

УДК 53.07

РОЗВИТОК УЯВЛЕНЬ ПРО «СТРУМ ЗМІЩЕННЯ»

ГРОХОЛЬСЬКИЙ
Я.М.

Канд. техн. наук, професор кафедри автоматичних систем управління Військового інституту телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв крут, Київ, Україна, e-mail: GGYM@ukr.net;

СУСЬ Б.А.

Д-р пед. наук, професор кафедри математики та фізики Військового інституту телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв крут, Київ, Україна, e-mail: bogdansus@gmail.com.

Мета роботи. В електротехніці, радіотехніці вживаються такі поняття як заряд, електричне поле, магнітне поле, електромагнітне поле, постійний електричний струм, змінний струм. Ці абстрактні поняття відображають певні реальні фізичні явища. Наприклад, струм розуміється як напрямлений рух електричних зарядів. Однак існує також умовно-абстрактне поняття «струм зміщення», яке було введено Максвеллом для пояснення проходження струму через ділянку конденсатора, де зарядів нема. Мета статті – розкрити предметний зміст цього терміну і пояснити реальний механізм проходження струму в електричному колі.

Методи дослідження. Аналіз явища на основі таких традиційних понять як заряд, електричне поле, магнітне поле, електромагнітне поле, постійний електричний струм, змінний струм. Аналіз суперечності між поняттям струму як напрямленого руху зарядів і поняттям «струм зміщення» як струм без зарядів. Теоретичне узгодження понять «струм зміщення» і струм як напрямлений рух зарядів.

Отримані результати. Показано, що для всіх ділянок замкненого електричного кола визначення струму як напрямленого руху зарядів справедливе тільки для постійного струму, коли дійсно заряди рухаються на всіх ділянках кола. У колі з конденсатором постійний струм не протікає, оскільки в проміжку між пластинами конденсатора зарядів нема. Однак протікає змінний струм, який виникає в момент замикання кола. На ділянці провідника при цьому виникає напрямлений рух зарядів і причиною руху є електричне поле, яке змінне і виникає разом зі змінним магнітним полем на всіх ділянках кола, в тому числі й на ділянці конденсатора, де зарядів нема. Показано, що взагалі поняття струму як напрямленого руху зарядів є правильним, але умовно-абстрактним, бо насправді першопричиною є те, що називається електромагнітним полем. Поняття струму зміщення є умовно-абстрактним вираженням електромагнітного поля.

Наукова новизна. Новизна полягає в тому, що з'являється можливість адекватно і неабстрактно розуміти процеси, які відбуваються в електричному колі при проходженні струму, що не струм створює електричне поле навколо провідника, по якому напрямлено рухаються заряди, а навпаки, змінне електричне поле призводить до руху заряди, які є на ділянках провідника.

Практична цінність. Розуміння реальної суті терміну дає можливість правильно оцінювати процеси, які відбуваються в електричному колі. Чи при під'єднанні джерела е.р.с. і замиканні кола рух зарядів відбувається поступово, чи настає відразу по всьому колу. Дає можливість розуміти, що відбувається, коли електроди конденсатора під'єднуються до джерела е.р.с. Чому електрони в провіднику приходять у напрямлений рух, яка природа сили, що діє на електрони.

Ключові слова. Електричне поле; електромагнітне поле; електричний заряд; постійний електричний струм; змінний струм; струм зміщення.

I. ВСТУП

У навчальному процесі важливе значення має термінологія і її відповідність уявленням та поняттям про реальні фізичні процеси. Однак існує багато термінів, які є умовними і реально не відображають фізичних процесів. Наприклад, звичними є такі умовні терміни як «імпульс», «електричний заряд», «електричне поле», «гравітаційне поле», «електричний струм». Слово «заряд» виражає готовність до певної дії. Наприклад, зарядити рушницю – це вставити патрон і підготувати її до пострілу. Електрично зарядити тіло – означає створити на ньому надлишок електронів чи протонів і таким чином підготувати до взаємо-

дії на відстані з іншим зарядженим тілом через електричні поля, які виникають навколо них. Можна зарядити акумулятор. А що таке «електричне поле»? Це теж щось умовне. У математиці термін «поле» є синонімом слова «розподіл». Наприклад, «поле векторів» означає «розподіл векторів» на площині чи у просторі. «Електричне поле» теж означає розподіл «чогось» навколо зарядженого тіла. Така умовність переноситься і на поняття «електричний струм». Електричним струмом називається напрямлений рух зарядів. Реально це рух електронів, які переносять заряд. Величина струму дорівнює кількості заряду q , який проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу: $I = q/t$. Заряди також можуть ру-

хатися під дією електричного поля в провіднику або під дією електричного поля, створеного зарядженим тілом. Наприклад, якщо зарядити два тіла, так щоб їх потенціали були різними, і сполучити провідником, то електрони будуть рухатися від тіла з меншим потенціалом в сторону тіла, потенціал якого більший. Цей струм буде зменшуватися і припиниться, коли потенціали зрівняються. Це змінний струм. Змінний електричний струм може виникати також у замкненому електричному колі в момент його замикання. Вважається, що у замкненому колі заряд проходить через поперечний переріз провідника на всіх його ділянках, так ніби він циркулює по всьому замкненому колу. Однак особлива ситуація виникає, коли в замкненому колі знаходиться конденсатор. В момент замикання такого електричного кола з'являється струм, який фіксується вимірвальним приладом. На ділянках провідника струм – це рух зарядів, але на ділянці конденсатора між його електродами існує розрив і там зарядів нема, отже рухатися вони не можуть. У зв'язку з цим виникає питання: а що таке струм, якщо напрямленого руху зарядів нема? Потрібне фізичне пояснення цієї проблеми.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Ознакою струму є магнітне поле навколо провідника. Це помітив ще Ерстед (1820 р.), тому традиційно вважається, що навколо струму створюється магнітне поле [1]-[5].

Такі уявлення про струм сформувались історично і формально відображають процеси, пов'язані з протіканням струму в електричному колі. Вони справедливі для струму, який протікає в провіднику. Однак трактування, що струм як напрямлений рух зарядів створює магнітне поле, не підходить для змінного струму, на що звернув увагу Максвелл, створюючи теорію електромагнітних хвиль [6]-[11].

Отже, існує проблема проходження струму у замкненому електричному колі на ділянці, де електричних зарядів нема. Якщо в електричному колі знаходиться конденсатор C , то фактично існує розрив електричного кола і струм як напрямлений рух зарядів протікати не може, тому що зарядів у проміжку між пластинами конденсатора нема і їх руху бути не може (рис. 1).

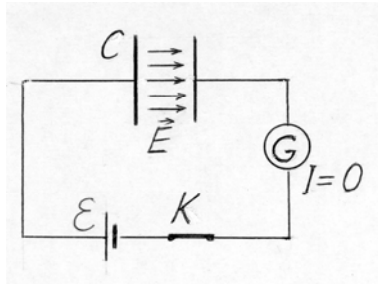


Рисунок 1. В електричному колі з конденсатором постійний струм не протікає

Так що в замкненому електричному колі з конденсатором постійний струм взагалі протікати не може. Однак при замиканні кола відбувається різке зростання і подальше швидке спадання струму (рис. 2).

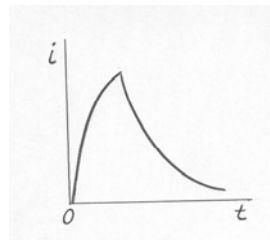


Рисунок 2. При замиканні кола відбувається різке зростання і спадання струму

Виходить, що в області, де зарядів нема, постійний струм протікати не може, а змінний струм – протікає. Тому необхідно з'ясувати, чому вважається, що струм іде по всьому замкненому колу, і навіть там, де заряди на ділянці конденсатора не переміщуються, тоді як за визначенням струм – це напрямлений рух зарядів. Як бачимо, щось не так або з визначенням струму як напрямленого руху зарядів, або з уявленням, що струм протікає по всьому колу.

Оскільки в конденсаторі напрямленого руху зарядів нема, то Максвеллу довелось ввести умовне абстрактне поняття «струм зміщення», яке він пов'язав зі змінним електричним полем, що виникає в момент замикання кола.

Саме такий термін використовується у сучасній науковій і навчальній літературі [12]-[16].

III. МЕТА РОБОТИ

Мета статті – розкрити предметний зміст терміну «струм зміщення» і пояснити реальний механізм проходження струму в електричному колі.

В електротехніці, радіотехніці вживаються такі поняття як заряд, електричне поле, магнітне поле, електромагнітне поле, постійний електричний струм, змінний струм. Ці абстрактні поняття відображають певні реальні фізичні явища. Наприклад, струм розуміється як напрямлений рух електричних зарядів [2].

Дещо складніше з умовним абстрактним поняттям «струм зміщення», введеним Максвеллом для пояснення проходження струму через ділянку конденсатора, де зарядів нема.

Розглянемо детальніше процеси, які відбуваються при замиканні електричного кола з конденсатором.

При замиканні кола від джерела е.р.с. ϵ до однієї з пластин конденсатора заряди притікають, а від другої – відтікають (рис. 3).

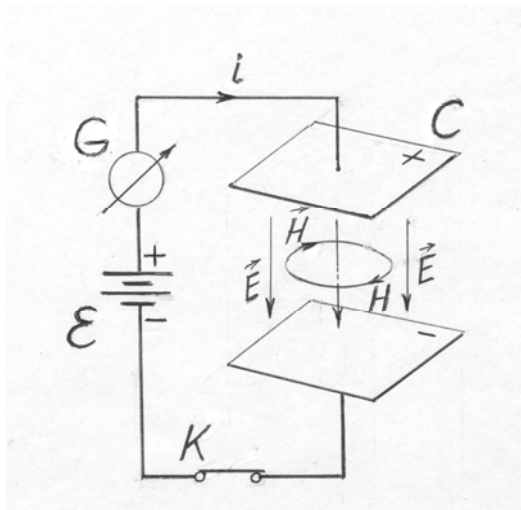


Рисунок 3. Представлення зміни електричного поля як «струму зміщення»

Тобто, відбувається зміщення зарядів стосовно пластин і «зарядка» конденсатора. Відбувається також відповідна зміна електричного поля \vec{E} в проміжку між пластинами.

В конденсаторі без діелектрика існує електричне поле напруженістю \vec{E} (чи електричне зміщення $\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 \vec{E}$). Напруженість електричного поля в конденсаторі виражається через поверхневу густину заряду σ на пластині: $E = \sigma / \varepsilon_0$.

Відповідно електричне зміщення $D = \sigma$ і заряд на пластині $q = \sigma S$. Сила струму зміщення

$$i_{zm} = \frac{dq}{dt} = S \frac{dD}{dt}.$$

Густина струму зміщення

$$j_{zm} = \frac{i_{zm}}{S} = \frac{dD}{dt}.$$

Як бачимо, поняття «струм зміщення» цілком умовне. Формально струм ніби протікає по всьому замкненому колу, але вважається, що на ділянці конденсатора струм – це не рух зарядів, а зміна електричного поля. Тому Максвелл умовно й назвав цю зміну «струмом зміщення». Виходить, що традиційне означення струму по суті не відображає механізму протікання струму. Таким чином, існує потреба конкретизувати фізичний зміст поняття «електричний струм» і механізм його протікання.

Отже, при замиканні кола з конденсатором з'являється електричний струм, який ніби тече по всьому замкненому колу. На ділянці провідника струм розглядається як напрямлений рух зарядів (рис. 1). Традиційно (ще з часів Ерстеда, 1820 р.) вважається, що ознакою електричного струму є магнітне поле, яке виникає навколо нього. Коли струм тече по провіднику, то є реальне переміщення зарядів (електронів) і існує зв'язок між напрямленим рухом зарядів і маг-

нітним полем навколо провідника. Можна уявляти, що магнітне поле створюється струмом зарядів, які рухаються напрямлено. Однак на ділянці конденсатора електронів нема, отже нема їх руху. Але магнітне поле як ознака струму на ділянці конденсатора існує. Тому логічно зробити висновок, що не струм як напрямлений рух зарядів створює магнітне поле, а навпаки – заряди рухаються тому, що є магнітне поле, яке існує на всіх ділянках кола, в тому числі й наділянці провідника. Важливо зауважити, що йдеться саме про змінне магнітне поле, яке виникає в момент замикання кола. Як бачимо, існує неузгодженість в логіці міркувань.

Тому потрібно з'ясувати, що ж є первинним у визначенні поняття струму як напрямленого руху зарядів? Струм, який створює магнітне поле, що є ознакою струму, чи магнітне поле якимось чином є причиною руху зарядів?

IV. ОБГОВОРЕННЯ

Відповідь знаходиться у рівняннях Максвелла, з яких випливає, що змінне магнітне поле існує одночасно зі змінним електричним полем. Це випливає з рівнянь Максвелла в інтегральному вигляді [9]:

$$\oint_1 \vec{H} d\vec{l} = \int_s \frac{d\vec{D}}{dt} d\vec{s} + \int_s \vec{j} d\vec{s},$$

$$\oint_1 \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \left(\int_s \vec{B} d\vec{s} \right),$$

$$\int_s \vec{B} d\vec{s} = 0,$$

$$\int_s \vec{D} d\vec{s} = q.$$

Або в диференціальному вигляді:

$$\frac{dH_x}{dy} - \frac{dH_y}{dz} = \frac{dD_x}{dt} + j_x,$$

$$\frac{dH_x}{dz} - \frac{dH_z}{dx} = \frac{dD_y}{dt} + j_y,$$

$$\frac{dH_y}{dx} - \frac{dH_x}{dy} = \frac{dD_z}{dt} + j_z,$$

$$\frac{dB_x}{dx} + \frac{dB_y}{dy} + \frac{dB_z}{dz} = 0.$$

$$\frac{dE_z}{dy} - \frac{dE_y}{dz} = -\frac{dB_x}{dt},$$

$$\frac{dE_x}{dz} - \frac{dE_z}{dx} = -\frac{dB_y}{dt},$$

$$\frac{dE_y}{dx} - \frac{dE_x}{dy} = -\frac{dB_z}{dt},$$

Тут E і H – напруженості, а D і B – індукції електричного і магнітного полів, які взаємно пов'язані

між собою [9].

А це значить, що при замиканні кола відбувається зростання магнітного поля і електричного поля. І ця зміна відбувається не тільки між пластинами конденсатора, але також на всіх ділянках провідника (рис. 3). Оскільки в провіднику є заряди, то вони й приходять у рух під дією електричного поля і створюють електричний струм провідності у його традиційному тлумаченні. На проміжку ж між пластинами конденсатора руху зарядів нема і струму провідності також нема, але є змінне електричне поле E і змінне магнітне поле H . Якщо розкрити пластини конденсатора, то в простір будуть випромінюватися електромагнітні хвилі (рис. 4).

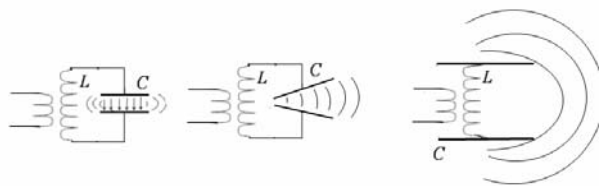


Рисунок 4. При розкритих пластинах конденсатора в простір випромінюються електромагнітні хвилі

Таким чином, насправді йдеться про виникнення електромагнітного поля як одночасного зростання чи спадання напруженостей електричного і магнітного полів, що й впливає з рівнянь Максвелла. Так що не рух зарядів є першопричиною магнітного поля навколо струму, а заряди в провіднику рухаються і створюють струм завдяки електричному полю E , що виникає разом з магнітним полем при замиканні електричного кола.

Виходить щось подібне до того, коли вважали, що Сонце обертається навколо Землі, а потім виявилось, що Земля обертається навколо своєї осі, а здається, що обертається Сонце. Тобто, термін «струм зміщення» є цілком умовним і абстрактним поняттям.

Зміна електричного і магнітного полів являє собою електромагнітну хвилю, яка поширюється в усі сторони від провідника, що реалізується в антені передавального радіотехнічного пристрою.

V. ВИСНОВКИ

Традиційно електричний струм розглядається як напрямлений рух зарядів і ознакою струму є магнітне поле, яке виникає навколо струму. Для замкненого кола таке визначення струму справедливе тільки для постійного струму, коли дійсно заряди рухаються на всіх ділянках кола. У колі з конденсатором постійний струм не протікає, оскільки в проміжку між пластинами конденсатора зарядів нема. Однак протікає змінний струм, який виникає при замиканні кола. На ділянці провідника причиною руху зарядів є електричне поле, яке змінне і виникає разом зі змінним магнітним полем на всіх ділянках кола, в тому числі й на

ділянці конденсатора, де зарядів нема. Так що взагалі поняття струму як напрямленого руху зарядів є правильним, але умовно-абстрактним, бо насправді першопричиною є те, що називається електромагнітним полем. Поняття струму зміщення також є умовно-абстрактним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Савельев И.В. Курс общей физики, т. 2 / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1978. – С.110.
- [2] Кингсеп А.С. Курс общей физики. Учебное пособие для вузов, т. 1. / А.С. Кингсеп, Г.Р. Локшин, О.А. Ольхов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – С. 244.
- [3] Бутиков Е.И. Оптика. / Е.И. Бутиков. – М. : Высшая школа. 1986. – 512 с.
- [4] Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия. 1983. – С. 507.
- [5] Hans C. Physics second edition, expandet. Hans C. Ohanian. Rensselaer politedinic institute. W.w.Norton & company / Hans C. New York. London. 1988. P. 971-972.
- [6] Алешкевич В.А. Курс общей физики. Оптика / В.А. Алешкевич – М. ФИЗМАТЛИТ. 2010. – С.7.
- [7] Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике/ Р. Фейнман , Р. Лейтон, М. Сендс. Т. 6. – М.: Мир. 1966. – С. 119.
- [8] Hans C. Physics second edition, expandet. Hans C. Ohanian. Rensselaer politedinic institute. W.w.Norton & company / Hans C. New York. London. 1988. P. 971-972.
- [9] Sus' B.A. Unusual interpretation of traditional physics problems. The third scientific-methodological edition / B.A. Sus', B.B. Sus', O.B. Kravchenko. – Kyiv: PC "Prosvita", 2012. – 121 pages.
- [10] Paul A. Tipler, Gene Moska. Physics for scientists and engineers. With modern physics. – W.H. Freeman and Company. New York. 2008. – P. 1029 с.
- [11] Roumond A. Serway, John W.Jewett. Physics for Scientists and Engineers. 2018. – P. 955.
- [12] Сивухин Д.В. Курс общей физики. Т. 3. Электричество / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1977. – С. 347. .
- [13] Калашников С.Г. Электричество / С.Г. Калашников . – М.: Наука, 1985. . – С. 285
- [14] Калигиевский Н.И. Волновая оптика / Н.И. Калигиевский – Москва: Высшая школа, 1978. – С. 11.
- [15] Карпов Я.С. Концепції сучасного природознавства /Я.С. Карпов, В.В. Кисельник, В.Г. Кремьень та ін. – Київ: Професіонал, 2004. – С. 171.
- [16] Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф Б.М. – М.: ГИФМЛ, 1963. – С.119.

Стаття надійшла до редакції 27.08.2020

DEVELOPMENT OF IDEAS ABOUT "BIAS CURRENT"

HROKHOLSKYI
J. M.

Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Automated Control Systems of the Professor of the Department of Automatic Control Systems of the Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes of Krut, Kiev, Ukraine, E-mail: GGYM@ukr.net;

SUS B. A.

Doctor of Pedagogical Sciences, Professor of the Department of Mathematics and Physics of the Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes of Krut Kiev, Ukraine, E-mail: bogdansus@gmail.com.

Purpose. In electrical engineering, radio engineering, such concepts as charge, electric field, magnetic field, electromagnetic field, direct electric current, alternating current are used. These abstract concepts reflect certain real physical phenomena. For example, current is understood as the directed movement of electric charges. However, there is also a conditionally abstract concept of "bias current", which was introduced by Maxwell to explain the passage of current through a section of capacitor where there are no charges. The purpose of the article is to reveal the substantive meaning of this term and to explain the real mechanism of current flow in an electric circuit.

Methodology. Analysis of the phenomenon is performed on the basis of such traditional concepts as charge, electric field, magnetic field, electromagnetic field, direct electric current, alternating current. Analysis of the contradiction between the concept of current as a directed movement of charges and the concept of "bias current" as a current without charges is presented. Theoretical coordination of the "bias current" concepts and current as a directed motion of charges is done.

Findings. It is shown that for all sections of a closed electric circuit, the definition of current as a directed movement of charges is valid only for direct current, when the charges are actually moving in all sections of the circuit. In the circuit with the capacitor, direct current does not flow, because there are no charges in the gap between the plates of the capacitor. However, alternating current occurs, at the moment when the circuit is closed. In the area of the conductor there is a directed movement of charges and the cause of the movement is an electric field, which is variable and occurs together with the alternating magnetic field in all parts of the circuit, including the part of the capacitor where there are no charges. It is shown that in general the concept of current as a directed motion of charges is correct, but conditionally abstract, because in fact the root cause is what is called an electromagnetic field. The concept of bias current is a conditionally abstract expression of the electromagnetic field.

Originality. The novelty is that it is possible to understand adequately and non-abstractly the processes that occur in an electric circuit during the passage of current, that no current creates an electric field around the conductor on which charges move, and vice versa, alternating electric field leads to charges, which are in the conductor areas.

Practical value. Understanding the real essence of the term makes it possible to assess correctly the processes occurring in the electrical circuit; gives the answer whether the movement of charges occurs gradually or immediately around the circle when connecting an e.r.s. and closing the circuit. This understanding gives you an idea of what happens when the capacitor electrodes are connected to an e.r.s. and why do the electrons in a conductor come in a directed motion, what is the nature of the force acting on the electrons.

Key words. Electric field; electromagnetic field; electric charge; direct electric current; alternating current; bias current.

РАЗВИТИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О «ТОКЕ СМЕЩЕНИЯ»

ГРОХОЛЬСКИЙ
Я.М.

Канд. техн. наук, профессор кафедры автоматических систем управления Военного института телекоммуникаций и информатизации им. Героев крут, Киев, Украина, e-mail: GGYM@ukr.net;

СУСЬ Б. А.

Д-р пед. наук, профессор кафедры математики и физики Военного института телекоммуникаций и информатизации им. Героев крут, Киев, Украина, e-mail: bogdansus@gmail.com.

Цель работы. В электротехнике, радиотехнике используются такие понятия как заряд, электрическое поле, магнитное поле, электромагнитное поле, постоянный электрический ток, переменный ток. Эти абстрактные понятия отражают определенные реальные физические явления. Например, ток понимается как направленное движение электрических зарядов. Однако существует также условно-абстрактное понятие «ток смещения», которое было введено Максвеллом для объяснения прохождения тока через участок

конденсатора, где зарядов нету. Цель статьи - раскрыть предметное содержание этого термина и объяснить реальный механизм прохождения тока в электрической цепи.

Методы исследования. Анализ явления на основе таких традиционных понятий как заряд, электрическое поле, магнитное поле, электромагнитное поле, постоянный электрический ток, переменный ток. Анализ противоречия между понятием тока как направленного движения зарядов и понятием «ток смещения» как ток без зарядов. Теоретическое согласование понятий «ток смещения» и ток как направленное движение зарядов.

Полученные результаты. Показано, что для всех участков замкнутого электрической цепи определения тока как направленного движения зарядов справедливо только для постоянного тока, когда действительно заряды движутся на всех участках цепи. В цепи с конденсатором постоянный ток не протекает, поскольку в промежутке между пластинами конденсатора зарядов нету. Однако протекает переменный ток, который возникает в момент замыкания цепи. На участке проводника при этом возникает направленное движение зарядов и причиной движения является электрическое поле, которое переменное и возникает вместе с переменным магнитным полем на всех участках цепи, в том числе и на участке конденсатора, где зарядов нету. Показано, что вообще понятие тока как направленного движения зарядов является правильным, но условно-абстрактным, потому что в действительности первопричиной является то, что называется электромагнитным полем. Понятие тока смещения является условно-абстрактным выражением электромагнитного поля

Научная новизна. Новизна заключается в том, что появляется возможность адекватно и неабстрактное понимать процессы, которые происходят в электрической цепи при прохождении тока, что не ток создает электрическое поле вокруг проводника, по которому направлено движутся заряды, а наоборот, переменное электрическое поле приводит в движение заряды, которые есть на участках проводника.

Практическая ценность. Понимание реальной сути термина дает возможность правильно оценивать процессы, которые происходят в электрической цепи. Или при подключении источника ЭДС и замыкании цепи движение зарядов происходит постепенно, или наступает сразу по всей окружности. Дает возможность понимать, что происходит, когда электроды конденсатора подсоединяются к источнику ЭДС. Почему электроны в проводнике приходят в направленное движение, какова природа силы, действующей на электроны.

Ключевые слова. Электрическое поле; электромагнитное поле; электрический заряд; постоянный электрический ток; переменный ток; ток смещения.

REFERENCES

- [1] Savel'ev, I.V. (1978). Kurs obshhej fiziki. Vol. 2, Moscow, Nauka, 110.
- [2] Kingsep, A.S., Lokshin, G.R., Ol'xov, O.A. (2007). Kurs obshhej fiziki. Uchebnoe posobie dlya vuzov, Vol. 1, Moscow, FIZMATLIT, 244.
- [3] Butikov, E.I. (1986). Optika. Moscow, Vysshaya shkola, 512.
- [4] Fizicheskij e'nciklopedicheskij slovar' (1983). Moscow, Sov. e'nciklopediya, 507.
- [5] Hans, C. (1988). Physics second edition, expandet. Rensselaer politedinic institute. W.w.Norton & company, New York, London, 971-972.
- [6] Aleshkevich, V.A. (2010). Kurs obshhej fiziki. Optika. Moscow, FIZMATLIT, 7.
- [7] Fejnman, R., Lejton, R., Sends, M. (1966) Fejnmanovskie lekciï po fizike. Vol. 6, Moscow, Mir, 119.
- [8] Hans, C. (1988). Physics second edition, expandet. Hans C. Ohanian. Rensselaer politedinic institute. W.w.Norton & company. New York, London, 971-972.
- [9] Sus', B.A., Sus', B.B., Kravchenko, O.B. (2012). Unusual interpretation of traditional physics problems. The third scientific-methodological edition. Kyiv, PC Prosvita, 121.
- [10] Paul, A. Tipler, (2008). Gene Moska. Physics for scientists and engineers. With modern physics. New York, 1029.
- [11] Roumond, A. Serway, John W. Jewett. (2018). Physics for Scientists and Engineers. 955.
- [12] Sivuxin, D.V. (1977). Kurs obshhej fiziki. T. 3. E'lek-trichestvo. Moscow, Nauka, 347.
- [13] Kalashnikov, S.G. (1985). E'lek-trichestvo. Moscow, Nauka, 285.
- [14] Kalitievskij, N.I. (1978). Volnovaya optika. Moscow, Vysshaya shkola, 11.
- [15] Karpov, Ya.S., Kisel'nik, V.V., Kremen', V.G. (2004). Konceptii suchasnogo prirodoz-navstva. Kyiv: Profesional, 171.
- [16] Yavorskij, B.M., Detlaf, A.A. (1963). Spravochnik po fizike. Moscow, GIFML, 119.