

ავთანდილ შურღაია

ფიზიკა ამოცანებში

ცვლადი დენი და ელექტრომაგნიტური ინდუქცია

ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის თანახმად, გამტარით შემოსაზღვრული ფართობის გამჭოლი მაგნიტურ ინდუქციის ნაკადის ცვლილების დროს გამტარში აღიძვრება ინდუქციის ემპ, რომელიც გამოითვლება ფორმულით

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}.$$

მინუს ნიშანი განსაზღვრული ლენცის წესის თანახმად, რომლის მიხედვით აღძრული ინდუქციური დენი მიმართულება ისეთია, რომ მის მიერ შექმნილი მაგნიტური ინდუქციის ნაკადის ცვლილება ეწინააღმდეგება ამ დენის შექმნილი მაგნიტური ველის ინდუქციის ნაკადის ცვლილებას. აქ უნდა განვასხვაოთ ორი შემთხვევა. მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი შეიძლება შეიცვალოს, თუ მოძრაობს ჩარჩო მუდმივ მაგნიტურ ველში გარკვეული სიჩქარით. ამ დროს გამტარის ბოლოებზე აღძრული პოტენციალთა სხვაობის მიზეზი არის დამუხტულ ნაწილაკზე მოქმედი ლორენცის ძალა, რომელიც გამტარში მუხტების განცალკევებას იწვევს. მსგავსი შედეგი დგება მაშინაც, როდესაც გამტარი უძრავია, მაგრამ მაგნიტური ველი იცვლება დროში. ეს კი თვისობრივად განსხვავებული მოვლენაა, რაც მდგომარეობს იმაში, რომ ცვლადი მაგნიტური ველი აღძრავს ცვლად ელექტრულ ველს (სწორედ ეს იყო მნიშვნელოვანი და ახალი ამ მოვლენის აღმოჩენის დროს). მათემატიკურად ორივე შემთხვევა აღიწერება ზემოთ მოტანილი ფორმულით, რომელშიც მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი განიმარტება როგორც მაგნიტური ველის და გამტარით შემოფარგლული ზედაპირის ფართობის ნამრავლი ამ ზედაპირის ნორმალსა და მაგნიტური ველის მიმართულებას შორის კუთხის კოსინუსზე:

$$\phi = BS \cos \alpha.$$

ინდუქციურ პოტენციალთა სხვაობა: თვითმფრინავი, რომლის ფრთების გაშლის სიგრძეა $l = 20$ მ, მიფრინავს ჩრდილოეთის მიმართულებით 960 კმ/სთ სიჩქარით და სიმაღლეზე, სადაც დედამიწის მაგნიტური ველის ვერტიკალური მდგენელია $6 \cdot 10^{-5}$ ტ. განსაზღვრეთ პოტენციალთა სხვაობა ფრთების ბოლოებზე. რომელ ფრთაზეა მეტი პოტენციალი?

თვითმფრინავის ელექტრონებზე მოქმედებს ლორენცის ძალა, რადგან ისინი თვითმფრინავთან ერთად მოწესრიგებულად მოძრაობენ მაგნიტურ ველში მის მართობულად. ინდუქციურ პოტენციალთა სხვაობა ფრთების ბოლოებზე გამოითვლება ფორმულით:

$$U = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t}.$$

თვითმფრინავი მოძრაობს მუდმივ მაგნიტურ ველში და მაგნიტური ინდუქციის ნაკადის ცვლილება გამოწვეულია იმ ფართობის ცვლილებით, რომელსაც მაგნიტური ველის ძალწირები განჭოლავენ: $\Delta S/\Delta t$. ამიტომ

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = B \frac{\Delta S}{\Delta t} = Bvl.$$

ამრიგად

$$U = -Bvl = 1.07 \cdot 10^{-3} \text{ ვ.}$$

მეორე მხრივ ლორენცის ძალია გავლენით ელექტრონები აღმოსავლეთის მიმართულებით ამოძრავდებიან (მარჯვენა ხელის წესის თანახმად) და ეს გაგრძელდება მანამდე, ვიდრე ლორენცის ძალის მუშაობა არ გაუტოლდება ელექტრონების მიერ შექმნილი ელექტრული ველის მუშაობას, ანუ

$$qU = -qBvl.$$

ნიშანი მინუსი მიუთითებს, რომ ელექტრონების მოძრაობის მიმართულებით პოტენციალი მცირდება. ეს ნიშნავს, რომ აღმოსავლეთის მხარეს ფრთის წვერს ყველაზე დაბალი პოტენციალი აქვს.

ინდუქციური ელექტრული ველის დამაბულობა: r რადიუსის მქონე წრიული გამტარი მოთავსებული მაგნიტურ ველში, რომელიც გამტარის სიბრტყის მართობულია. მაგნიტური ველი იცვლება კანონით $B = kt$. განსაზღვრეთ ინდუქციური ელექტრული ველის დამაბულობის სიდიდე.

ინდუქციის ემპ სიდიდე გამოითვლება ფორმულით

$$\mathcal{E}_i = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = k\pi r^2.$$

მეორეს მხრივ ემპ ტოლია გამტარში ერთეული დადებით მუხტის გადადგილებაზე შესრულებული მუშაობის

$$\mathcal{E}_i = \frac{F \cdot 2\pi r}{q} = \frac{qE \cdot 2\pi r}{q} = 2\pi rE.$$

ორივე ფორმულის გაერთიანებით მივიღებთ:

$$E = \frac{kr}{2}.$$

დენი სოლენოიდში: $l = 1\text{ მ}$ სიგრძის და $d = 10\text{ სმ}$ დიამეტრის სოლენოიდში, რომლის ხვიათა რიცხვი $N = 2000$, გადის $I = 1\text{ ა}$ დენი. სოლენოიდს თანაბრად ჭიმავენ $v = 40\text{ მ/წმ}$ სიჩქარით. ამავე დროს სოლენოიდის ბოლოებზე მოდებული ძაბვა იცვლება ისე, რომ დენი გამტარში არ

იცვლება. რისი ტოლი იქნება პოტენციალთა სხვაობის ცვლილება მაშინ, როდესაც სოლენოიდის სიგრძე ორჯერ გაიზრდება. დიამეტრის ცვლილება უგულებელყავით.

განმარტების თანახმად, მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი სოლენოიდში $\phi = NBS$, სადაც B არის მაგნიტური ველის ინდუქცია, ხოლო S ხვრის განივკვეთის ფართობი. სოლენოიდის მაგნიტური ინდუქციის სიდიდე ტოლია

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

ამრიგად,

$$\phi = \frac{\mu_0 N^2 IS}{l}$$

ამოცანის პირობის თანახმად, დენი სოლენოიდში მუდმივია და მაშასადამე მაგნიტური ინდუქციის ნაკადი იცვლება სოლენოიდის გეომეტრიის ცვლილების, ანუ სიგრძის ცვლილების გამო (დიამეტრი უცვლელია).

სოლენოიდის სიგრძე იცვლება წესით $l = l_0 + vt$. ნაკადის ცვლილების სისწრაფის სიდიდე იქნება

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{\mu_0 N^2 IS}{\Delta t} \left(\frac{1}{l_0 + vt} - \frac{1}{l_0 + v(t + \Delta t)} \right)$$

თუ Δt უსასრულოდ მცირეა ($\Delta t \rightarrow 0$), მაშინ

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{\mu_0 N^2 ISv}{(l_0 + vt)^2}$$

სოლენოიდის სიგრძე გაიზრდება ორჯერ t_0 დროში, რომელიც გამოითვლება ფორმულით

$$l_0 + vt_0 = 2l_0 \Rightarrow t_0 = \frac{l_0}{v}$$

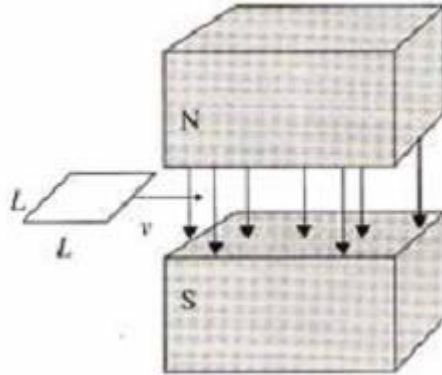
დროის ამ მომენტისთვის

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{\mu_0 N^2 ISv}{4l_0^2} = \frac{\mu_0 N^2 I \pi d^2 v}{16 l_0^2} \approx 0.0043$$

სწორედ ეს სიდიდე განსაზღვრავს პოტენციალთა სხვაობის ცვლილებას სოლენოიდის ბოლოებზე დროის იმ მომენტისთვის, როდესაც მისი სიგრძე ორჯერ გაიზრდება.

კვადრატული გამტარი ჩარჩო მუდმივ მაგნიტურ ველში: კვადრატული გამტარი ჩარჩო ზომებით $L \times L$ მოძრაობს მუდმივი v სიჩქარით და შედის მუდმივი მაგნიტის პოლუსებს შორის, რომლის მაგნიტური ველის ინდუქციის სიდიდეა B . ჩარჩოს სიბრტყე და სიჩქარე ველის

მართობულია. განსაზღვრეთ დენი გამტარში. აღწერეთ ჩარჩოს მოძრაობა მაგნიტურ ველში. გამოთვალეთ აღძრული დენის სიმძლავრე.



ნახ. 1

გამტარში გამავალი დენი ტოლი იქნება

$$I = \frac{\mathcal{E}_i}{R},$$

სადაც R არის გამტარის წინაღობა, ხოლო \mathcal{E}_i გამტარში აღძრული ინდუქციის ემმ, რომელიც ტოლია

$$\mathcal{E}_i = BVL.$$

ლენცის წესის თანახმად, ეს დენი მიმართული იქნება საათის ისრის მოძრაობის საპირისპიროდ. ამიტომ ჩარჩოს მაგნიტურ ველში მყოფ გვერდზე მოქმედებს ძალა. რომელიც ეწინააღმდეგება ჩარჩოს მოძრაობას. ეს ძალა ტოლია

$$F = BIL = \frac{B^2 L^2 v}{R}.$$

ამიტომ, რომ შევინარჩუნოთ ჩარჩოს სიჩქარე, მასზე გარედან უნდა ვიმოქმედოთ ამ ძალის საპირისპირო და სიდიდით მისი ტოლი ძალით. ეს კი ნიშნავს, რომ ეს ძალა შეასრულებს მუშაობას. ცხადია, ეს მუშაობა არ იხარჯება ჩარჩოს კინეტიკური ენერგიის გაზრდაზე - მის ხარჯზე იზრდება გამტარის შინაგანი ენერგია და გამტარი თბება. ამ დროს გამოიმუშავებული სიმძლავრე ტოლი იქნება

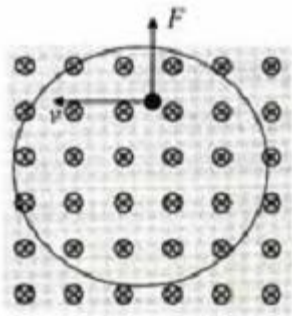
$$P = FV = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}.$$

მეორე მხრივ, გამტარში აღძრული დენის სიმძლავრე ტოლია

$$P = \mathcal{E}_i I = \frac{B^2 L^2 v^2}{R},$$

ეს ემთხვევა გარეშე ძალის მიერ გამომუშავებულ სიმძლავრეს და ეს ფაქტი გამოხატავს ენერჯის მუდმივობის კანონს.

ფარადის დისკო: გამტარი დისკო ბრუნავს თავისი ღერძის გარშემო მუდმივი კუთხური სიჩქარით მუდმივ მაგნიტურ ველში, რომელიც დისკოს ზედაპირის მართობულია. განსაზღვრეთ პოტენციალთა სხვაობა დისკოს ცენტრსა და დისკოს შემომსაზღვრელი წრეწირის რომელიმე წერტილს შორის.



ნახაზზე ჯვარი რგოლში ნიშნავს, რომ მაგნიტური ველის ძალები შედიან სიბრტყეში მის მართობულად. F არის ძალა, რომლითაც მაგნიტური ველი მოქმედებს ელექტრონზე ცენტრიდან დისკოს რადიუსის r ტოლ მანძილზე. ეს ძალა ტოლია

$$F = evB.$$

აქ e არის ელექტრონის მუხტის სიდიდე, v მისი სიჩქარე, ხოლო B მაგნიტური ველის ინდუქციის სიდიდე. ამ ძალის მუშაობით შიძლება გამოვთვალოთ პოტენციალთა სხვაობა დისკოს ცენტრსა და მის შემომსაზღვრელ წრეწირს შორის (მოითხოვს პოტენციალთა სხვაობის გრადიენტის განხილვას). იგივე შედეგი შეიძლება მივიღოთ ელექტრომაგნიტური ინდუქციის კანონის გამოყენებით. კერძოდ, საძიებელი პოტენციალთა სხვაობის სიდიდე იქნება

$$U = \frac{\Delta\phi}{\Delta t},$$

რომელშიც მაგნიტური ინდუქციის ნაკადის ცვლილება განპირობებულია დისკოს ბრუნვის დროს რადიუსის მიერ შემოწერილი ფართობის ცვლილების სისწრაფით:

$$U = B \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

ფართობი S არის წრეწირის სექტორის ფართობი და იგი ტოლია

$$S = \frac{1}{2} R^2 \theta.$$

აქ $\theta = \omega \Delta t$ არის დისკოს რადიუსის შემობრუნების კუთხე. მარტივი გარდაქმნებით მივიღებთ, რომ საძიებელი პოტენციალთა სხვაობის სიდიდე ტოლია:

$$U = \frac{1}{2} B R^2 \omega.$$