

# ДИНАМІКА РУХУ ЕЛЕКТРОНА В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

Vasil Tchaban, Dr. Sc., Prof.

Lviv Polytechnic National University, Lviv National Agrarian University

Ukraine, e-mail: [v1z4d5@gmail.com](mailto:v1z4d5@gmail.com)

## 1. Реферат

У наш час функції закону взаємодії рухомих наладованих тіл перебрала на себе цілковито теорія відносності, прикриваючись псевдогаслом про неспроможність перетворень Галілея. Усупереч цьому в статті адаптовано закон Кулона на випадок рухомих мас у всеможливому діапазоні швидкостей у звичних тривимірному Евклідовому просторі і фізичному часі. При цьому враховано скінченну швидкість поширення електричного поля і закон збереження ладунку. На цій підставі просимульовано динаміку вільного руху електрона в нерівномірному електричному полі. Задля якісної і кількісної оцінки прояву релятивістського ефекту на динаміку руху приводяться дублюючі часові функції швидкостей і координат, одержані за класичним законом Кулона. Зроблено електромеханічні аналогії електричного і гравітаційного полів.

## 2. Ключові слова

законом Кулона, закон збереження ладунку, релятивістська швидкість, скінченна швидкість поширення електричного поля, динаміка руху вільного електрона в нерівномірному електричному полі.

## 3. Вступ

Взаємодія рухомих електронів з електричним полем є основним процесом у всіх електронних приладах. Закони руху одного електрона в однорідному електричному полі з відомим наближенням можна застосувати до руху його в електронному потоці, якщо знехтувати їхнім взаємовідштовхуванням. Електричне поле в більшості випадків неоднорідне і вельми складне по своїй структурі. Тому вивчення руху електронів у неоднорідних електричних полях дуже утруднене й відноситься до галузі електроніки, званої електронною оптикою.

Динаміці руху електрона в електричному полі присвячено багато наукових публікацій, але всі вони в переважній більшості охоплюють діапазон дорелятивістських швидкостей. Для рухомих мас у такому діапазоні достатню точність забезпечує закон електричної взаємодії Кулона – базовий закон електростатики, який визначає величину та напрямок сили взаємодії між двома нерухомими точковими ладунками. На підрелятивістських швидкостях закон Кулона недопустимо спотворює реальний процес. Тож, доводиться звертатися до складних рівнянь теорії відносності, причому не завжди застосовних і якими в більшості випадків не можна скористатися на практиці. Тому постає резонне питання, а чому б не спростити задачу, адаптувавши закон Кулона на випадок рухомих ладунків у звичному тривимірному просторі і фізичному часі.

Зрозуміло, що таке розв'язання проблеми не на користь релятивістів, тому то свого часу й були поставлені поза законом перетворення Галілея, не дивлячись на застереження, зроблені понад сто років тому Генрі Пуанкаре щодо перетворень Лоренца [1]: «Це не означає, що вони були змушені це зробити; вони вважають, що нова угода більш зручна – ось і все. А ті, хто не дотримується їхньої думки і не бажає відмовлятися від своїх старих звичок, можуть з повним правом зберегти стару угоду. Між нами кажучи, я думаю, що вони ще довго будуть поступати таким чином». У [1] читаємо далі: «Особливому погляду Пуанкаре на нову теорію не надали серйозного значення. Багато пізніше, уже в другій половині ХХ ст. стало очевидним, що Пуанкаре мав цілковиту рацію, коли стверджував, що *ніякий фізичний досвід не може підтвердити істинність одних перетворень і відкинути інші, як неприпустимі*. Витоки нерозуміння поглядів Пуанкаре криються в розкритті умовного характеру одночасності. У результаті стало можливим помилкове розуміння цієї теорії, при якому основна увага акцентувалася на «неспроможності» перетворень Галілея. Це нерозуміння знайшло відображення в прийнятій логіці побудови теорії відносності, коли з релятивістських властивостей простору і часу виводяться нові властивості руху при високих швидкостях».

Значно радикальніше через сто років висловлюється харків'янин С. Каравашкін [2]: «Заяви релятивістів про нездатність класичної фізики в цілому, як і закону всесвітнього тяжіння Ньютона описувати динамічні процеси, є помилковими. Для адаптації закону Ньютона в область динамічних полів всього лише потрібно коректне врахування скінченності швидкості поширення гравітаційного поля. При цьому, вже в області малих швидкостей з'являються відповідні множники, а при переході до швидкості світла проявляються нелінійні ефекти, які описуються трансцендентними рівняннями – то, що ніколи не може бути описано ні в рамках СТВ, ні в рамках ЗТВ... У принципі, нездатність релятивізму в описі динамічних процесів якраз і виникає з умов, при яких з'явилися їхні базові формули... Наслідком цього є повна її нездатність відповідати на реальні питання часу. Продовження ж додавання нових і нових неочевидних припущень і тверджень все більше відсуває вчених від реального дослідження процесів у Всесвіті. Тільки повернення до вихідного тривимірного лінійного простору плюс часу класичної фізики поверне вчених на шлях вивчення саме фізичних процесів, а не жонгливання символами і пошуками неіснуючої коваріантності».

Спробу повернутися від релятивізму в електричному полі до рівнянь Максвелля в чотиривимірному просторі-часі бачимо також у [3] і в тривимірному просторі і фізичному часі в [4].

Задум статті виник саме під безпосереднім впливом [1–2].

## 4. Теоретична частина

Закон електричної взаємодії точкових наладованих тіл Ш. Кулон експериментально встановив у 1785 р. Теорія Кулона заклала основи електростатики. Закон описує електричну силу взаємодію нерухомих наладованих тіл

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}, \quad (1)$$

де  $\mathbf{F}$  – вектор сил взаємодіючих наладованих тіл з ладунками  $q_1$  і  $q_2$ ;  $r$  – відстань між електричними центрами тіл;  $k$  – електрична константа;  $\mathbf{r}$  – одиничний вектор.

Обмеження нерухомістю взаємодіючих ладунків можна трактувати пропagaцією електричного поля з безмежною швидкістю, або т. зв. миттєвою електричною взаємодією. Насправді ж за сучасними уявленнями як електричне, так і гравітаційне поля розповсюджуються з максимально можливою фізичною швидкістю  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Тож, щоб адаптувати закон (1) до реальних умов, достатньо внести в розгляд факт часового електричного запізнення! Інакше, у заморожений момент часу  $t$  відстань братимемо не до реального знаходження взаємодіючих тіл, а до точки траєкторії з врахуванням часового запізнення  $\Delta t$ .

Таку адаптацію нами здійснено в загальному векторному випадку. Але в даному разі досліджується значно простіша задача – динаміки вільної взаємодії (за відсутності інших силових полів), коли електричні центри наладованих взаємодіючих тіл знаходяться на одній прямій. Тому аналіз суттєво спрощується.

У заморожений момент часу  $t$  відстань  $r$  між взаємодіючими наладованими тілами визначатиметься як

$$R = (c \mp v) \Delta t, \quad (2)$$

де  $v$  – миттєва швидкість руху наладованого тіла; знак « $\mp$ » указує на зближення, а знак « $+$ » – на віддалення тіл. Ладунком тіла, генеруючого поле, позначимо великою літерою  $Q$ , а ладунком рухомого тіла – малою  $q$ . Реальну відстань між електричними центрами наладованих тіл знайдемо згідно з (2) як

$$r = c \Delta t = \frac{R}{1 \mp \frac{v}{c}}. \quad (3)$$

Підставляючи (3) в (1), одержимо вираз адаптованого закону (1) у скалярному записі на випадок вільної взаємодії ладунків  $q$  і  $Q$  з урахуванням електричного запізнення

$$F = k \frac{qQ}{R^2} \left(1 \mp \frac{v}{c}\right)^2. \quad (4)$$

Тож, при  $v = 0$  вираз (4) вироджується до (1), бо так має бути. При русі на зближення в природному керунку з граничною швидкістю ( $v = c$ ) електрична взаємодія зникає сама по собі ( $F \rightarrow 0$ ). Зате при гальмуванні (проти електричної дії ( $v = -v$ ) сила зростає вчетверо ( $F \rightarrow 4F$ ). Тим і пояснюються ефекти на кшталт електричної затримки сигналів.

Баланс сил вільного притягання заряджених точкових тіл можна записати на підставі другого закону Ньютона

$$m \frac{dv}{dt} = k \frac{qQ}{R^2} \left(1 - \frac{v}{c}\right)^2. \quad (5)$$

У результаті одержимо диференціальне рівняння

$$\frac{dv}{dt} = \frac{q}{m} \frac{kQ}{R(x)^2} \left(1 - \frac{v}{c}\right)^2. \quad (6)$$

Щоб на практиці скористатися рівнянням (6), необхідно конкретизувати нелінійну функцію  $R(x)$

$$R = r_e + x, \quad (7)$$

де  $r_e$ ,  $x$  – радіус тіла, генеруючого поле, і відстань між взаємодіючими тілами.

Підставляючи (7) у (6), одержимо

$$\frac{dv}{dt} = \frac{q}{m} \frac{kQ}{(r_e + x)^2} \left(1 - \frac{v}{c}\right)^2. \quad (8)$$

Координатне рівняння є звичне

$$\frac{dx}{dt} = -v. \quad (9)$$

Діапазон змінних у (8), (9) – для швидкості:  $v_0 \leq v \leq c$ ; для координати:  $x_0 \geq x \geq 0$ , де  $v_0, x_0$  – початкові умови. Електричне поле може розганяти наладовану частинку, притягаючи, або відштовхуючи її, а може гальмувати, якщо вона по інерції рухається проти сил поля, що відтворюється знаками «-», «+» (зближення–віддалення).

Не менш практичне значення має випадок руху зарядженої частинки поперек напруженості електричного поля. У такому разі формула (4) дещо видозмінюється

$$F = k \frac{qQ}{R^2} \left( 1 + \frac{v^2}{c^2} \right). \quad (10)$$

Формула (10) проливає світло на гносеологічні засади електрики. Надамо їй такий вигляд

$$F = q \left( E + E \frac{v^2}{c^2} \right), \quad (11)$$

де  $E$  – модуль вектора напруженості електричного поля

$$E = k \frac{Q}{R^2}. \quad (12)$$

Якщо прийняти до уваги в (10) ортогональність векторів швидкості й електричного поля, то можемо записати закон Біо-Савара у вигляді [3, 7]:

$$B = \mu_0 (v \times \varepsilon_0 E) = \frac{vE}{c^2}; \quad c^2 = \frac{1}{\mu_0 \varepsilon_0}, \quad (13)$$

де  $B$  – модуль вектора магнетного поля  $\mathbf{B}$ ;  $\varepsilon_0, \mu_0$  – електрична й магнітна константи.

Згідно з (11–13) одержуємо модуль сили Лоренца

$$F = q(E + vB). \quad (14)$$

Таким чином, нами підтверджена класична істина про те, що магнітне поле як фізична субстанція не існує. Це всього-на-всього релятивістський ефект у електричному полі [7]!

У загальному випадку косоного руху наладованої частинки до силової дії електричного поля формули (4), (10) набирають векторного вигляду

$$\mathbf{F} = k \frac{qQ}{R^2} \left( 1 + \frac{v^2}{c^2} + 2 \frac{v}{c} \mathbf{v} \cdot \mathbf{r} \right) \mathbf{r}, \quad (15)$$

де  $\mathbf{v}$  – одиничний вектор швидкості.

Вираз (14) у векторній формі згідно з (15) приймає відомий вигляд

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (16)$$

Виходячи з електромеханічних аналогій, можемо так само записати адаптований на рухомі маси закон всесвітнього тяжіння Ньютона

$$\mathbf{F} = \gamma \frac{mM}{R^2} \left( 1 + \frac{v^2}{c^2} + 2 \frac{v}{c} \mathbf{v} \cdot \mathbf{r} \right) \mathbf{r}, \quad (17)$$

де  $m, M$  – гравітуючі маси. Закон (17) пройшов перевірку на релятивістських швидкостях в задачах динаміки небесної механіки. Зокрема, одержано формулу гравітаційного радіуса, яка збігається з одержаною на підставі метрики Шварцшильда в криволінійному Римановому просторі [5-6], а також просимульовано динаміку вільного гравітаційного падіння на колапсар GRO J0422+32/V518 Per.

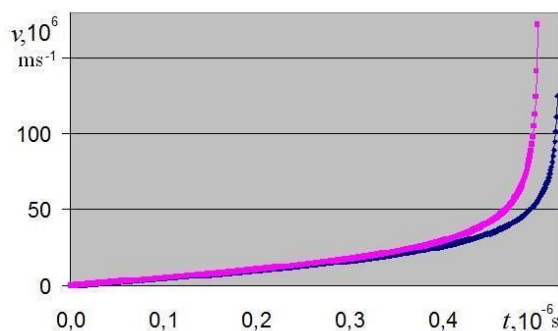
## 5. Приклад

Просимулюємо електромеханічний процес вільного притягання електрона в нерівномірному електричному полі наладованої кулі з радіусом  $r_e$  і позитивним зарядом  $Q$ ; електрон вважатимемо точковим. Нагадаємо, що електрон є матеріальною частинкою з негативним електричним ладунком, значення якого  $e = -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл. Маса електрона  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг. Решта параметрів:

$$Q = +3,16 \cdot 10^{-4} \text{ C}; \quad r_e = 0,10 \text{ m}; \quad k = 8,99 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}; \quad c = 2,99 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}.$$

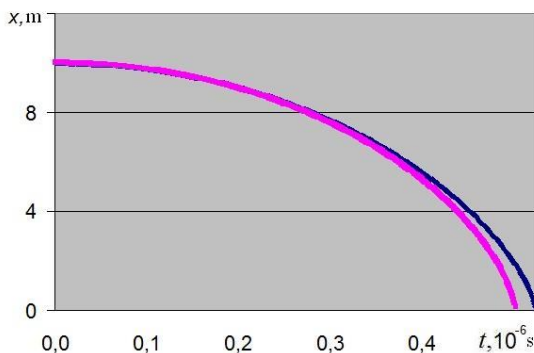
Початкові умови:  $v_0 = 0$ ;  $x_0 = 10$  м.

**Результати симуляції.** Результати сумісного інтегрування диференціальних рівнянь (8), (9) при вище заданих значеннях коефіцієнтів і початкових умов показані на рис. 1 і рис. 2. Задля якісної і кількісної оцінки прояву релятивістського ефекту на динаміку руху електрона в нерівномірному електричному полі наводяться дублюючі часові функції, одержані за класичним законом Кулона (1).



*Fig. 1. Часова залежність швидкості  $v = v(t)$ . За абсцисою подано час у мікросекундах, а за ординатою – швидкість у тисячах кілометрів. Вища крива – результат, одержаний за класичним законом Кулона, нижча крива – за адаптованим законом рухомих ладунків*

На підставі аналізу одержаних результатів можна кількісно оцінити висновок класичної електроніки про те, що «у звичайних електровакуумних приладах швидкість електронів не перевищує  $0,1 c$ , тому масу електрона можна вважати сталою». Якщо бути критичним до цих слів, то варто процитувати ще раз [2]: «Фізичне моделювання спростовує міф про ріст маси. Змінюються умови взаємодії самих мас, включно з відстанню між ними». Ми повністю розділяємо правоту сказаного, що переконливо доводить вираз (10). Бо тут аж ніяк релятивістський коефіцієнт (що в дужках) не загониш у ладунку рухомого тіла, як це зробили релятивісти з рухомою масою. Бо на перешкоді стоїть фундаментальний закон збереження ладунку! Аналіз цифрових даних рис. 1 показав, що на швидкості  $0,1 c$  у даній задачі маємо розходження швидкостей  $4600$  км/с, що становить відносну похибку  $16\%$ . Таку різницю похибку можна списати хіба що на специфічну нерівномірність електричного поля.



*Fig. 2. Часова залежність траєкторії руху  $x = x(t)$ . За абсцисою подано час у мікросекундах, а за ординатою – здоланий шлях у метрах. Нижча крива – результат, одержаний за класичним законом Кулона, вища крива – за адаптованим законом рухомих ладунків*

## 6. Конфлікт інтересів

The authors claim that there are no possible financial or other conflicts over the work.

## 7. Висновки

1. Адаптовано закон електричної взаємодії Кулона на випадок рухомих мас в діапазоні реально можливих швидкостей  $[0, c]$ . Адаптацію здійснено в обхід теорії відносності в реальному тривимірному просторі і фізичному часі. При цьому враховано скінченну швидкість пропагації електричного поля і закон збереження ладунку. Приводяться електромеханічні аналогії електричного і гравітаційного полів.
2. На підставі цієї адаптації просимульовано динаміку вільного руху електрона в нерівномірному електричному полі. Задля оцінки прояву релятивістського ефекту на динаміку руху електрона просимульовано дублюючі часові функції, одержані за класичним законом Кулона.

3. Одержані результати однозначно засвідчують забуту істину про те, що магнетне поле – це лише релятивістський ефект у електричному полі.
4. Суттєве спрощення аналізу динаміки руху наладованих тіл в електричному полі закладає перспективи нових можливостей метрології великих швидкостей.

## 8. Література

1. Пуанкаре А. О науке. – Москва: Наука, 1983, 560 с.
2. Каравашкин С. О кривизне пространства-времени. – Труды СЕЛФ, 2017, 8 с.  
[http://www.decoder.ru/list/all/topic\\_312/](http://www.decoder.ru/list/all/topic_312/).
3. Демирчян К. С. Движущийся заряд в четырехмерном пространстве по Максвеллу и Эйнштейну. – М.: "Ком-тех-Принт", 2008, 144 с.
4. Г. Ивченков. Силовое взаимодействие движущихся зарядов между собой и с полями «Релятивистский» закон Кулона. <http://new-idea.kulichki.net/pubfiles/151026192403.pdf>
5. Чабан В. «Нестандартні задачі електрики, механіки, філософії. – Л.: «Простір М», 2019. – 344 с.
6. Логунов А. А., Местриашвили М. А., Петров В. А. Как были открыты уравнения Гильберта-Эйнштейна?: Препринт ИФВЭ 2004-7. – Протвино, 2004. – 24 с.
7. R. F. Feynman., R. B. Leighton, M. Sands. *The Feinman lectures on Physics*. Massachusetts, Palo Alto, London, USA: Addison-Wesley publ. comp., inc. reading, 1964.