PROBLEME DE FIZICĂ LEGATE DE TRECEREA SISTEMULUI PRIN STĂRI METASTABILE

Conf. univ. Dr. Vitalie CHISTOL
Universitatea Tehnică a Moldovei

O analiză profundă a rezultatelor obţinute la rezolvarea problemelor de fizică poate fi efectuată reprezentând grafic procesele la care este supus sistemul. Rezolvarea grafică ne permite să stabilim sensul fizic al rădăcinilor ecuaţiilor pătrate (atunci când problema se reduce la rezolvarea unor astfel de ecuaţii) sau să explicăm procesele care au loc, atunci când sistemul trece prin anumite stări, pe care le vom numi metastabile.

În prezenta lucrare sunt examinate câteva probleme legate de trecerea sistemului prin stări metastabile şi sunt analizate rezultatele obţinute. Utilizând metoda grafică de rezolvare a problemelor, sunt examinate procesele care au loc şi sunt analizate concluziile care rezultă din rezultatele obţinute.

Thorough analysis of the results obtained from the solution of physical problems can be done by graphical interpretation of the processes in which the physical system is involved. Graphical solution allows identifying physical interpretation of the roots of quadratic equations (when the problem solutions reduce to such equations), or to explain occurring processes in those cases, when the system undergoes transitions through certain states, which we call metastable.

In the present work we investigate several problems related with the system transition to the metastable states and analyze the obtained results. Using the graphical solution ansatz we consider the occurring processes and analyze the obtained results.

Rezolvarea problemelor de fizică deseori se face superficial, fără o analiză profundă a rezultatelor obţinute, limitându-se doar la determinarea valorilor numerice ale unor mărimi fizice. Dar anume analiza acestor rezultate contribuie la înţelegerea esenţei fenomenelor, la stimularea creativităţii tineretului studios, la formarea deprinderilor de aplicare a rezultatelor obţinute în practică. O analiză profundă poate fi efectuată reprezentând grafic procesele la care este supus sistemul. Rezolvarea grafică ne permite să stabilim sensul fizic al rădăcinilor ecuaţiilor pătrate (atunci când problema se reduce la rezolvarea unor astfel de ecuaţii) sau să explicăm procesele care au loc, atunci când sistemul trece prin anumite stări, pe care le vom numi metastabile.

Să examinăm câteva probleme:

Problema 1 [1]

Un tub subţire de lungime l deschis la ambele capete este introdus până la înălţimea h în mercur. Capătul de sus se închide şi tubul se scoate din mercur. Aflaţi lungimea coloanei de mercur rămasă în tub. Presiunea atmosferică este p_0. Densitatea mercurului este ρ.

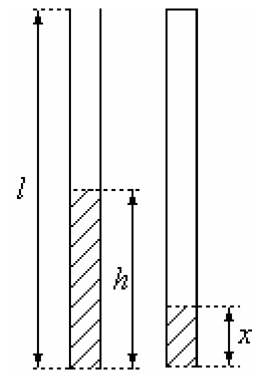

Fig. 1

Considerând că aerul din tub este supus unui proces izotermic, avem

$$p_0 V_0 = p_1 V_1 \quad \text{sau} \quad p_0(l-h) = p_1(l-x), \qquad (1)$$

unde x este lungimea coloanei de mercur rămasă în tub (fig.1).

$$p_1 = p_0 - \rho g x. \qquad (2)$$

Din (1) avem

$$p_1 = \frac{p_0 (l-h)}{(l-x)}. \qquad (3)$$

Egalând expresiile (2) şi (3), obţinem

$p_0 - \rho g x = \dfrac{p_0 (l-h)}{(l-x)}$, de unde, pentru înălţimea coloanei de mercur rămase în tub, rezultă ecuaţia pătrată

$$x^2 - \left(\frac{p_0}{\rho g} + l\right)x + \frac{p_0 h}{\rho g} = 0. \qquad (4)$$

Soluţiile acesteia sunt:

$$x_{1,2} = \frac{1}{2}\left[\frac{p_0}{\rho g} + l \pm \sqrt{\left(\frac{p_0}{\rho g}\right)^2 + l^2 + \frac{2p_0}{\rho g}(l-2h)}\right]. \qquad (5)$$

Presupunem că $h = l/2$. În acest caz, soluţiile ecuaţiei (5) iau forma:

$$x_{1,2} = \frac{1}{2}\left[\frac{p_0}{\rho g} + l \pm \sqrt{\left(\frac{p_0}{\rho g}\right)^2 + l^2}\right]. \qquad (6)$$

Evident, pentru soluţia cu semnul „+” din (6) rezultă $x > l$, de aceea sens fizic are numai soluţia cu semnul „–”.

Fie $h \neq l/2$. Este posibil oare ca pentru o oarecare valoare a lui h să se obţină ambele soluţii mai mici ca l? Analizând expresia (5) este greu de răspuns la această întrebare. Un răspuns mai evident se poate obţine rezolvând problema pe cale grafică. Pentru aceasta reprezentăm grafic dependenţele $p_1(x)$ din expresiile (2) şi (3) (fig.2).

Din expresia (3) se vede că în funcţie de valoarea lui h se schimbă doar poziţia curbelor (3) faţă de axa absciselor şi, indiferent de această poziţie, totdeauna $x_2 > l$ şi $x_1 < l$. Doar pentru valori foarte mici ale lui h punctul p' se va situa mai sus ca punctul p_0 şi vom obţine $x_1 < 0$. În acest caz soluţiile ecuaţiei (4) nu au sens fizic. Se explică aceasta prin faptul că pentru valori mici ale lui h, după ce se scoate tubul, tot mercurul din el se va scurge.

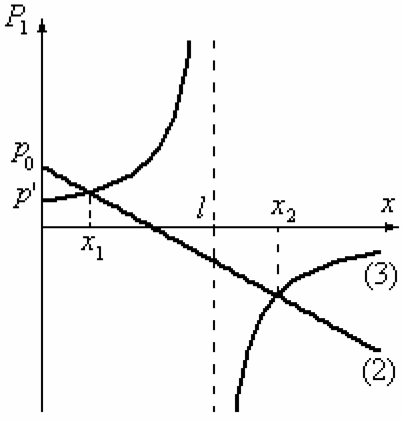

Fig. 2

Problema 2

Un cilindru vertical de lungime l este închis în partea de jos cu un piston. În cilindru se află aer separat de atmosferă printr-o coloană de mercur de lungime $h = l/2$ (fig. 3a). Densitatea mercurului este ρ. Presiunea atmosferică $p_0 = \rho g h$. Până la ce înălţime trebuie ridicat pistonul pentru ca tot mercurul din cilindru să se scurgă?

Fie x deplasarea coloanei de mercur la deplasarea pistonului cu a (fig. 3b).

Pentru un proces izotermic avem

$$p_1 V_1 = p_2 V_2, \qquad (7)$$

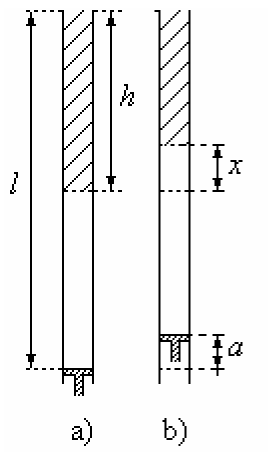

Fig.3

unde

$$p_1 = p_0 + \rho g h = 2p_0, \quad V_1 = Sl/2, \tag{8}$$

$$p_2 = p_0 + \rho g(h - x) = 2p_0 - \rho g x, \tag{9}$$

$$V_2 = S(l/2 - a + x). \tag{10}$$

Introducând expresiile (8) şi (10) în (7), obţinem

$$p_2 = \frac{p_0 l}{(l/2 - a + x)}. \tag{11}$$

Egalând expresiile din partea dreaptă a formulelor (9) şi (11), obţinem pentru deplasarea a:

$$a = \frac{l}{2} + x - \frac{l^2}{2(l - x)}. \tag{12}$$

Din (12) observăm că atât pentru x=0, cât şi pentru $x = l/2$, obţinem $a = 0$. Deci, funcţia $a(x)$ trece printr-un maxim. Vom afla valoarea lui x pentru care $a = \max$. Pentru aceasta calculăm derivata expresiei (12) şi egalăm această derivată cu zero. Pe această cale obţinem:

$x = x_0 = l - \frac{\sqrt{2}}{2} l$. Introducem această expresie în (12). Avem

$$a = a_0 = \left(3/2 - \sqrt{2}\right) l. \tag{13}$$

Deci, la deplasarea pistonului cu $a = a_0 = \left(3/2 - \sqrt{2}\right) l$ nivelul mercurului din cilindru se ridică cu $x = x_0 = l - \frac{\sqrt{2}}{2} l$. În continuare tot mercurul din cilindru se va scurge de la sine, fără ca pistonul să fie deplasat.

Pentru a explica fenomenele ce au loc, cercetăm echilibrul suprafeţei inferioare a mercurului din cilindru. Această suprafaţă se va afla în echilibru în cazul când presiunea pe care o exercită mercurul, exprimată prin relaţia (9), va fi egală cu presiunea pe care o exercită aerul din cilindru, exprimată prin relaţia (11).

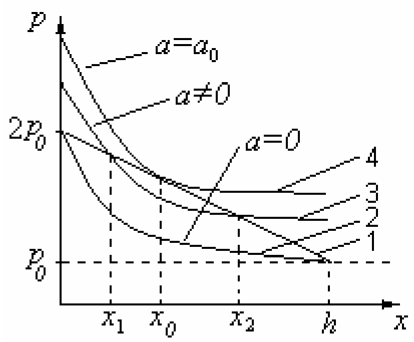

Fig.4

Trasăm graficul presiunii $p_2(x)$ [2], [3] după expresia (9) (dreapta 1) şi după (11) (curbele 2, 3, 4) (fig.4).

Din figură se observă că pentru $a = 0$ curba 2 se intersectează cu dreapta 1 în două puncte: $x = 0$ şi $x = h$. Cu cât valoarea lui a este mai mare, cu atât mai sus e situată curba 2.

Pentru anumite valori ale lui $a \neq 0$ dreapta 1 şi curba 3 au două puncte de intersecţie. Aceasta înseamnă că coloana de mercur are două poziţii de echilibru. Din fig. 4 se vede că pentru orice $x < x_1$ presiunea aerului din cilindru (curba 3) este mai mare decât presiunea exercitată de coloana de mercur (dreapta 1), iar pentru $x > x_1$ – mai mică. Deci, pentru $x = x_1$ echilibrul coloanei de mercur este stabil. La fel se poate vedea că pentru $x = x_2$ echilibrul este instabil.

Odată cu creşterea lui a, punctele x_1 şi x_2 se apropie unul de altul. Pentru $a = a_0$ stările de echilibru stabil şi instabil se confundă. Starea aceasta a sistemului o vom numi metastabilă. Pentru $a > a_0$ dependenţele (9) şi (11) nu au puncte de intersecţie. Din fig.4 vedem că, în acest caz, pentru orice înălţime a coloanei de mercur presiunea aerului din cilindru este mai mare ca presiunea exercitată de coloana de mercur. De aceea tot mercurul din cilindru se va scurge fără ca pistonul să fie deplasat.

Deci, pentru ca tot mercurul din cilindru să se scurgă trebuie să trecem sistemul în stare metastabilă, adică să deplasăm pistonul până la înălţimea $a = a_0 = \left(3/2 - \sqrt{2}\right)l$.

Despre interesul pe care îl prezintă problemele abordate în această lucrare ne vorbeşte şi polemica susţinută în paginile revistei „Evrika" [4], [5], [6] asupra unei probleme propuse de prof. M. Marinciuc.

Vom reproduce această problemă înlocuind sintagma „picătură de lichid" cu cuvântul „piston".

Problema 3

În interiorul unui tub lung având aria secţiunii transversale S, sudat la un capăt, la distanţa l de la capătul sudat se află un piston de masă m. Tubul poate să se rotească în plan orizontal, în jurul axei verticale ce trece prin capătul sudat al lui (fig. 5). Să se determine deplasarea pistonului, x, de la poziţia sa iniţială, dacă tubul se roteşte cu viteza unghiulară ω. Dimensiunile pistonului se vor neglija. Presiunea atmosferică se va considera egală cu p_0.

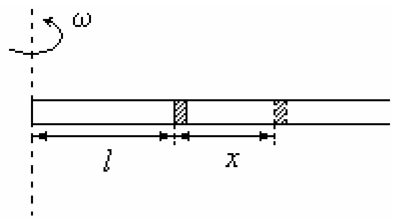

Fig.5

Aerul acţionează asupra pistonului cu forţa rezultantă

$$F_1 = p_0 S - pS = p_0 S - \frac{p_0 l S}{l + x}, \qquad (14)$$

unde p este presiunea aerului din tub.

Forţa ce imprimă pistonului acceleraţie centripetă este

$$F_2 = m\omega^2 \left(l + x\right). \qquad (15)$$

Egalând aceste două forţe, obţinem o ecuaţie pătrată pentru deplasarea pistonului. Rădăcinile ei sunt:

$$x_{1,2} = \frac{1}{2m\omega^2}\left[p_0 S \pm \sqrt{p_0^2 S^2 - 4m\omega^2 p_0 l S} \right] - l. \qquad (16)$$

Deci, problema are două soluţii.

Reprezentăm grafic forţele F_1 şi F_2 în funcţie de valoarea deplasării x (fig.6).

La fel ca în cazul problemei precedente, se vede că una din soluţii corespunde unei stări

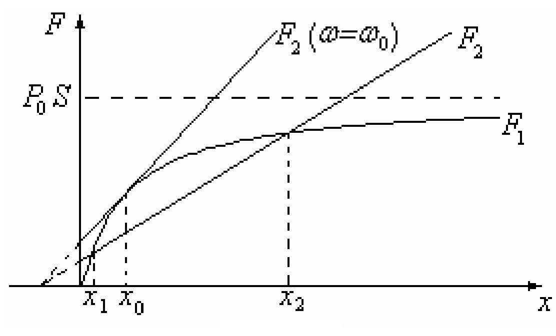

Fig. 6

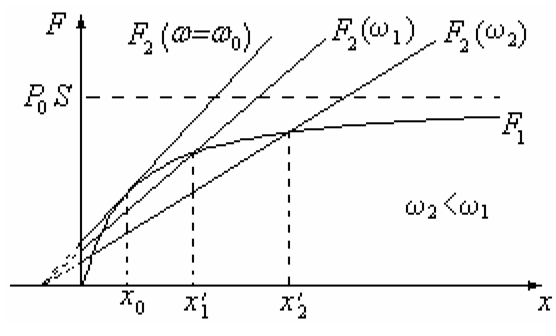

Fig.7

stabile, cea de a doua – unei stări nestabile. Pentru $\omega = \omega_0$ starea stabilă şi cea nestabilă se contopesc şi sistemul trece în stare metastabilă. Poziţia $x = x_0$ a pistonului corespunde stării metastabile. Pentru o valoare mai mare a lui ω pistonul se va depărta nelimitat.

Să presupunem acum că deplasarea pistonului este limitată în intervalul de la $x_1' > x_0$ până la x_2'. Să vedem cum depinde în acest caz poziţia pistonului de viteza de rotaţie a cilindrului.

Odată cu creşterea vitezei unghiulare ω, pistonul va rămânea în poziţia x_1'. Când ω atinge valoarea $\omega_1 < \omega_0$ sistemul trece în stare metastabilă şi pistonul trebuie să se deplaseze nelimitat, de aceea el va trece din poziţia x_1' în poziţia x_2'. În această poziţie sistemul se va menţine pentru orice $\omega < \omega_1$. Micşorând viteza unghiulară, pistonul va rămâne în poziţia x_2' până atunci până când aceasta va deveni $\omega_2 < \omega_1$ (fig.7). Deci, vom obţine un fenomen analogic fenomenului de bistabilitate: Sistemul posedă două stări stabile. Trecerea din prima stare în a doua are loc pe o cale (la viteza ω_1), trecerea din starea a doua în prima are loc pe o altă cale (la viteza $\omega_2 < \omega_1$).

Acelaşi fenomen de bistabilitate poate fi observat şi în problema următoare.

<u>Problema 4</u>

Pe un disc este fixat un resort, de un capăt al căruia este prins un corp mic de masă m. Resortul are lungimea l_0, iar corpul se află la distanţa x_0 de la axa de simetrie a discului (fig. 8). Resortul se extinde şi corpul se fixează la distanţa r_1 de la axa discului, astfel încât mişcarea lui se limitează de limitatoarele 1 şi 2 în intervalul $r_1 \geq r \leq r_2$, unde r este distanţa de la corp până la axa discului. Coeficientul de elasticitate al resortului este k. Întreg sistemul se roteşte cu viteza unghiulară ω. Reprezentaţi grafic dependenţa $r(\omega)$. Masa resortului se neglijează.

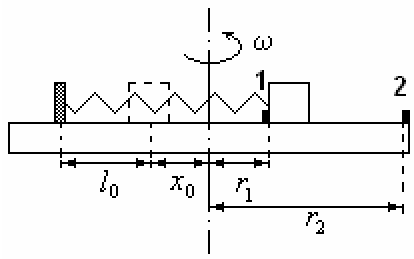

Fig. 8

Asupra corpului acţionează două forţe (în afară, desigur, de forţele de reacţiune ale limitatoarelor):

$$F_1 = k(r + x_0), \qquad (17)$$

$$F_2 = m\omega^2 r. \qquad (18)$$

Egalând aceste două forţe, obţinem relaţia pentru distanţa r până la poziţia de echilibru a corpului.

$k(r + x_0) = m\omega^2 r$, de unde

$$r = \frac{kx_0}{m\omega^2 - k} \qquad (19)$$

Din (19) se vede că rezultatul obţinut este valabil doar pentru $\omega \geq \omega_0 = \sqrt{k/m}$.

Reprezentăm grafic funcţiile $F_1(r)$ şi $F_2(r)$ (fig.9).

Din fig. 9 se observă că pentru orice viteză unghiulară mai mică decât ω_1, la $r = r_1$, $F_1 > F_2$ şi forţa de reacţiune a limitatorului menţine corpul în stare de repaus. La $\omega = \omega_1$ sistemul trece în stare metastabilă, resortul începe să se extindă şi corpul se depărtează la distanţa $r = r_2$. La mărirea vitezei unghiulare corpul rămâne la această distanţă. Micşorând viteza unghiulară a discului, corpul se va menţine la aceeaşi distanţă până la viteza $\omega_2 < \omega_1$. La viteza $\omega = \omega_2$ corpul trece în poziţia iniţială.

Graficul dependenţei $r(\omega)$ are forma reprezentată în figura 10.

Deci, ca şi în cazul problemei precedente obţinem un fenomen analogic fenomenului de bistabilitate. Acest fenomen ar putea fi aplicat, să zicem, pentru schimbarea vitezelor în cazul unui automobil cu cutia de viteze automată.

Vedem că în toate problemele în care se produce trecerea unui sistem prin stări metastabile, asupra sistemului acţionează două forţe (efecte, fenomene) care concurează între ele. În urma variaţiei unui parametru (viteză unghiulară, presiune, deplasarea pistonului etc.) creşte influenţa unui efect şi scade influenţa celuilalt. În cazul când influenţa unui efect depăşeşte influenţa celui de al doilea, sistemul trece în stare metastabilă, după care urmează îndepărtarea bruscă şi nelimitată a sa de la această stare.

Ceva asemănător are loc în cazul supraconductibilităţii (este cunoscut că mecanismul supraconductibilităţii nu este dezvăluit în întregime până în prezent). Putem presupune că şi în cazul acesta are loc concurenţa dintre două efecte şi odată cu creşterea temperaturii scade influenţa unui efect şi, ca rezultat, creşte conductibilitatea. La o anumită valoare a temperaturii acţiunea primului efect depăşeşte acţiunea celui de-al doilea, sistemul trece în stare metastabilă şi conductibilitatea tinde spre infinit. Rămâne să găsim care sunt aceste două efecte.

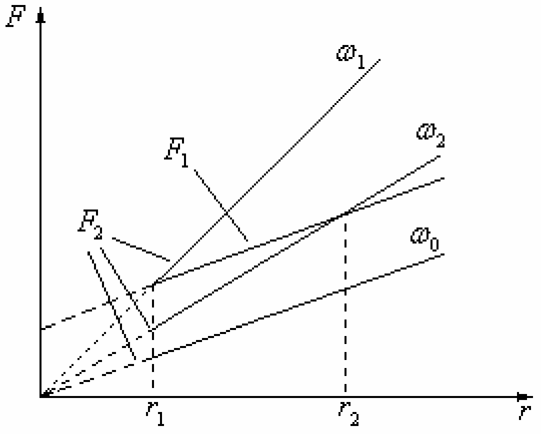

Fig. 9

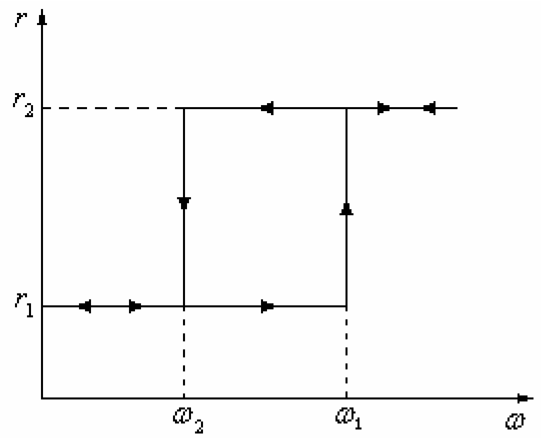

Fig. 10

BIBLIOGRAFIE

1. A.P. Rîmkevici, P. A. Rîmkevici. Culegere de probleme de fizică. Chişinău, Lumina, 1980.
2. V. Chistol, C. Pârţac, N. Ungureanu. Aplicarea problemelor de fizică în educaţia tehnologică a studenţilor. Conferinţa tehnico–ştiinţifică a studenţilor şi doctoranzilor consacrată Anului fizicii. 17 noiembrie 2005. Chişinău, UTM, 2005, p.47-48.
3. В. Эпштейн. От простого к сложному. (De la simplu la compus). Квант, nr.3, 2007, pag. 34-36.
4. M. Marinciuc Probleme de fizică moleculară cu ecuaţii pătrate. Evrika, nr. 9-10 (33-34), 1993, pag. 18-19.
5. T. Ţugui, R. Sfichi. Asupra unei probleme. Evrika, nr. 1 (37), 1993, pag. 22.
6. Călin Mihăileanu. Observaţii în legătură cu nota „Asupra unei probleme”. Evrika, nr. 1 (41), 1994, pag. 7-8.

Primit la redacţie: 12 martie 2009

MONTAREA UNUI CIRCUIT ELECTRIC SIMPLU
LUCRARE DE LABORATOR (CLASA a 8-a)

Sergiu CÂRLIG, Cornelia CÎRLIG, Oleg CIOBANU, Ion CÎRLIG

Scopul lucrării: montarea unui circuit electric, măsurarea intensităţii curentului electric, determinarea numărului de electroni care traversează secţiunea transversală a unui conductor

Utilaj: sursă electrică de alimentare, bec electric, multimetru, fire de conexiune.

Note teoretice:

Un circuit electric este format din fire conductoare, dispozitive şi sursa de curent conectate într-un anumit fel. Cel mai simplu circuit constă dintr-o sursă de curent (baterie), un bec electric şi un întrerupător, legate în serie. La închiderea circuitului, prin conductoare începe să circule curent electric. Acesta este caracterizat de mărimea fizică numită intensitate a curentului electric, care se măsoară cu ampermetrul (se conectează în serie). Pe de altă parte, intensitatea curentului electric continuu reprezintă raportul dintre sarcina q care străbate secţiunea transversală a unui conductor şi durata trecerii curentului t :

$$I = \frac{q}{t} \qquad (1)$$

Ţinând cont de faptul că în conductoarele metalice electronii sunt particule libere, sarcina $|q| = Nq_0$, unde N este numărul de electroni care trec prin secţiunea transversală a unui conductor, iar $q_0 = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C este sarcina elementară. Deci, $|I| = \frac{Nq_0}{t}$.

Măsurând intensitatea şi durata trecerii curentului, putem afla numărul electronilor ce au traversat secţiunea transversală a conductorului din circuit:

$$\boxed{N = \frac{|I|t}{q_0}}. \qquad (2)$$

Reguli de utilizare a multimetrului

Multimetrul este un aparat electric pentru măsurarea tensiunii, şi intensităţii curentului, precum şi a rezistenţei electrice a conductorului. Acesta are două fire de conexiune (de regulă, unul de culoare roşie şi altul negru) cu două sonde izolate. Valorile mărimilor măsurate se afişează pe ecranul cu cristale lichide. În partea centrală se află selectorul de poziţie. Atunci când nu se face nicio măsurare, selectorul se va plasa în poziţia **OFF**, în felul acesta durata de funcţionare a multimetrului cu aceeaşi baterie creşte considerabil.

În această lucrare veţi măsura intensitatea curentului electric. Pentru aceasta unul dintre firele de conexiune se va conecta la borna **10 A,** cealaltă la borna **COM,** iar selectorul se va pune în poziţia **10 A** de pe scara **DCA**. **Atenţie**! Setat astfel, multimetrul se va conecta în circuit doar în **serie**, altfel riscaţi să îl deterioraţi.

Calculul erorilor

Intervalul de timp t şi intensitatea curentului electric au fost determinate prin măsurări directe. Dacă se utilizează un cronometru cu indicator (ac), atunci eroarea de măsurare a timpului este egală cu valoarea unei diviziuni a cronometrului $\Delta t = 1 div =$ ____ s . În cazul utilizării unui cronometru digital Δt va fi egală cu jumătate din unitatea ultimei cifre citită pe aparat $\Delta t =$ ____ s . Eroarea măsurării intensităţii curentului electric se determină conform paşaportului multimetrului. Dacă pentru poziţia data de măsurare se indică ±(2% rdg+10D) atunci eroarea reprezintă 2% din valoarea citită pe ecranul aparatului la care se adaugă 10 unităţi ale ultimei cifre indicate. De exemplu, la poziţia 10 A DCA pe display este indicată valoarea 1,20. Eroarea in acest caz este $\Delta I = \left(1{,}2 \cdot \frac{2}{100} + 10 \cdot 0{,}01\right)\text{A} = 0{,}124 A = 0{,}12\,\text{A}$. Similar pentru alte valori $\Delta I =$ ____ A .

Pentru eroarea relativă şi absolută a determinării numărului de electroni (măsurări indirecte) se vor utiliza formulele:

$$\boxed{\varepsilon = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta t}{t}} \qquad \boxed{\Delta N = N \cdot \varepsilon} \qquad (3)$$

Eroarea relativă a sarcinii elementare este mult mai mică decât erorile măsurărilor şi, prin urmare, se va neglija.

Modul de lucru

1. Montaţi un circuit simplu format din sursă, bec, întrerupător.
2. Setaţi multimetrul în calitate de **ampermetru** (poziţia **10 A** zona **DCA**, borna **10ADC**) şi conectaţi-l în circuit **în serie**.
3. Cronometraţi un interval de timp t şi înregistraţi valoarea medie a intensităţii curentului I .
4. Repetaţi experienţa precedentă de 3 ori şi treceţi datele în tabel.
5. Calculaţi numărul electronilor care au străbătut secţiunea transversală a conductorului.
5. Calculaţi eroarea relativă şi eroarea absolută.
6. Daţi un exemplu de calcul, scrieţi rezultatul final şi formulaţi concluziile.

Tabelul măsurărilor şi determinărilor

Nr.	t , s	I , A	N	ΔN	ε , %
1					
2					
3					

Desenaţi schema şi indicaţi elementele circuitului

Exemple de calcul:

Numărul electronilor N=

Eroarea relativă $\Delta N/N =$

Rezultatul final:

$N = (N \pm \Delta N) = ($ ____ $\pm$ ____ $)$, $\varepsilon =$ ____ %

Concluzii: