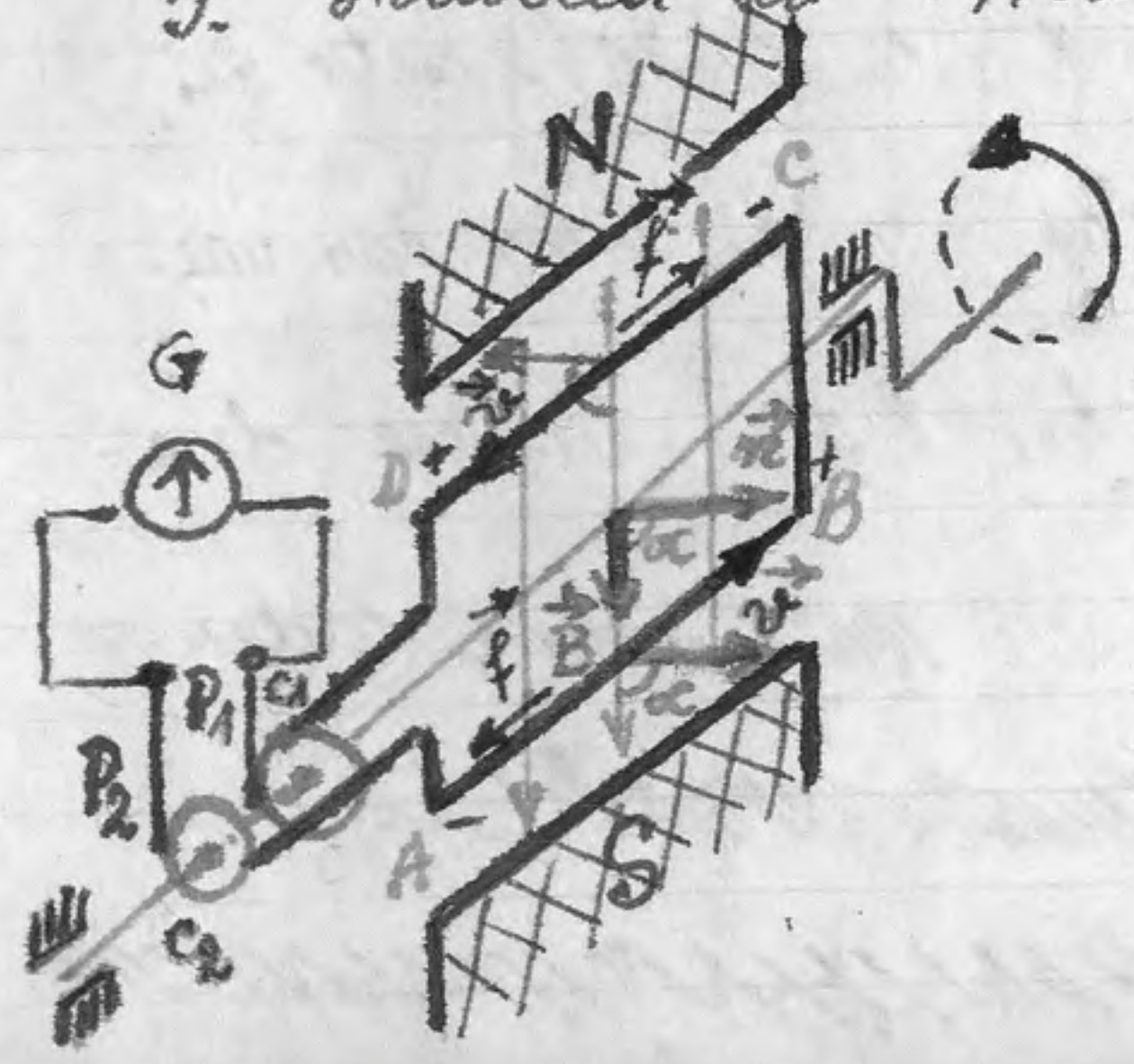
1. Importanța curentului alternativ sinusoidal.
Larg întrebuințat, putând fi produs, trans-
portat și utilizat mai comod ca cel continuu.

2. Principiul care stă la baza producerii lui.
Este produs utilizând fenomenul inducției
electromagnetice care are loc la:

a) rotirea uniformă a unei spire conduc-
toare electrice, într-un câmp magnetic uni-
form;

b) rotirea uniformă a unui câmp
magnetic în fața unei bobine fixe.

3. Demonstrarea în evidență pe cale experimentală.

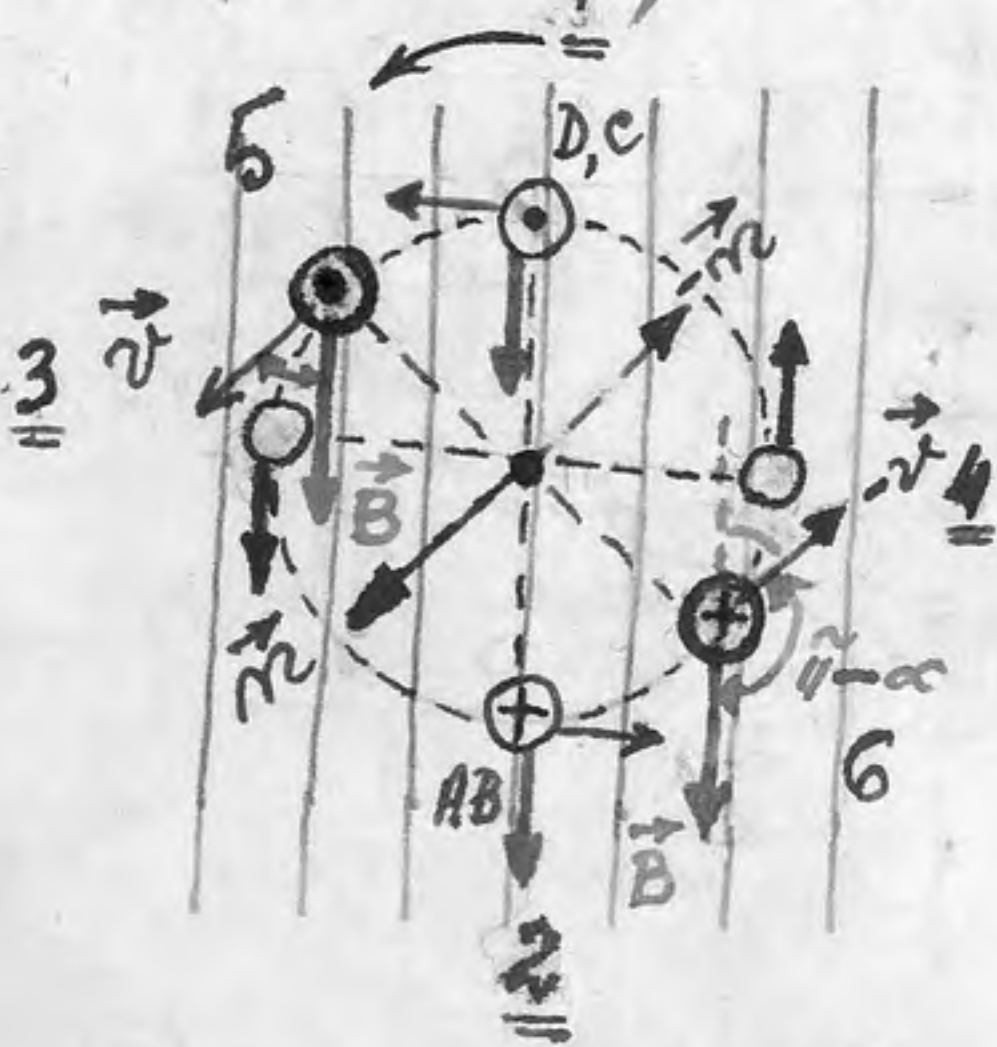


O spira metalică
dreptunghiulară rotită
uniform într-un câmp
magnetic uniform
perpendicular pe
axul de rotație al

spirei. Capetele cadrului sunt prinse la două
rune ce alunecă pe două lamel^{metalice} elastice,
legate la bornele unui galvanometru.

În timpul unei rotații complete a spirei
acul galvanometrului (cu zero la mijlocul scalei)
deviază pe o jumătate de rotație într-o parte
a scalei, pe cealaltă jumătate în cealaltă
parte, punând în evidență apariția în spira
a unei curent electric care, în timpul unei
rotații complete, își schimbă sensul de două
ori. De aceea îl vom numi curent alternativ.

4. Explicarea producerii t.e.m. ~~alternativ~~ și



a curentului ~~alternativ~~
în laturile AB și CD.

a) În laturile DC (D către noi,
capus vorb) și AB (în uas-
tere t.e.m. induse, deoa-
rece ~~spira~~ rotația cadru-

lui dreptunghiular ~~alternativ~~ determină
~~alternativ~~

aparitia unei diferente de potential între extre-
mitățile fiecăreia, ca urmare a acțiunii forței
Lorentz $\vec{F} = -e\vec{v} \times \vec{B}$ asupra fiecărui electron
liber, conținut în latura respectivă.

b) Notând \odot secțiunea conductorului, dacă prin
el curentul „vine” spre noi îl vom indica
prin \odot , iar dacă pleacă de la noi, prin \ominus .

În figură am indicat sensul curentului indus
în laturile DC și AB pentru trei poziții diferite
ale cadrului: 1-2; 3-4; 5-6.

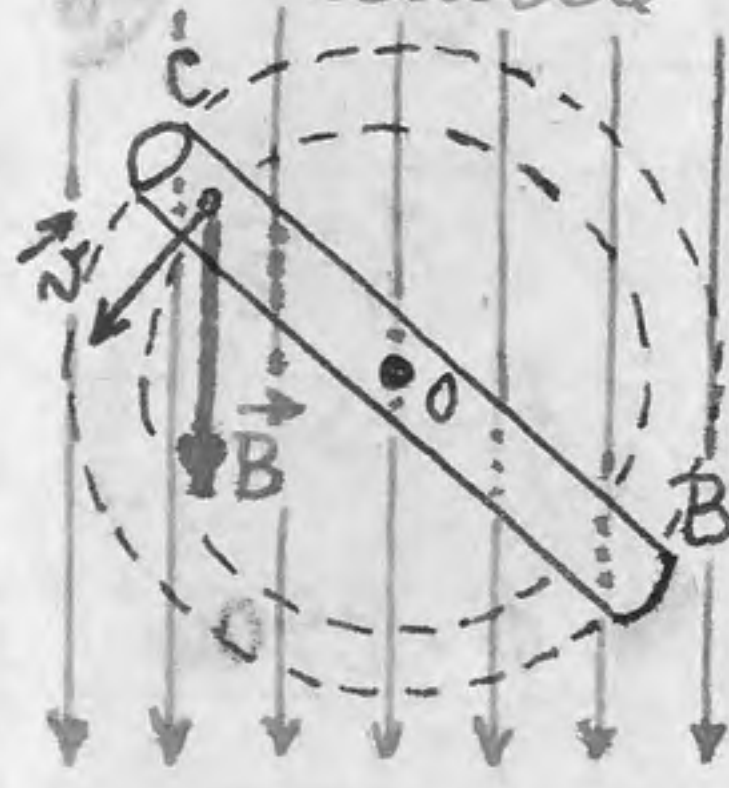
În poziția 3-4 nu în uastere t.e.m. indusă (De ce?).

c) Se observă că t.e.m. și intensitățile curen-
tului indus în fiecare din cele două laturi

AB și CD se adună în fiecare moment.

5. Fenomenul inducției electromagnetice în laturile CB și AD.
Laturile CB și AD prin rotația în câmpul

perpendicular



magnetice de inducție \vec{B} se
produce numai de inducție.

În cazurile, ele rotește ~~în~~

plan paralel cu \vec{B} în jurul
axului O. Forța Lorentz care acționează a-

supra fixării electroni va fi perpendiculară pe planul rotației

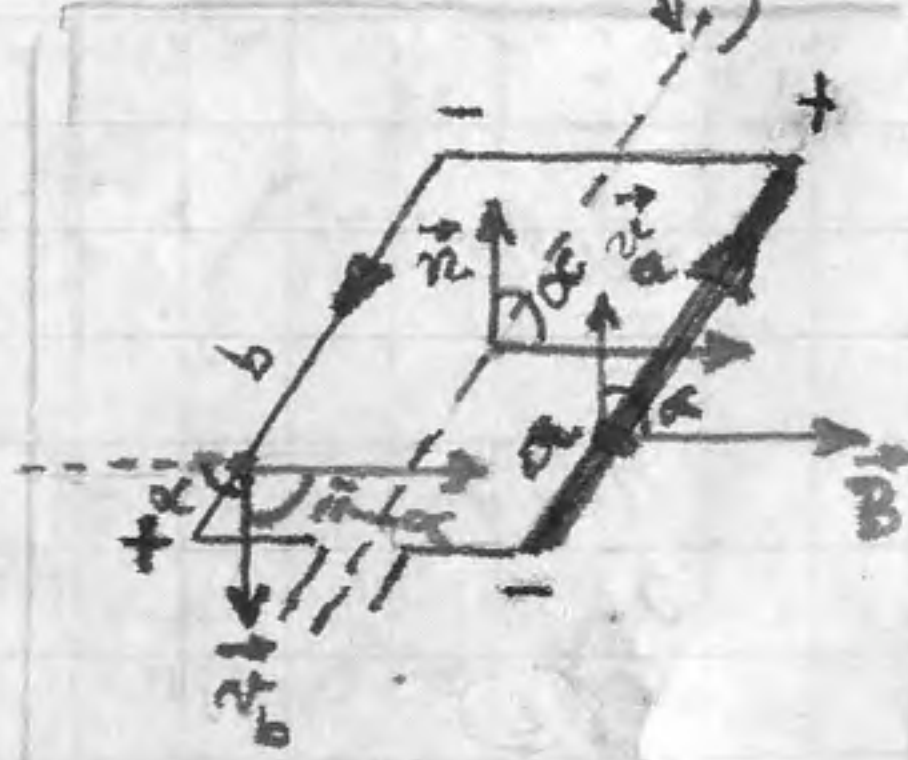
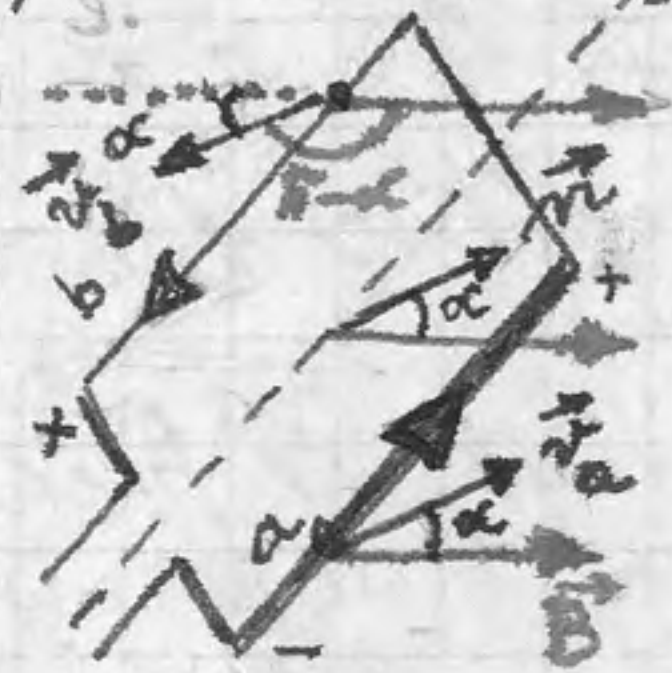
$$\vec{f} = -e \vec{v} \times \vec{B}$$

deci pe conductorul respectiv. Așadar, \vec{f} nu va produce deplasarea electronilor liberi spre capetele conductorului și, ca urmare, nu va determina apariția unei diferențe de potențial între aceste capete.

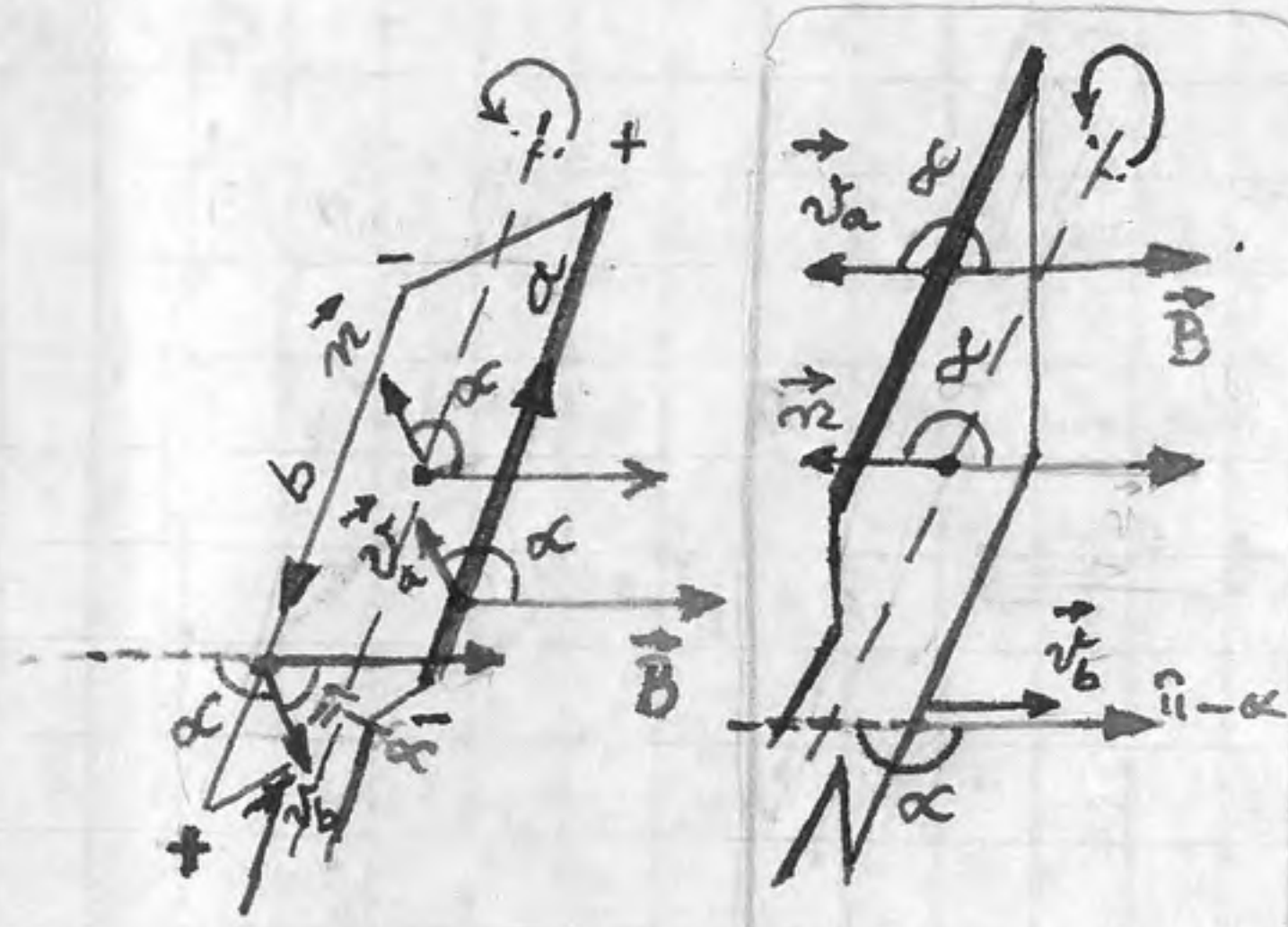
6. Producerea t.e.m. și a curentului indus la o rotație

uniformă, cu $\omega = \text{const.}$, de un unghi egal cu 180° .

a) Notăm cu α unghiul, în sens trigonometric pozitiv, al unei axe de direcție și sensului lui \vec{B} , cu normala \vec{n} la cadrul.



$\alpha = 0$	$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$	$\alpha = \frac{\pi}{2}$
$\Phi = BS \cos 0^\circ$	$\Phi = BS \cos \alpha$	$\Phi = BS \cos \frac{\pi}{2}$
$\Phi = BS > 0$ și maxim	$1 > \cos \alpha > 0$	$\Phi = BS \cdot 0$
$\Phi = \Phi_m > 0$	$\Phi_m > \Phi > 0$	$\Phi = 0$
facultativ	Φ scade	facultativ



$\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$	$\alpha = \pi$
$\Phi = BS \cos \alpha$	$\Phi = BS \cos \pi$
$0 > \cos \alpha > -1$	$\Phi = BS(-1)$
$0 > \Phi > -\Phi_m$	$\Phi = -\Phi_m < 0$
Φ scade	facultativ

b) Pentru $0 \leq \alpha \leq \pi$ se observă că fluxul Φ prin spira scade de la $\Phi_m = BS$, la $-\Phi_m$.

În spira se va induce o t.e.m. în laturile „a” și „b”, a cărei modul este dat de

$$|e| = Blv \sin(\vec{B}, \vec{v})$$

unde B, l și v sînt modulele, iar e este t.e.m. instantanee (la un moment dat).

Cum fluxul Φ scade tot timpul execuției acestei semirotatii, regula lui Lenz ne dă $e > 0$.

Așadar
$$e = Blv \sin(\vec{B}, \vec{v})$$

c) În cazul nostru $v_a = v_b = v$ și $(\vec{B}, \vec{v}_a) = \alpha$, putînd scrie t.e.m. induse:

$$e = e_a + e_b = Blv_a \sin(\vec{B}, \vec{v}_a) + Blv_b \sin(\vec{B}, \vec{v}_b) = Blv \sin \alpha + Blv \sin(\pi - \alpha) \text{ sau: } e = Blv \sin \alpha + Blv \sin \alpha = 2Blv \sin \alpha = e \quad (1)$$

dar $v = \omega R$

$$e = Bl \cdot 2R \cdot \omega \sin \alpha = BS \omega \sin \alpha = \omega \Phi_m \sin \alpha$$

$$e = \omega \Phi_m \sin \alpha \quad (2)$$

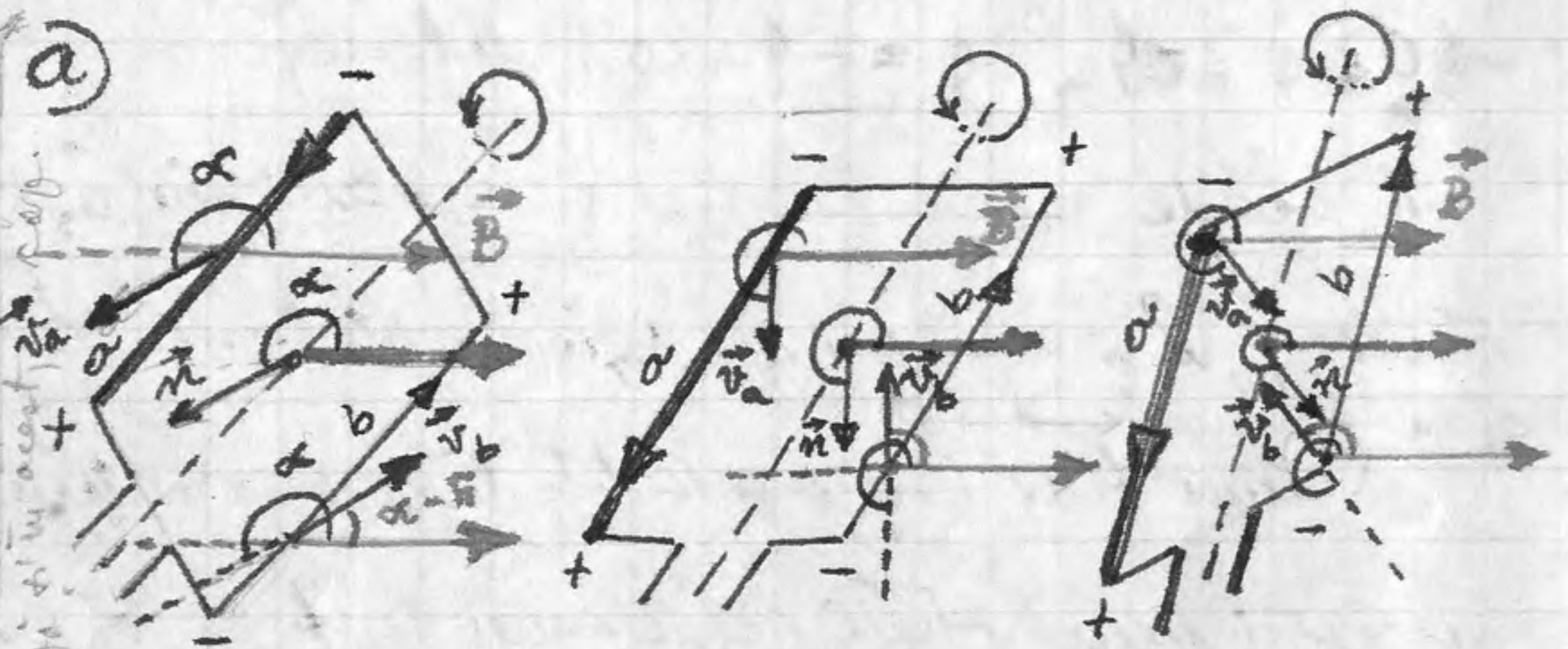
Valoarea maximă a lui e a notăm E_m

și se obține pentru $\sin \alpha = 1$, adică

$$E_m = \omega \Phi_m \quad (3)$$

$$\text{Cum } \alpha = \omega t, \text{ avem } \boxed{e = E_m \sin \omega t} \quad (4)$$

7. Producerea t.e.m. și a curentului indus la o rotație cu $\omega = \text{const.}$, de la 180° la 360° .



$\tilde{\pi} \leq \alpha \leq \frac{3\tilde{\pi}}{2}$ $\Phi = BS \cos(\vec{B}, \vec{n})$ $(\vec{B}, \vec{n}) = 360^\circ - \alpha$ $\Phi = BS \cos \alpha$ $-1 \leq \cos \alpha \leq 0$ $-\Phi_m \leq \Phi \leq 0$ Φ crește	$\alpha = \frac{3\tilde{\pi}}{2}$ $\Phi = BS \cos(\vec{B}, \vec{n})$ $(\vec{B}, \vec{n}) = 360^\circ - \alpha$ $\Phi = BS \cos \frac{3\tilde{\pi}}{2}$ $\Phi = BS \cdot 0$ $\Phi = 0$	$\frac{3\tilde{\pi}}{2} \leq \alpha \leq 2\tilde{\pi}$ $\Phi = BS \cos(\vec{B}, \vec{n})$ $(\vec{B}, \vec{n}) = 360^\circ - \alpha$ $\Phi = BS \cos \alpha$ $0 \leq \cos \alpha \leq 1$ $0 \leq \Phi \leq \Phi_m$ Φ crește.
--	--	--

Pentru $\alpha = 2\tilde{\pi}$ se repetă situația din prima

facultativ. Dacă se întinde, revăzută doar ca apelativ

figura de la (6a) de mai sus. Începe o nouă rotație.

b) Pentru $\tilde{\pi} \leq \alpha \leq 2\tilde{\pi}$ fluxul Φ din spira crește de la „- Φ_m ” la „+ Φ_m ”. La creșterea lui Φ rezulta lui Lenz ne da $e < 0$. Inducile t.e.m. induse în laturile „a” și „b” sunt:

$$|e_a| = Blv \sin(360^\circ - \alpha) ; |e_b| = Blv \sin(\alpha - \tilde{\pi})$$

Cum $e < 0$, vom scrie

$$e_a = -Blv \sin(360^\circ - \alpha) ; e_b = -Blv \sin(\alpha - \tilde{\pi})$$

Noua arca:

$$e_a = Blv \sin \alpha ; e_b = Blv \sin(\tilde{\pi} - \alpha) = Blv \sin \alpha$$

$$\text{și } e = e_a + e_b = Blv \sin \alpha + Blv \sin \alpha$$

$$\boxed{e = 2Blv \sin \alpha}$$
 din care, procedând la fel ca pentru

relația (1), se obține evident:

$$\boxed{e = E_m \sin \omega t} \quad (4)$$

care este valabilă, asadar, pentru arcele formate de rotații ale spirei, deci pentru o rotație întreagă.

c) De observat că în momentele în care $\alpha = \tilde{\pi}$ și $\alpha = 2\tilde{\pi}$, sensul t.e.m. induse

facultativ

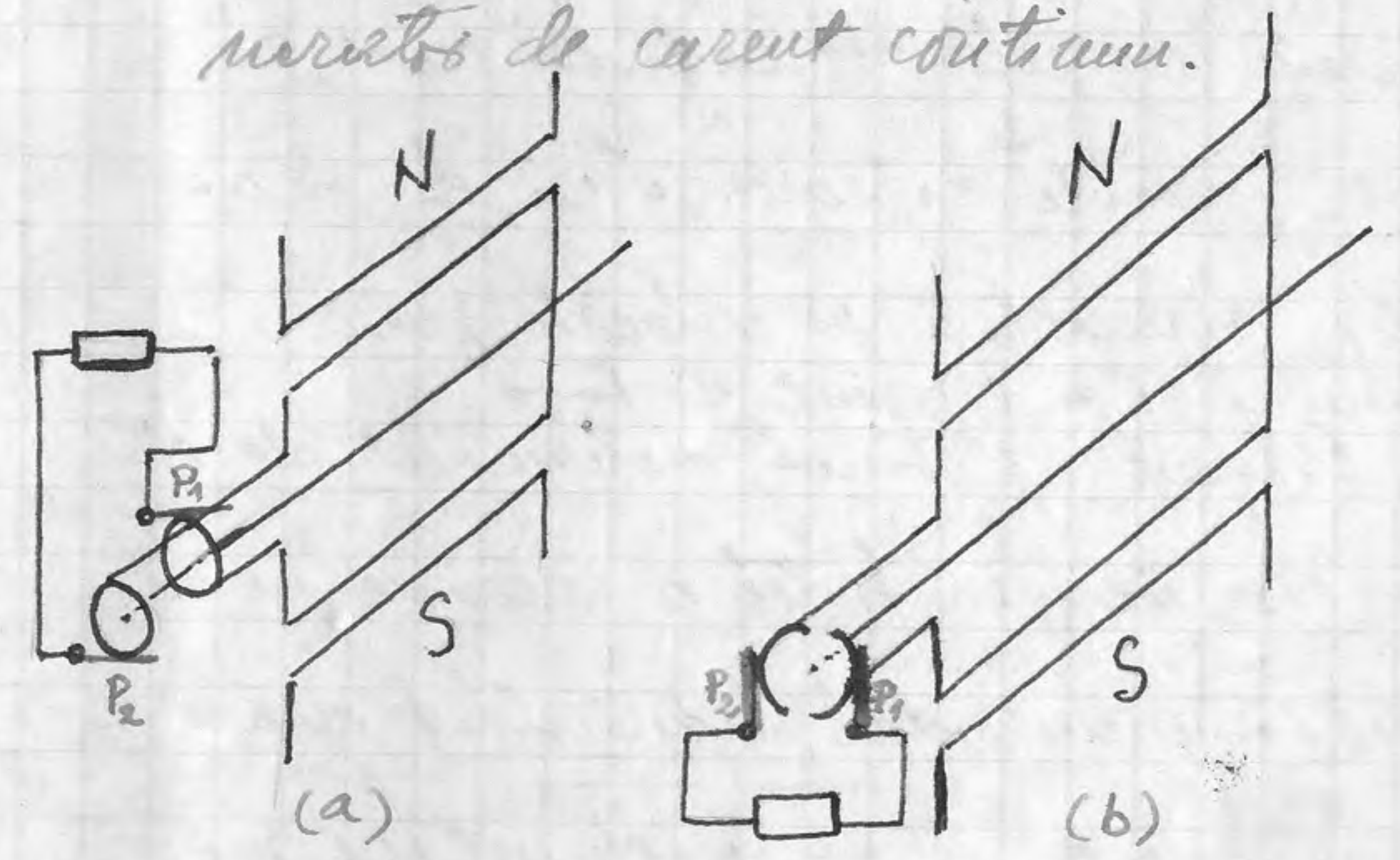
în cadrul se schimbă deci și al curentului în aceste momente prin schimbarea fluxului este maxim în modul. Astfel, în timpul unei rotații complete, prin spira dreptunghiulară o jumătate de perioadă curentul trece într-un sens, cealaltă jumătate de perioadă curentul trece în sens opus.

Un astfel de curent care își schimbă sensul periodic se numește "alternativ".

Într-un circuit variabil t.e.m. are loc sinusoidal (vezi relația (4)) curentul obținut prin rotația uniformă a cadrelor într-un câmp magnetic uniform este numit alternativ sinusoidal.

d) Generarea t.e.m. și a curentului în dus prin rotația unei spiră într-un câmp magnetic este folosită ca principiu de producere a curentului alternativ. ~~Asamblarea~~ Asamblarea generatoare pe nume alternatoare, cu inductor fix și nucleu rotitor.

e) Curentul alternativ astfel produs poate fi scos în circuitul exterior generatorului sub formă redresată, ca curent continuu, prin simpla înlocuire a inelelor colectoare cu două jumătăți de inele (în cazul unei înfășurări opuse). Se obține astfel un generator de curent continuu.



Principiul:
a) alternatorului b) dinamoului.

8. Expresia instantanee a curentului alternativ sinusoidal.

a) T.e.m. alternativă indusă în cadrul surtului este curent alternativ sinusoidal prin circuitul electric al dispozitivului (vezi 12.1.3)

b) Dacă în circuit nu sînt bobine (adică circuitul este pur rezistiv), atunci intensitatea instantanee „ i ” sîi atinge valorile extreme în același timp cu t.e.m. din circuit „ e ”, ceea ce se constată după pozițiile ocului unui ampermetru, comparate cu cele ale cadrului cînd „ e ” are valorile extreme. „ i ” cu „ e ” iși ating simultan și valoarea zero.

Fiecum că „ i ” și „ e ” sînt în fază.
 c) Evident, „ i ” fiind determinat de „ e ” din circuit, va fi tot o mărime se oscilantă sinusoidală, adică de forma

$$i = I_m \sin \omega t \quad (5)$$

9. Tensiunea instantanee „ u ” la bornele unui rezistor.

a) Să considerăm un interval Δt de timp suficient de mic pentru a putea neglija variațiile lui „ e ” și „ i ” pe un asemenea interval, deci pe Δt , să primim pe „ e ” și „ i ” drept constante.

Notînd cu „ u ” tensiunea la bornele unui rezistor din circuitul exterior pe durata Δt , de fapt tensiunea instantanee, avem evident

$$u = Ri \quad (6)$$

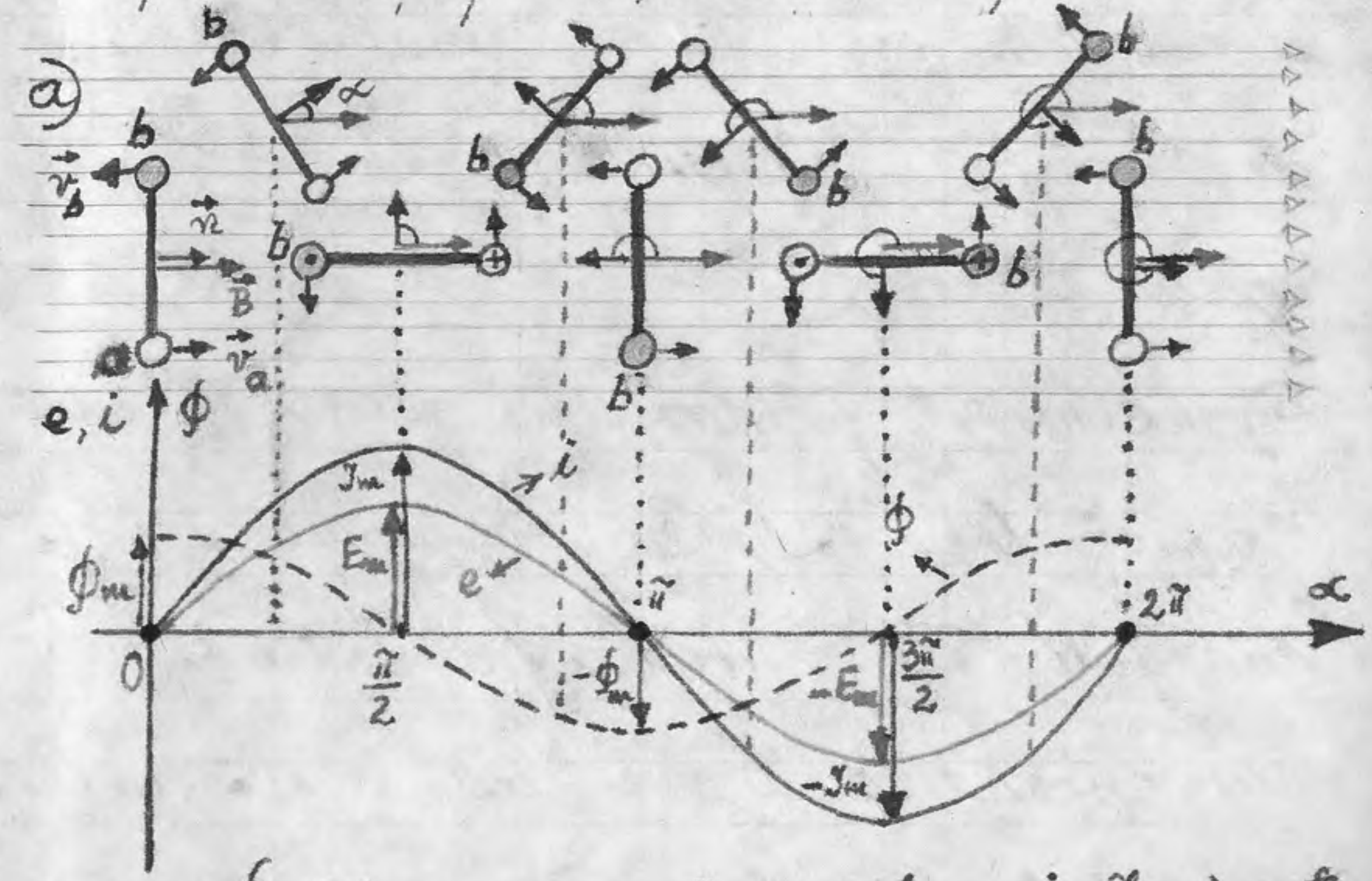
valabili în curent continuu. Tînuînd seama de (5), avem:

$$u = R I_m \sin \omega t \quad (7)$$

unde „ u ” și „ i ” sînt în fază, ^{această poziție de} dacă în circuit nu avem bobine sau condensatori.

b) Ca și la curentul continuu, la un anumit moment intensitatea este aceeași în orice punct al circuitului.

10. Graficul variației fluxului, t.e.m. și intensității curentului alternativ



$$\phi = BS \cos \alpha; \quad e = E_m \sin \omega t; \quad i = I_m \sin \omega t$$

b) Din grafic devine evident că valorile extreme $E_m, -E_m, I_m$ și $-I_m$ se realizează în pozițiile cadrului în care fluxul este egal cu zero ($\alpha = (2k+1)\frac{\pi}{2}$, cu $k = 0, 1, 2, 3, \dots$).

c) În aceste poziții viteza de variație a fluxului $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ este maximă, deoarece laturile „active” a și b ale cadrului taie cele mai multe linii de câmp în unitatea de timp.

d) În pozițiile în care fluxul are valori extreme ($\alpha = k\pi$) t.e.m. și intensitatea curentului sunt nule. În aceste poziții ale cadrului laturile active nu taie liniile câmpului și viteza de variație a fluxului $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ este egală cu zero.

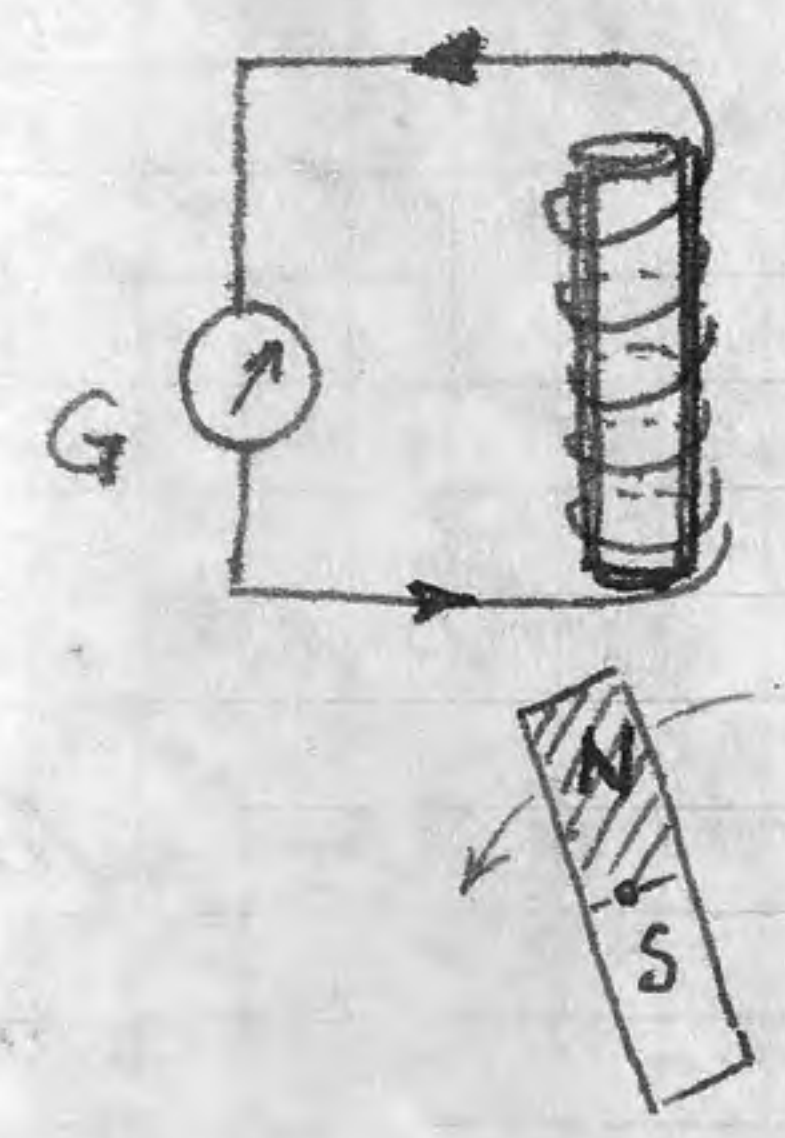
e) t.e.m. este pozitivă dacă $\alpha \in (0, \pi)$ și negativă dacă $\alpha \in (\pi, 2\pi)$. Înseamnă că în prima jumătate a rotației prin cadrul circuitului curent indus i care creează un câmp magnetic paralel și de același sens cu normala \vec{n} la cadrul, iar în a doua

jumătate a rotației curentul indus i creează un câmp magnetic paralel dar de sens opus cu normala \vec{n} la cadrul, așa cum rezultă și din legea lui Lenz.

Pradar, într-o rotație t.e.m. și i își schimbă sensul de două ori, fiind simultan volți externe sau nule.

11. Generarea t.e.m. alternative sinusoidale prin rotația uniformă a unui magnet bară în jurul unui ax orizontal sub o bobină fixă cu nucleu de fier.

a) Datorită rotației magnetului bobina este parcursă în fiecare moment de un flux variabil de inducție magnetică, care induce în bobină o t.e.m. alternativă sinusoidală.



b) Dispozitivul este în esență un alternator cu inductorul fix și inductorul rotitor.

Acesta este principiul de funcționare a alternatoarelor din centrale electrice.

12. Interpretarea electronică a curentului alternat.

a) Sub acțiunea t.e.m. alternative sinusoidale electronii liberi din conductorii circuitului capătă o mișcare de ansamblu oscilatorie, sincronă t.e.m. induse.

b) Mărea unghiulară $\omega = \text{const}$ de rotație a cadrului se numește pulsația t.e.m., și a cadrului este frecvența și T perioada t.e.m. induse.

c) Intensitatea instantanee i a curentului este proporțională cu viteza de oscilație a electronilor

13. Alternatorul, convertitor de energie.

Energia mecanică folosită pentru rotația cadrului sau a magnetului este transformată în energia curentului alternat (sinusoidal) indus.

În cadrul metalic, sau în bobine,

se produce oscilații forțate ale electronilor de conducție sub acțiunea t.e.m. alternatoare induse.

Factorul excitator este fluxul de inducție magnetică cu variație cosinusoidală prin suprafața delimitată de cadru.

14. Fluxul de inducție magnetică printr-o spira (circuit electric) care rotește cu $\omega = \text{const}$ într-un câmp magnetic uniform ($B = \text{const}$) este o mărime oscilatorie armonică.

a) Se știe că proiecția unei mișcări circulare uniforme ($\omega = \text{const}$) pe axa oy este o mișcare oscilatorie armonică de ecuație

$y = A \sin \omega t$ (8)

unde A = const. este amplitudinea și ω este pulsația mișcării, iar proiecția pe axa ox este o mișcare oscilatorie armonică de ecuație

$x = A \cos \omega t$ (8*)

b) Ecuația fluxului magnetic printr-o

spira este
mude
adica

$$\Phi = BS \cos \omega t$$
$$BS = \Phi_m = \text{const}$$

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t \quad (9)$$

Se vede ca (9) este de tipul ecuatiei (8), deci Φ este o marime ce oscileaza armonice in timp, daca $\omega = \text{const}$.

15. Se arata ca $\frac{\Delta \cos \omega t}{\Delta t} = -\omega \sin \omega t$ (10)

pentru $\omega = \text{const}$. si Δt suficient de mic (practic $\Delta t \rightarrow 0$)
a) In adevar, daca in perioada Δt fluxul Φ printr-o spira variaza cu $\Delta \Phi$ datorita rotatiei spirei cu $\omega = \text{const}$ intr-un camp de inductie $\vec{B} = \text{const}$, aceasta variatie induce in spira o t.e.m.

daca Δt este suficient de mic, practic $\Delta t \rightarrow 0$.
daca Δt este suficient de mic, practic $\Delta t \rightarrow 0$.
16. Viteza de variatie a fluxului magnetic

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{si} \quad e = E_m \sin \omega t, \quad \text{cu} \quad E_m = \omega \Phi_m$$

b) Analizand, putem scrie, pentru Δt foarte mic:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\omega \Phi_m \sin \omega t \quad \text{pentru} \quad \frac{\Delta BS \cos \omega t}{\Delta t} = -\omega \Phi_m \sin \omega t$$

$$\Phi_m \cos \omega t = -\omega \Phi_m \sin \omega t \quad \text{deci} \quad \frac{\Delta \cos \omega t}{\Delta t} = -\omega \sin \omega t$$

daca Δt este suficient de mic, practic $\Delta t \rightarrow 0$.

$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ printr-o spira care roteste uniform ($\omega = \text{const}$) intr-un camp magnetic uniform ($\vec{B} = \text{const}$) este o marime oscilatorie armonica.

a) Din $e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ si $e = E_m \sin \omega t$, avem

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -E_m \sin \omega t \quad (11^{**})$$

Observand ca aici $-E_m = A = \text{const}$, se vede ca ecuatia este de tipul ecuatiei (8) de la punctul (14) de mai sus, adica $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ oscileaza armonice in timp.

b) Viteza de variatie a fluxului se poate scrie

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \omega \Phi_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (11)$$

Din trigonometrie se stie ca:

$$\sin \omega t = -\cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (12)$$

$$\text{si} \quad \cos \omega t = \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (13)$$

Cum $E_m = \omega \Phi_m$, din (11**) obtinem:

$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \omega \Phi_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

c. t. d., de unde rezultă din nou ca $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ este oscilatorie armonica.

facultati - se va scrie

la momentul t.
Daca Δt este suficient de mic, practic $\Delta t \rightarrow 0$, atunci $\frac{\Delta \cos \omega t}{\Delta t}$ va fi egal cu derivata lui $\cos \omega t$ in raport cu t .

17. Legătura dintre modul de variație, pulsațiile, amplitudinile și fazele fluxului și vitezei de variație a fluxului.

a) Sintetizând cele spuse la (14) și (16) mai sus și comparând relațiile (9) și (11) putem spune că: fluxul și viteza sa de variație sunt mărimi oscilatorii armonice, de aceeași pulsație ω ; amplitudinea vitezei de variație a fluxului este de ω ori mai mare decât amplitudinea fluxului, iar faza vitezei de variație a fluxului este în avans (mai mare) cu $\frac{\pi}{2}$ față de faza fluxului magnetic.

b) Afirmațiile de mai sus sunt evidente, scriind:

$$\begin{cases} \phi = \phi_m \cos \omega t \\ \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = \omega \phi_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{cases} \begin{cases} \phi = \frac{E_m}{\omega} \cos \omega t \quad (14) \\ \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = E_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

Ultimul pereche de relații obținându-se din prima pereche, prin înlocuirea amplitudinilor cu valorile lor reale din $E_m = \omega \phi_m$.

18. Generalizarea proprietăților expuse la (17).

Prin analogie cu proprietățile expuse la (17) pentru flux și viteza sa de variație, se pot enunța următoarele proprietăți generale (care pot fi demonstrate în mod riguros:

a) Dacă o mărime M este oscilatorie armonică, viteza sa de variație $\frac{\Delta M}{\Delta t}$ este tot o mărime oscilatorie armonică, de aceeași pulsație ca M , având amplitudinea multiplicată cu ω față de a lui M , iar faza în avans cu $\frac{\pi}{2}$ radiani față de faza lui M . Adică:

Dacă $M = A \cos \omega t$ atunci $\frac{\Delta M}{\Delta t} = \omega A \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$

b) Dacă viteza de variație a unei mărimi M , $\frac{\Delta M}{\Delta t}$ este o mărime oscilatorie armonică, atunci și mărimea M este oscilatorie armonică, de aceeași pulsație cu a lui $\frac{\Delta M}{\Delta t}$, având amplitudinea de ω ori mai mică decât a lui $\frac{\Delta M}{\Delta t}$, iar faza în întârziere (mai mică) cu $\frac{\pi}{2}$

deci forma lui $\frac{\Delta M}{\Delta t}$. Adică:

Dacă $\frac{\Delta M}{\Delta t} = A \cos(\omega t)$, atunci $M = \frac{A}{\omega} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$

(16) (16*)

c) Proprietățile (a) și (b) de mai sus sunt necesare pentru studiul circuitelor de curent alternativ.

12.2. MĂSURĂRI ÎN CURENT ALTERNATIV

1. Principiul de funcționare a aparatelor de măsură a mărimilor ce caracterizează curentul electric continuu.

a) Obisnuit se măsoară intensitatea curentului, și tensiunea înse două puncte ale conductorului.

b) Aparatele de măsură, ampermetrele și voltmetrele, sunt construite folosind unul din efectele curentului (chimic, caloric, magnetic). Mai frecvent este folosit efectul magnetic. Construcția aparatelor de măsură este astfel concepută, încât, variațiile mărimii de măsurat să ducă la variații ale efectului curentului electric ce trece prin aparat și prin intermediul acestora, la deplasarea unui ac indicator în fața unui cadran gradat. Pe acest cadran se poate

asfel citi direct valoarea mărimii de măsurat.

2. Imposibilitatea folosirii pentru măsurări în curent alternativ, a aparatelor de măsură destinate curentului continuu.

a) Dacă introducem într-un circuit de curent alternativ un aparat de măsură destinat construcției pentru curent continuu, care funcționează pe baza unui efect al curentului dependent de sensul ^(deci fie, efectul magnetic, fie cel chimic) curentului, atunci indicatorul aparatului va trebui să devieze pe scara de la zero spre dreapta, sau spre stînga, după sensul curentului.

b) Cînd sensul curentului se schimbă de două ori într-o perioadă T , sensul deviației acului indicator se va schimba tot de atîtea ori.

Dacă perioada T este suficient de mare (practic $T > 0,5s$), atunci deviațiile

acului pot uneori schimbarea sensului curentului electric. Dacă T este mic, atunci datorită inerției acului acesta nu poate uneori schimbanse de sens ale curentului electric, și solicitat în partea opusă unei indicații ca el să se fi deplasat în sensul solicitării anterioare, acul în mod practic stă pe loc.

c) În mod obișnuit frecvența curentului este de circa $50 Hz$, deci $T = \frac{1}{50} s = 0,02 s$. Așadar, la asemenea frecvență utilizarea aparatelor de măsură ce folosesc efecte ale curentului care depind de sensul acestuia este imposibilă.

3. Alte dificultăți privind executarea unor măsurări în curent alternativ.

Chiar dacă nu ar interveni inerția piștelor în mișcare în interiorul aparatelor de măsură, citirea valorilor la un moment dat ale mărimilor mă-

surat de nu avem un aparat ar fi dificilă practică, dificultatea crescând cu utilizarea perioadei T , deoarece acul indicator, urmăriind (presupunem) fidel variația mărimii, se află în continuă mișcare.

Această dificultate se păstrează și la folosirea aparatelor de măsură construite pe baza unor efecte ale curentului independente de sensul curentului electric, cum este efectul termic.

4. Problemele ridicate de utilizarea în curent alternativ a unor aparate de măsură construite pe baza efectului termic al curentului.

a) Asemenea aparate au propriile dificultăți legate de inerția acului indicator (și a altor piese care s-au mișcat în aparat), ca sensul mișcării dependent de sensul curentului.

b) Se știe că $Q = I^2 R \cdot \Delta t$ dacă căldura degajată în circuit de curent continuu de intensitate $I = \text{const.}$, în perioada Δt , rezistența acelei porțiuni de circuit fiind R .

c) Considerând Δt suficient de mic, putem neglija pe Δt variația lui i și presupunem pe Δt că $i = \text{const.}$, deci în acea porțiune de circuit, în perioada Δt se va degaja căldura $Q = i^2 R \cdot \Delta t$ (17)

d) Cău $\Delta t \rightarrow 0$, această relație ne dă căldura degajată la un moment dat. Ea va avea altă valoare în momentul următor, deoarece într-un alt moment vom avea altă valoare a lui i .

e) Într-un aparat de măsură bazat pe efectul termic căldura degajată într-un fir conductor dibat în frâu, ceea ce are ca urmare, într-un anumit aranjament, deviația acului indicator pe scala gradată.

D Fenomenul de dilatare a firului conductor
 care scurgerea unui curent timp pentru res-
 terea sau micșorarea lungimii firului, funcție
 de căldura degajată în el. Această variație
 a lungimii nu poate urmări fidel varia-
 ția măsurării de măsurat la curentul al-
 ternativ. Apare o anumită "inertie" a
 fenomenului dilatării, în locul inertiei
 unor piese în măsurare. Ba chiar acces-
 țin inertie produce o și mai mare întâ-
 ziere a variației măsurării (alungirea
 firului) prin intermediul căreia dorim să
 urmăm variația măsurării de măsu-
 rat (intensitatea curentului, sau ten-
 simea într-o capetile probei respective de
 circuit, la un moment dat: $\Delta Q = I^2 \cdot t$)

5. Căle depășiri dificultăților de măsurare în curent alternativ.
 Pentru depășirea acestor neajunsuri
 ale utilizării efectului caloric al curentu-
 lui electric la executarea măsurărilor în
 curentul alternativ, se definesc valorile

efective ale intensității și tensiunii în curent
 alternativ, care vor putea fi determinate
 cu aparatele de măsură bazate pe efectul
 termic, valorile efective depinzând doar de căldura medie
 degajată în circuit în timpul T (perioada curentului alternativ)
 Pe baza unor relații care vor fi ste-
 bilite între valorile efective și cele Maxime,
 la rândul lor legate de cele instantanee, vor fi de-
 duse și acestea din urmă, sau numai
 valorile lor maxime, după necesități.

6. Definiția intensității efective a curentului al-
 ternativ.

Nu vom valoare efectivă a intensității i
 a curentului alternativ, valoarea I a unui
 curent continuu care, străbătând același
 rezistor ca și curentul alternativ, pro-
 duce aceeași căldură Q într-un timp
 egal cu T (perioada curentului alternativ),
 ca și curentul alternativ.

7. Definiția tensiunii efective a curentului al-
 ternativ.

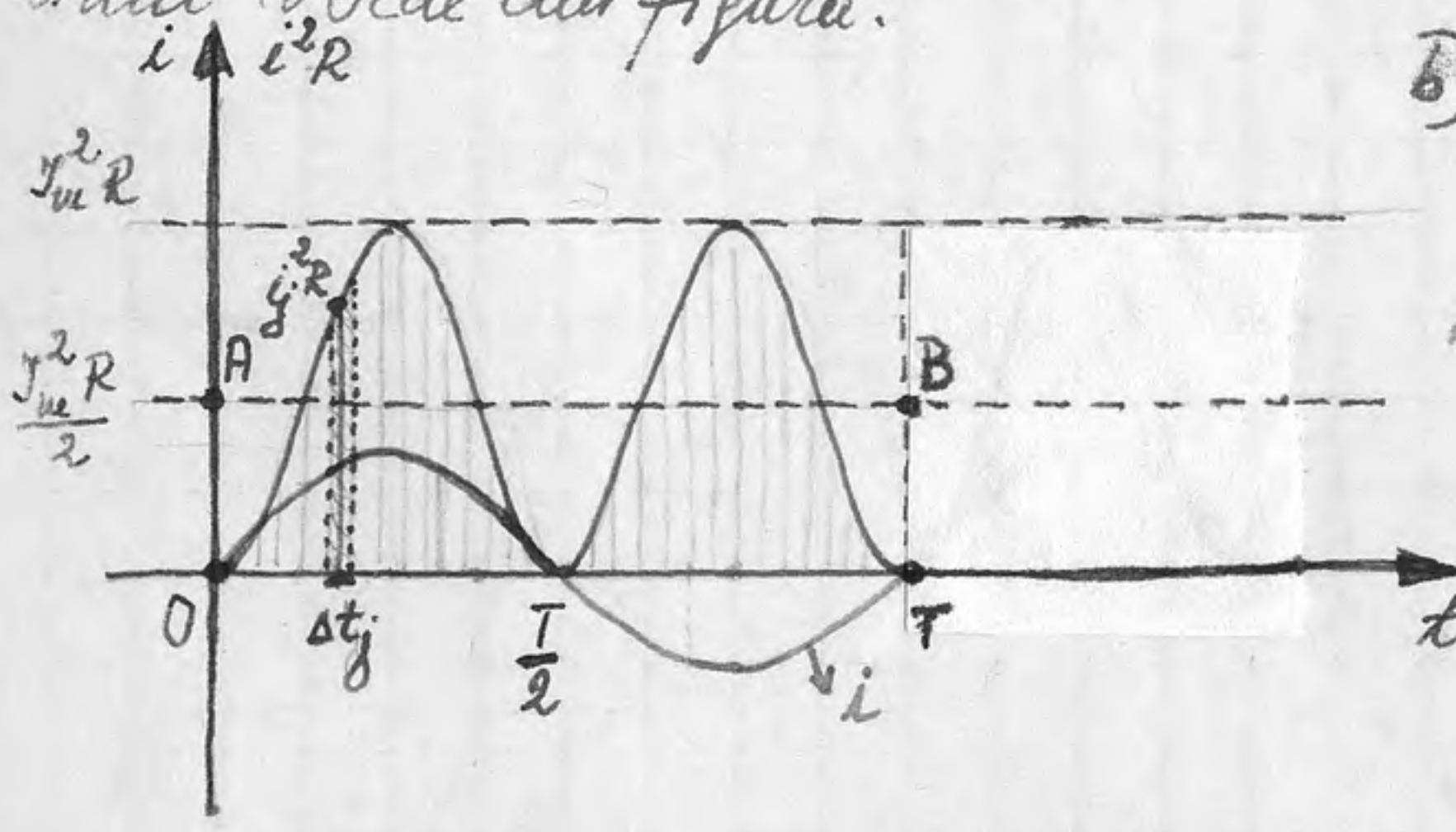
... alternativă aplicată
 Huruim valoare efectivă a tensiunii între
 capetele unui rezistor ~~...~~ aceea valoare U a tensiunii
 continue care aplicată la capetele rezisto-
 rului va determina degajarea în rezistor,
 într-un timp egal cu perioada T a tensiunii
 alternative, a aceleiași călduri Q ca
 și tensiunea alternativă u .

Evident $U = IR$ (18)

8. Relația dintre intensitatea efectivă și intensitatea
 maximă a curentului alternativ.

a) Se știe că $i = I_m \sin \omega t$

al cărei grafic, pe parcursul unei perioade, este
 linia verde din figură.



b) Reprezentăm
 pe același
 grafic funcția
 $f(t) = i^2 R$
 a cărei va-

loare maximă este $I_m^2 R$. (Se arată din

$f(t) = I_m^2 \sin^2 \omega t \cdot R$, pentru $\sin \omega t = 1$

Obținem linia roșie din aceeași figură.

c) Relația (17) dată anterior, scrisă pentru un
 subinterval j din perioada T , ia forma

$\Delta Q_j = i_j^2 R \cdot \Delta t_j$

Pentru Δt_j suficient de mic (practic $\Delta t_j \rightarrow 0$), nu-
 mărul „ n ” al subintervalor obținute prin parti-
 ția lui T crește nelimitat ($n \rightarrow \infty$).

Pe un asemenea subinterval Δt_j observăm
 că variația lui i_j poate fi neglijată și ΔQ_j va
 fi dată de aria dreptunghiului având ca bază
 Δt_j și ca înălțime $i_j^2 R$.

Au asemenea dreptunghi se reduce la un seg-
 ment când $\Delta t_j \rightarrow 0$ (sau $n \rightarrow \infty$).

d) Căldura Q totală degajată în peria-
 da T va fi suma tuturor căldurilor ele-
 mentare ΔQ_j .

Pe grafic, Q va fi dată de aria figurii
 hășurate în creion.

Nota: Practic, aparabile de masura in c.a. folosesc foto efectodivario dintr-un conductor paralel, care nu depinde de sensul curentului (de ce?)

e) Pentru o perioada T , se arata ca suprafetile
 hasurate deasupra liniei paralele la axa absciselor, duse prin punctul de ordonata $\frac{I_m R}{2}$, acoperă complet suprafetile hasurate între axele absciselor și aceasta paralela (Acest lucru ar trebui riguros demonstrat, ceea ce nu facem acum).
 Astfel, Q_T va fi data de aria dreptunghiului $ABTO$, adică

$$Q_T = \frac{I_m^2 R}{2} \cdot T \quad (19)$$

f) Din definiția intensității efective I rezultă că, pe parcursul unei perioade T aceeași cantitate de căldură va fi degajată în rezistorul R de un curent continuu de intensitate I . Astfel:

$$Q_T = I^2 R T \quad (20)$$

g) Din relațiile (18) și (19) se deduce:

$$I^2 R T = \frac{I_m^2 R}{2} T \text{ sau } I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (21)$$

care se scrie și $I = 0,707 I_m \quad (21^*)$

9. Relația dintre tensiunea efectivă și tensiunea maximă într-un doru puncte ale unui rezistor

Din (18) și (21) avem: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \quad (22)$ sau $U = 0,707 U_m \quad (22^*)$
 deoarece $U_m = I_m R$.