

УДК 538 (07)+372.853

**ВЛАСТИВОСТІ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ РІВНОМІРНО
РУХОМОЇ ЗАРЯДЖЕНОЇ ЧАСТИНКИ**

Коновал О.А.

Криворізький державний педагогічний університет

У статті запропонована методика навчання електродинаміки, яка оснований на значно меншому числі незалежних вихідних принципів (закон Кулона, принцип відносності і принцип суперпозиції). В основу покладено опис та аналіз взаємодії рухомих заряджених частинок.

***Ключові слова:** напруженість електричного поля, заряджені частинки, індукція магнітного поля.*

Ознайомлення студентів з методами наукових досліджень – одна з найважливіших вимог принципу науковості у навчанні фізики. Серед багатьох методів наукового пізнання вагоме місце займає метод моделювання.

Комп'ютерні моделі адекватно і невимушено легко вписуються в структуру різних методик навчання, дають змогу викладачу моделювати природні явища, створювати абстрактні моделі, які в процесі навчання електродинаміки описувались словесно, або в суто формальному вигляді.

Комп'ютерні моделі є також ефективним засобом активізації пізнавальної діяльності студентів, що відкриває перед викладачем широкі можливості щодо удосконалення навчально-виховного процесу.

Використання моделей з навчальною метою допомагає виділити і відобразити найважливіші для пізнання зв'язки в явищах, які часто бувають недоступними для безпосереднього спостереження, розкрити механізм протікання відповідних процесів, ознайомити студентів з експериментальною базою сучасної фізики.

Крім названих дидактичних можливостей метод моделювання може бути використаний також для самостійної роботи студентів при вивченні відповідних розділів фізики, і зокрема, електродинаміки. З допомогою комп'ютерних імітаційних моделей можна продемонструвати, а значить і уявити, в деяких межах, основні властивості об'єкту, що вивчається.

Нами запропонована методика навчання електродинаміки, яка оснований на значно меншому числі незалежних вихідних принципів (закон Кулона, принцип відносності і принцип суперпозиції), ніж у традиційній методиці [1, 3].

В основу покладено опис та аналіз взаємодії рухомих заряджених частинок (РЗЧ). Зокрема, магнітна взаємодія струмів розглядається як сумарний, інтегральний ефект взаємодії сукупності рухомих ЗЧ.

В рамках такого підходу одержанно ряд принципово нових науково-методичних результатів [2], вдається не тільки обґрунтувати основні положення електродинаміки і рівняння Максвелла, а і пояснити ряд явищ, які в інших методиках взагалі не обговорюються.

При цьому визначальну роль відіграють властивості електромагнітного поля (ЕМП) РЗЧ.

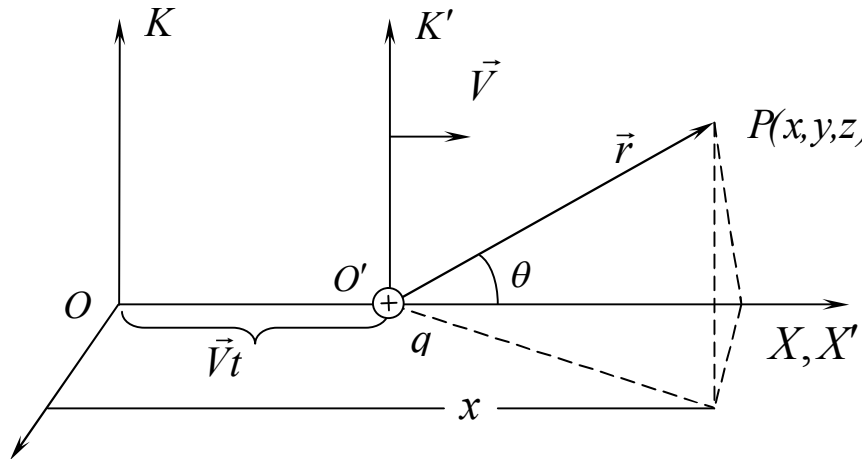
Використовуючи закон Кулона та положення спеціальної теорії відносності можна знайти електромагнітне поле рівномірно рухомої зарядженої частинки [10, 5, 4, 11, 1]:

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{q\vec{r}\left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)}{4\pi\epsilon_0 \left[(x-Vt)^2 + (y^2 + z^2) \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right) \right]^{3/2}} = f(\beta, \theta) \frac{q\vec{r}}{4\pi\epsilon_0 r^3}, \quad (1)$$

$$\vec{B} = \frac{1}{c^2} [\vec{V}, \vec{E}] = \epsilon_0 \mu_0 [\vec{V}, \vec{E}]$$

де $\vec{r} = (x - Vt) \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}$ – радіус-вектор, проведений від миттєвого положення ЗЧ до точки поля, r – це віддаль точки поля від миттєвого положення ЗЧ, а θ – кут між напрямком руху ЗЧ (вектором швидкості \vec{V} ЗЧ) та радіус-вектором проведеним із миттєвого

положення ЗЧ в дану точку простору (див. мал. 1), $f(\beta, \theta) = \frac{\left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)}{\left(1 - \frac{V^2}{c^2} \cdot \sin^2 \theta\right)^{3/2}}$.



Мал. 1. До ілюстрації виразу напруженості електричного поля РЗЧ (1)

В наявних навчально-методичних виданнях принципова відмінність між електричним полем рухомої ЗЧ і електричним полем нерухомої ЗЧ, не аналізується, більш того на неї не звертається увага. Такий підхід може призводити принаймі до помилок в розрахунках і некоректних висновків.

Для моделювання властивостей ЕМП рівномірно рухомої зарядженої частинки була використана мова програмування «TURBO PASCAL» [6].

Таким чином, згідно з (1) маємо:

1. Напруженість електричного поля рухомої ЗЧ залежить від напрямку знаходження точки поля (кута θ) та від швидкості руху ЗЧ.

Величина напруженості електричного поля ЗЧ, що рухається з довільною за величиною швидкістю V зменшується в напрямку руху й збільшується в площині перпендикулярній до \vec{V} .

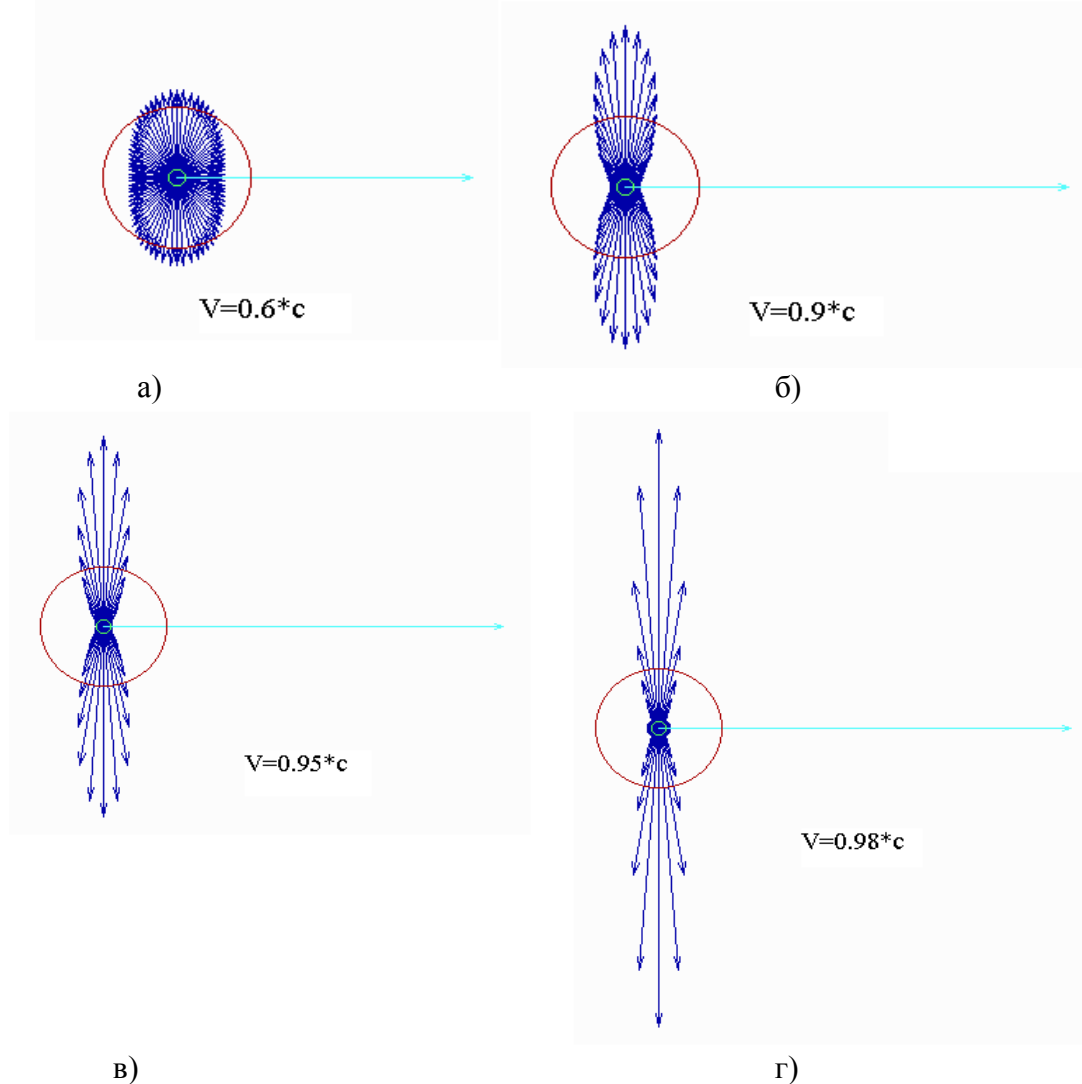
При релятивістських швидкостях напруженість електричного поля рухомого заряду на заданій відстані від нього мала за лінією руху ЗЧ та велика в перпендикулярному напрямку, тобто поле начебто сконцентровується поблизу площини, проведеної через миттєве положення ЗЧ перпендикулярно його швидкості.

У зв'язку з цим говорять, що електричне поле рухомої ЗЧ «сплющується» в напрямку руху.

2. Для кращого розуміння властивостей електромагнітного поля рівномірно рухомої ЗЧ нами була створена комп'ютерна програма, для моделювання та пояснення особливостей електромагнітного поля РЗЧ [1, 7, 8].

Дещо несподіваними виявилися результати моделювання електричного поля (ЕП) рухомої ЗЧ.

Картина ЕП, яку ми отримали (див. мал. 2) не описана в існуючих посібниках з електродинаміки. З тексту вказаних посібників випливає, що нібито електричне поле РЗЧ сплющується в напрямку руху таким же чином, як і еквіпотенціальні поверхні Хевісайда (див. наприклад, [9, с. 125; 10, с. 184]).



Мал. 2. Полярні діаграми напруженості електричного поля РЗЧ в площині XOY при різних значеннях швидкості руху ЗЧ

Комп'ютерне моделювання ЕП РЗЧ та дослідження функції (3)

$$f(\beta, \theta) = \frac{\left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)}{\left(1 - \frac{V^2}{c^2} \cdot \sin^2 \theta\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (3)$$

показало (мал. 3), що полярна діаграма напруженості ЕП РЗЧ при великих швидкостях руху частинки не має вигляду сплющеного еліпсоїда.

При $V \rightarrow c$ в області значення кутів $\theta \approx 0$ спостерігається ніби «перетяжка» (див. мал. 2) на полярній діаграмі напруженості електричного поля, і в площині XOY полярна діаграма має вигляд «вісімки» (мал. 2б, 2в, 2г).

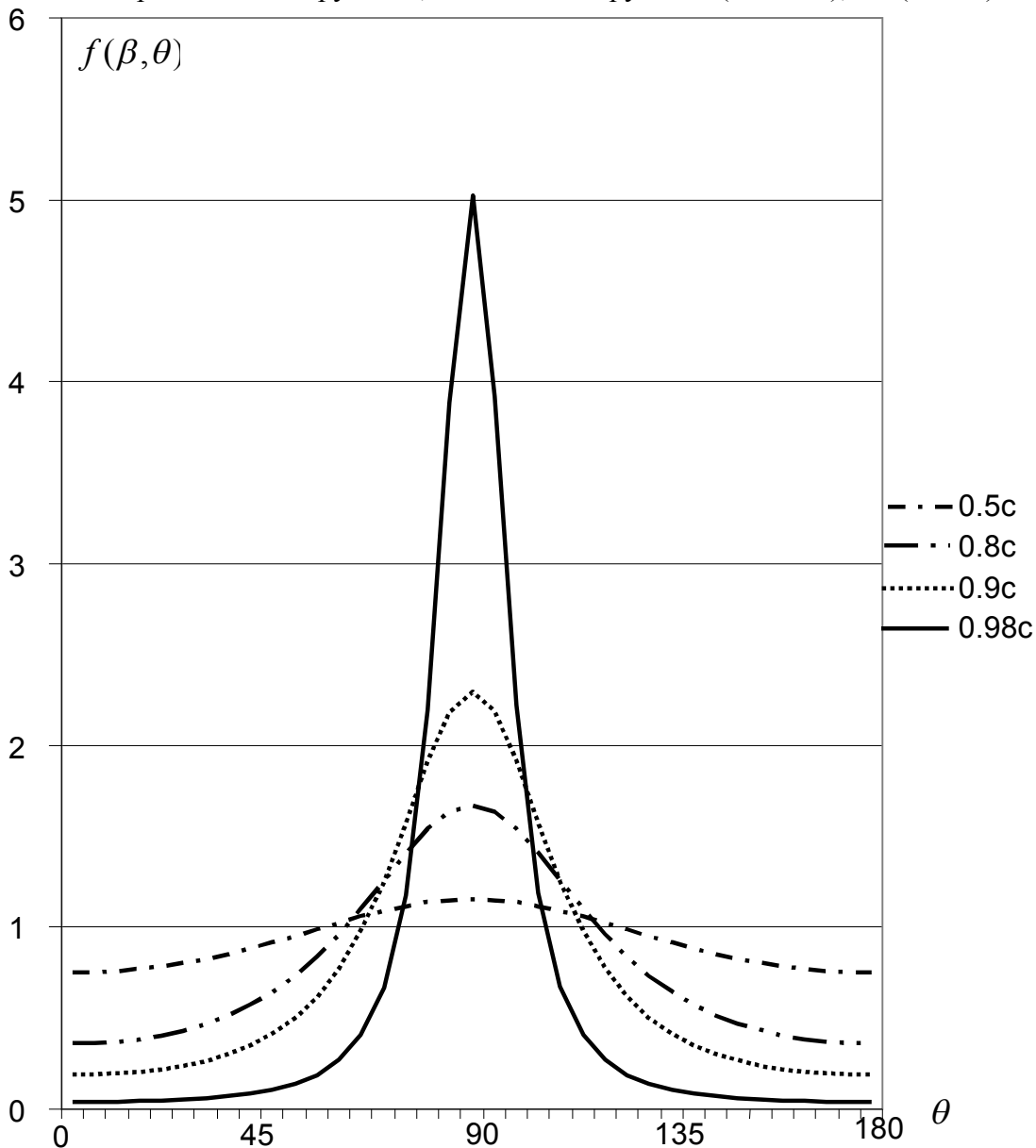
Таким чином, аналіз формули (1) та комп'ютерне моделювання ЕП РЗЧ показало, що «сплющування» електричного і магнітного полів в напрямку руху суттєво залежить від кута θ . А саме, при $\theta = 0$ та $V > 0,95c$ $E_{\parallel} \rightarrow 0$.

Іншими словами, в будь-якій площині, в якій знаходиться вісь OX величина вектора \vec{E} на полярній діаграмі утворює картину електричного поля, що нагадує «вісімку».

В навчально-методичній літературі відсутні коментарі з приводу такої картини ЕП РЗЧ.

Крім того в посібнику [11, с. 163–164] та деяких методичних статтях [12] картина поля, яка подана (зображена) з допомогою силових ліній не тільки невдало ілюструє властивості електричного поля та сплющення його в напрямку руху ЗЧ, а і є помилковою.

Картина електричного поля (1) в тривимірній моделі має вигляд, зображений на мал. 4, 5, 6. В центрі знаходиться заряджена частинка, а віддаль від центру до точок на моделі дорівнює, в певному масштабі, величині напруженості ЕП в точках простору рівновіддалених від миттєвого положення ЗЧ. Так, при $V = 0$ ми одержуємо модель, що відображає електричне поле нерухомої, або повільно рухомої ($V \ll c$), ЗЧ (мал. 4).



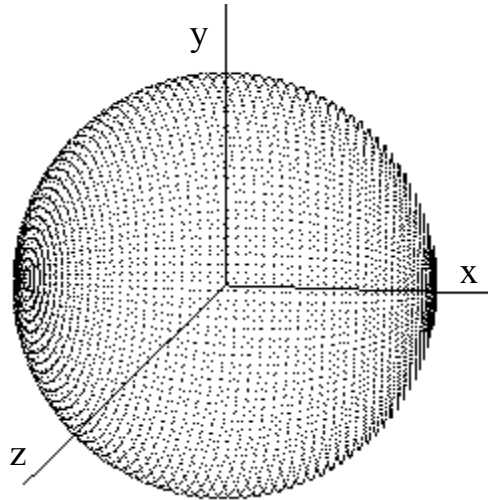
Мал. 3. Залежність функції $f(\beta, \theta) = \frac{(1 - V^2/c^2)}{(1 - \frac{V^2}{c^2} \cdot \sin^2 \theta)^{3/2}}$ від кута θ при різних значеннях

$$f(\beta, \theta) = \frac{(1 - V^2/c^2)}{(1 - \frac{V^2}{c^2} \cdot \sin^2 \theta)^{3/2}}$$

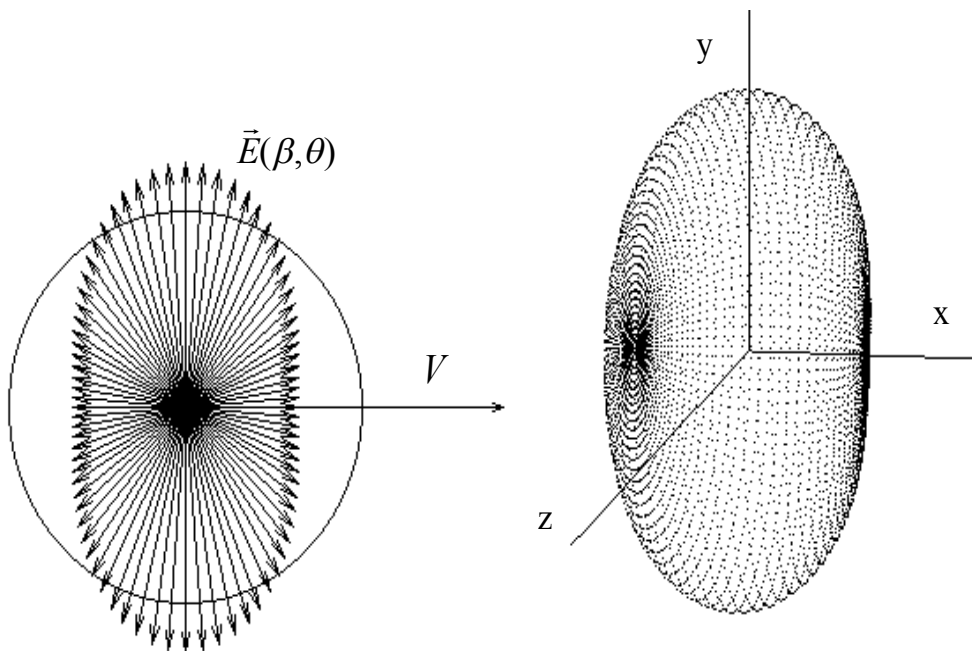
швидкості руху ЗЧ

З рисунку 4 видно, що вектори напруженості електричного поля на однаковій відстані від заряду однакові по величині. Але цей висновок справедливий тільки при малих швидкостях руху ЗЧ, або коли ЗЧ не рухома.

При збільшенні швидкості поле зарядженої частинки начебто сплющується в напрямку його руху. Це й спостерігається під час роботи програми, наприклад, $V = 0,6c$ (мал. 5). Зліва на мал. 5 зображена картина ЕП в площині XOY , справа – просторова картинка.



Мал. 4



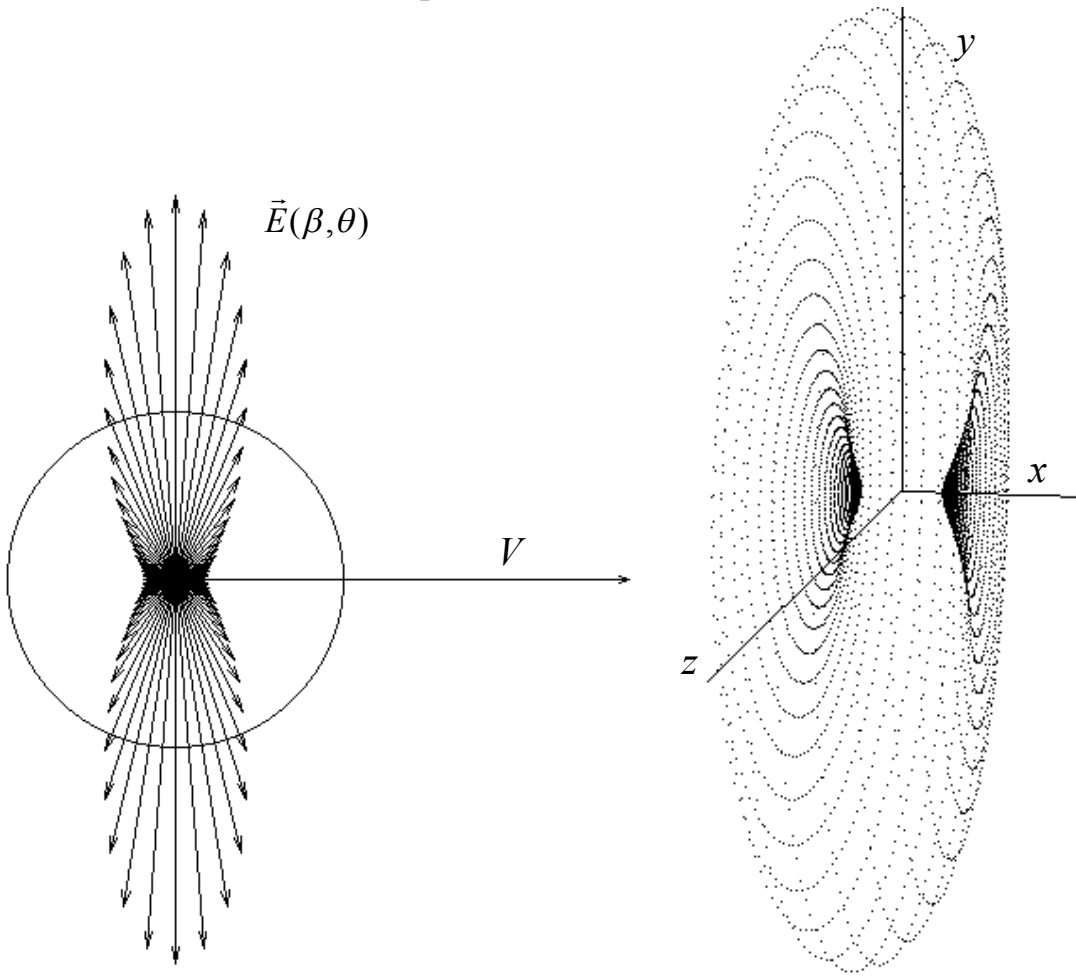
Мал. 5

При швидкості руху ЗЧ ($V=0,9c$) картина поля суттєво змінюється, мал. 6.

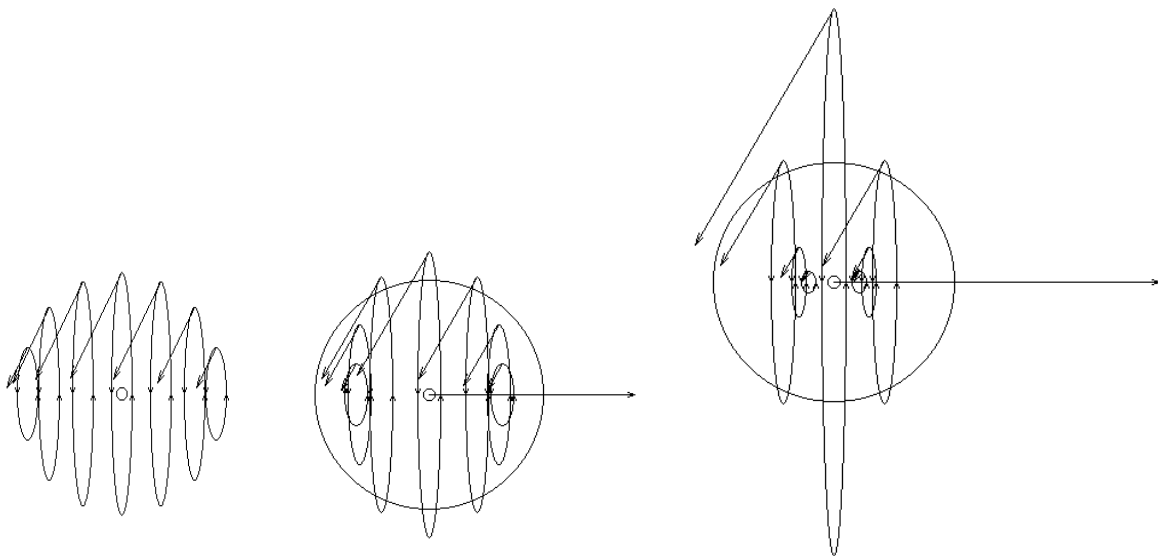
Згідно з (1), $\vec{B} = \frac{1}{c^2} [\vec{V}, \vec{E}]$, вектори напруженості електричного та індукції

магнітного полів взаємно перпендикулярні, крім того це ілюструють наступні рисунки, що відображають орієнтацію векторів \vec{E} та \vec{B} в даній моделі при швидкостях руху зарядженої частинки $V \ll c$, $V = 0,6c$ та $V = 0,9c$, відповідно, мал. 7.

Видно, що лінії \vec{B} утворюють концентричні кола з центром на вісі OX , вздовж якої рухається заряджена частинка q .



Мал. 6. Картина електричного поля РЗЧ при швидкості руху $V=0.9c$



Мал. 7. Залежність індукції магнітного поля $\vec{B}(\beta, \theta)$ РЗЧ від швидкості руху ЗЧ $\beta = \frac{V}{c}$ та кута спостереження θ

Окрім вище названих відзначимо такі властивості ЕП РЗЧ:

3. Електричне поле РЗЧ не є сферично-симетричним, хоча і характеризується значними симетріями, зокрема поле вектора \vec{E} дзеркально симетричне відносно відносно будь-якої площини, що проходить через вісь OX (див. результати моделювання електричного та електромагнітного поля РЗЧ).

4. Електричне поле рухомої ЗЧ є, взагалі кажучи, непотенціальним полем [1, 3, 4]:

$$\text{rot}\vec{E} \neq 0, \quad (2)$$

хоча можна вказати на безліч контурів в цьому полі, циркуляція вектора \vec{E} вздовж яких дорівнює нулю.

Так, наприклад, $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$.

а) вздовж будь-якого контуру, що лежить в площині YOZ і яка проходить через миттєве положення ЗЧ;

б) вздовж симетричного контуру, який, в свою чергу, симетрично розташований відносно площини YOZ , яка проходить через миттєве положення ЗЧ;

в) вздовж симетричного контуру, який симетрично й перпендикулярно розташований відносно будь-якої площини, що проходить через вісь OX (наприклад, вздовж симетричного контуру, що симетрично розташований відносно площини YOX).

Тобто, з одного боку, в будь-якій точці поля поза межами ЗЧ електричне поле є вихровим полем $\text{rot}\vec{E} \neq 0$, з іншого – являється потенціальним (якщо за критерій потенціальності поля брати $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$). Завдяки певній симетрії ЕП РЗЧ (мал. 2) можна

знайти форми замкнутих контурів, циркуляція $\oint_L \vec{E} d\vec{l}$ вздовж яких дорівнює нулю.

Але по суті своїй поле вектора \vec{E} рухомої ЗЧ є вихровим, оскільки, $-\text{rot}\vec{E}$ в довільній точці поля РЗЧ повністю визначається швидкістю зміни за часом вектора індукції магнітного поля РЗЧ $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ в цій же точці простору. Аналогічно може бути показано, що

$$\text{rot}\vec{H} \text{ породжується } \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$

У зв'язку з цим виникає, зокрема, питання, як може бути потенціальним електричне поле, яке утворене суперпозицією електричних полів сукупності рухомих ЗЧ (наприклад, електричне поле провідника з постійним струмом)?!

5. Конфігурація електромагнітного поля заряду, що рухається рівномірно та прямолінійно, з плином часу не змінюється, а змінюється лише положення цієї конфігурації відносно нерухомої системи координат K , тобто незмінна конфігурація поля рухається разом з ЗЧ.

Але якщо зафіксувати довільну точку простору, то в ній і напруженість електричного \vec{E} і індукція магнітного полів \vec{B} є функцією часу.

Висновки. Використовуючи комп'ютерну модель як засіб пізнання удається проілюструвати залежність напруженості електричного та індукції магнітного полів від швидкості руху зарядженої частинки та кута спостереження.

При цьому можна спостерігати, як змінюється вигляд ЕМП в цілому, порівняти величини полів при різних швидкостях руху та в різних напрямках по відношенню до напрямку швидкості руху ЗЧ [7].

Досвід використання наших імітаційних моделей в навчальному процесі показав, що вони виконують не лише пояснювальну функцію, а й сприяють кращому розумінню властивостей ЕМП РЗЧ та поглибленому вивченню особливостей ЕМП РЗЧ, реалізуючи таким чином принцип наочності в навчанні.

Відомо, що динамічні моделі більш повно передають інформацію про властивості об'єкту, і з психологічної точки зору краще запам'ятовуються, оскільки дію моделі можна розглядати і вивчати необхідну кількість раз, повертаючись до різних аспектів механізму, часового перебігу явища.

Як показав досвід використання цієї програми вона є легкою для сприйняття як студентами так і учнями.

Крім того, в результаті моделювання, нам вдалося вперше в науково-методичній літературі адекватно зобразити картину електричного поля РЗЧ і вказати на типові помилки в наочному уявленні цієї картини, які зустрічаються в науково-методичній літературі.

На нашу думку створені програми добре ілюструють основні властивості ЕМП РЗЧ і їх можна рекомендувати учням, студентам і викладачам фізики у навчальних закладах всіх рівнів.

В процесі вивчення електродинаміки за методикою, запропонованою нами, демонструється евристичне значення як уявного експерименту так і моделювання, оскільки при цьому одержуються нові науково-методичні результати, і які підтверджують тезу: «Під моделлю розуміють, таку мислено уявлювану, або матеріально реалізовану систему, яка, відображаючи чи відтворюючи об'єкт дослідження, здатна замінювати його так, що її вивчення дає нову інформацію про цей об'єкт» [13].

Одержані на цьому шляху результати сприяють розкриттю природи фізичних явищ (релятивістська природа магнітного поля, властивості електричного поля провідника з постійним струмом, знаходження єдиного принципу, що лежить в основі «правила потоку», фізичний механізм породження МП постійних струмів, уніполярна індукція, природа потенціальності СЕППС).

Досвід роботи з цими програмами в рамках методики навчання електродинаміки як релятивістської теорії та впровадження їх в навчальний процес у вищих педагогічних навчальних закладах показав їх ефективність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Коновал О. А. Теоретичні та методичні основи вивчення електродинаміки на засадах теорії відносності : монографія / О.А.Коновал ; Міністерство освіти і науки України ; Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг : Видавничий дім, 2009. – 346 с. : іл.
2. Коновал О. А. Теоретичні і методичні засади вивчення електродинаміки як релятивістської теорії у вищих педагогічних навчальних закладах : автореф. дис. ... д-ра пед. наук : 13.00.02 / О. А. Коновал ; НПУ ім. М. П. Драгоманова. – К. : 2010. – 45 с.
3. Коновал О. А. Теоретичні і методичні засади вивчення електродинаміки як релятивістської теорії у вищих педагогічних навчальних закладах : дис. ... д-ра пед. наук : 13.00.02 / О. А. Коновал ; НПУ ім. М. П. Драгоманова. – К. : 2010. – 488 с.
4. Коновал О. А. Основи електродинаміки : навч. посіб для студ. вищ. пед. навч. закл. / О. А. Коновал ; Міністерство освіти і науки України ; Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг : Видавничий дім, 2008. – 347 с. : іл.
5. Угаров В. А. Специальная теория относительности / В. А. Угаров. – М. : Наука, 1977. – 384 с.
6. Немнюгин С. А. Turbo Pascal / С. А. Немнюгин. – СПб. : Издательство «Питер», 2001. – 496 с. : ил.
7. Коновал О. А. Властивості і моделювання електромагнітного поля рухомої зарядженої частинки / О. А. Коновал, О. В. Швидкий // Матеріали ІХ Всеукраїнської наукової конференції «Фундаментальна та професійна підготовка фахівців з фізики» // уклад. : М. І. Шут, Т. Г. Січкач. – К. : НПУ, 2004. – С. 52.

8. Коновал О. А. Принцип відносності і електромагнітне поле рухомої зарядженої частинки / О. А. Коновал // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики : зб. наук. пр. – Вип. VI : у 3-х т. – Т. 2 : Теорія та методика навчання фізики. – Кривий Ріг : Вид. від. НМетАУ, 2006. – С. 258–262.
9. Ландау Л. Д. Теория поля / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1973. – 504 с.
10. Парселл Э. Электричество и магнетизм : учебное руководство : пер. с англ. / Э. Парселл ; под ред. А. И. Шальникова и А. О. Вайсенберга. – 3-е изд., испр. – М. : Наука, 1983. – 416 с. – (Берклиевский курс физики).
11. Коновал О. А. Відносність електричного і магнітного полів : монографічний навч. посіб. для студ. вищих навч. закладів / О. А. Коновал ; Міністерство освіти і науки України ; Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг : Видавничий дім, 2008. – 248 с. : іл.
12. Дідович М. М. Систематизація знань учнів при формуванні поняття електромагнітного поля / М. М. Дідович, С. М. Мощенко // Дидактичні проблеми фізичної освіти в Україні : матеріали наук.-практ. конф. – Чернігів : ЧДПУ Т. Г. Шевченка, 1998. – С. 53–57.
13. Бугайов О. І. Сучасний погляд на розвиток наочності навчання фізики / О. І. Бугайов // Вісник Чернігівського державного педагогічного університету ім. Т. Г. Шевченка : зб. наук. пр. – Серія «Педагогічні науки». – Вип. 9. – Чернігів : ЧДПУ, 2001. – С. 5–8.