

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ РАЗДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

*Отримана формула для наближеного розрахунку часу виникнення надмірних електричних зарядів на кінцях (торцях) металевого провідника при явищі електромагнітній індукції.*

*Получена формула для приближенного расчета времени возникновения избыточных электрических зарядов на концах (торцах) металлического проводника при явлении электромагнитной индукции.*

### ВВЕДЕНИЕ

Открытое в 1831 году великим английским физиком Майклом Фарадеем (1791-1867 гг.) фундаментальное явление электромагнитной индукции (ЭМИ) в металлическом проводнике (электрическом контуре) [1, 2], несмотря на прошедшие фактически 180 лет с момента его открытия, требует своего дальнейшего теоретического изучения и развития. Это касается, прежде всего, углубления наших воззрений на физические микромеханизмы возникновения этого чрезвычайно важного для электротехники, электроэнергетики и в целом для земной цивилизации электрофизического явления в проводниках и электрических контурах (витках обмоток электрогенераторов и электродвигателей). В [3-5] автором были представлены определенные приближенные физико-технические подходы для нового описания возможных электрофизических микромеханизмов, приводящих к возникновению явления ЭМИ в движущемся (первый случай) в постоянном магнитном поле и неподвижном (второй случай) прямолинейном немагнитном круглом металлическом проводнике (электрическом контуре), испытывающем во втором случае воздействие внешнего переменного магнитного поля. В [6] автором в рамках работ по углублению наших представлений о явлении ЭМИ была получена формула для приближенного расчета толщины слоя индукционных (избыточных) отрицательных и положительных электрических зарядов на противоположных плоских концах (торцах) разомкнутого металлического проводника, сопровождающих проявление в нем (проводнике) ЭМИ. В настоящее время в теоретической электротехнике и электрофизике отсутствуют научно-технические данные по расчетной оценке при ЭМИ времени разделения  $t_D$  объемных электрических зарядов в твердотельной плазме металлического проводника и соответственно времени возникновения в нем явления ЭМИ.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПО ОЦЕНКЕ ВРЕМЕНИ РАЗДЕЛЕНИЯ И ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРИ ЭМИ ИНДУКЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ

Принимаем, что в твердом немагнитном материале незамкнутого прямолинейного круглого металлического проводника радиусом  $r_0$  и длиной  $l_0 \gg r_0$  (рис. 1) присутствуют нерелятивистские свободные электроны с электрическим зарядом  $e_0$ , имеющие усредненную по его макроскопическому объему концентрацию  $n_{e0}$  и подчиняющиеся квантовой статистике Ферми-Дирака [7]. С учетом этого положения тепловая скорость  $v_F$  хаотичного движения свободных электронов металлического проводника будет определяться их энергией Ферми  $W_F$ , зависящей от темпе-

ратуры  $T_0$  его материала и характерной для каждого вида (сорта) атомов кристаллической решетки металла проводника [7]. Примем, что до возникновения в рассматриваемом проводнике явления ЭМИ свободные электроны и ионы атомов его материала в первом приближении образовывали равновесную изотермическую низкотемпературную твердотельную плазму [8], для которой электронная и ионная температуры были равны друг другу и в ней имело место взаимная компенсация пространственных отрицательных зарядов свободных электронов и находящихся в узлах кристаллической решетки положительных зарядов ионов металла проводника. Пусть в исследуемом проводнике с плоскими круглыми концами (торцами) из-за проявления в его микроструктуре ЭМИ и возникновения вдоль него индукционного электрического поля с напряженностью  $E_0$  в его объеме произошло равновесное распределение и продольное смещение свободных электронов с их избыточной концентрацией на левом конце (торце) проводника и их уменьшенной (по сравнению с первоначальной до проявления в проводнике ЭМИ) концентрацией на правом конце (торце) разомкнутого на краях проводника.

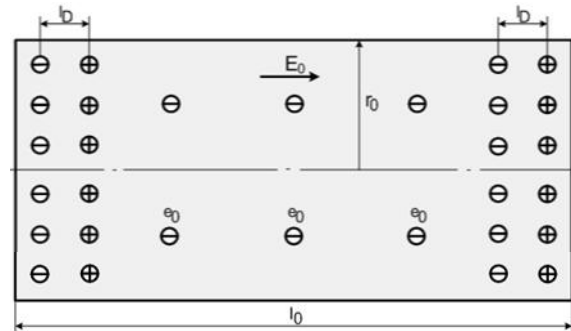


Рис. 1. Расчетная конструкция металлического проводника

Считаем, что нарушение электронейтральности твердотельной плазмы металлического проводника, состоящей из отрицательно заряженного "электронного газа" и ионизированных положительно заряженных атомов металла проводника, в его краевых зонах вызвано продольным смещением перпендикулярных продольной оси проводника плоских слоев свободных электронов его материала, приводящим к образованию в этих зонах плоских слоев отрицательного и положительного объемных зарядов, разделенных вакуумным зазором величиной  $l_D$  (см. рис. 1). Отметим, что в процессе такого продольного смещения в теле проводника его электронов проводимости изменения их концентрации (плотности) в остальной части объема проводника не наблюдается [3-5]. Избыточные заряды на концах (торцах) проводника обуславливают

появление на них соответственно отрицательного  $\phi_-$  и положительного  $\phi_+$  электрических потенциалов. В физике плазмы для описания процесса разделения электрических зарядов в объеме квазинейтральной плазмы были введены понятия пространственного и временного масштабов разделения ее отрицательных и положительных зарядов [8]. Используя эти понятия из физики плазмы и возникновение в силу проявления ЭМИ на левом конце рассматриваемого проводника индукционного избыточного отрицательного электронного заряда и на его правом конце индукционного избыточного положительного заряда, определим приближенным расчетным путем время разделения  $t_D$  и возникновения индукционных электрических зарядов на плоских концах (торцах) разомкнутого металлического проводника. Данный оценочный расчет выполним при допущении равномерного и однослойного распределения избыточных отрицательных и положительных электрических зарядов по плоским концам (торцам) металлического проводника, образующих в области его противоположных краев двойные электрические наноконденсаторные слои [6].

## 2. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ ЯВЛЕНИИ ЭМИ ВРЕМЕНИ РАЗДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ

Рассмотрим равновесное состояние свободных электронов на одном из концов (торцов) исследуемого проводника после нарушения на нем электронейтральности его "металлической" плазмы, вызванного внешним электромагнитным воздействием и проявлением из-за него в микроструктуре проводника ЭМИ. Для минимального времени  $t_D$  разделения электрических зарядов твердотельной плазмы в металлическом проводнике при ЭМИ и возникновения на его противоположных концах (торцах) плоских слоев избыточных отрицательных (электронных) и положительных (ионных) зарядов можно в приближенном виде записать следующее общее расчетное выражение:

$$t_D = l_D/v_e, \quad (1)$$

где  $l_D$  – расстояние между противоположно заряженными плоскими нанослоями на концах (торцах) проводника;  $v_e$  – усредненная скорость продольного смещения перпендикулярных продольной оси проводника плоских слоев свободных электронов его материала в зоне концов (торцов) проводника.

В соответствии с результатами работы [6] для величины расстояния  $l_D$  в (1) воспользуемся следующим приближенным расчетным соотношением:

$$l_D = [2\varepsilon_0 W_F / (e_0^2 n_{e0})]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $W_F = 0,6h^2(8m_e)^{-1}(3n_{e0}/\pi)^{2/3}$  – среднее значение энергии Ферми для свободного электрона;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя электрона;  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – электрический заряд электрона;  $n_{e0}$  – усредненная концентрация (объемная плотность) электронов проводимости в проводнике.

Для нахождения в (1) величины скорости  $v_e$  составим уравнение равновесия свободных электронов в двойном наноконденсаторном слое исследуемого края рассматриваемого проводника в следующем виде:

$$m_e a_e = e_0 E_e, \quad (3)$$

где  $E_e = W_F / (e_0 l_D)$  – напряженность сверхсильного

электрического поля между противоположно заряженными плоскими нанослоями на концах (торцах) проводника [6];  $a_e$  – продольное ускорение свободных электронов в зоне концов (торцов) проводника.

Из (3) для ускорения  $a_e$  электронов проводимости материала проводника в зоне его противоположных плоских концов (торцов) в процессе разделения в этих краевых областях материала проводника объемных электрических зарядов находим:

$$a_e = W_F / (m_e l_D). \quad (4)$$

С учетом (4) для искомой скорости  $v_e$  продольного смещения при ЭМИ свободных электронов в краевых областях противоположных концов (плоских торцов) рассматриваемого разомкнутого на краях металлического проводника приближенно получаем:

$$v_e = a_e t_D = W_F t_D / (m_e l_D). \quad (5)$$

Тогда после подстановки (2) и (5) в (1) и элементарных преобразований для величины минимального времени  $t_D$  разделения электрических зарядов и возникновения избыточных зарядов на плоских концах (торцах) металлического проводника, наступающего при явлении ЭМИ, в принятом приближении имеем:

$$t_D = [2\varepsilon_0 m_e / (e_0^2 n_{e0})]^{1/2}. \quad (6)$$

Для входящей в (6) величины усредненной объемной плотности (концентрации)  $n_{e0}$  свободных электронов в исследуемом проводнике с валентностью  $k_e$  его металла (химического элемента) можно записать следующее известное расчетное выражение [2, 9]:

$$n_{e0} = k_e d_e (M_a \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27})^{-1}, \quad (7)$$

где  $d_e$  – плотность материала проводника;  $M_a$  – атомная масса материала проводника, определяемая согласно количественным данным периодической системы химических элементов Менделеева.

## 3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ РАЗДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ

Выполним по (6) численную оценку минимального времени  $t_D$  разделения и появления индукционных (избыточных) отрицательных и положительных электрических зарядов на концах (плоских торцах) прямолинейного медного проводника при  $r_0 = 1$  мм,  $l_0 = 1$  м и температуре окружающей его воздушной среды, равной температуре материала проводника  $T_0 = 0$  °С. Примем, что явление ЭМИ в разомкнутом на краях проводнике, находящемся в атмосферном воздухе, обусловлено его движением в сильном постоянном магнитном поле с индукцией в 1 Тл [3, 4]. Для нашего расчетного случая из (7) находим, что при  $k_e = 2$ ,  $d_e = 8900$  кг/м<sup>3</sup> и  $M_a = 63,54$  [2] для твердого медного проводника усредненная объемная плотность в нем электронов проводимости при  $T_0 = 0$  °С оказывается равной около  $n_{e0} = 16,86 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup>. В результате из (6) получаем, что в рассматриваемом случае величина минимального времени разделения  $t_D$  и возникновения объемных индукционных электрических зарядов разной полярности на противоположных концах (плоских торцах) медного проводника составит численное значение, равное примерно  $0,61 \cdot 10^{-16}$  с. Для сравнения найденной крайне малой расчетной величины  $t_D$  с известными в атомной физике временными характеристиками отметим, что при  $T_0 = 0$  °С время релаксации  $\tau_e$  свободного электрона (среднее время свободного пробега электрона между двумя последовательными актами его столкновения с ионизирован-

ными атомами кристаллической решетки металла) в меди составляет около  $5,3 \cdot 10^{-14}$  с [10]. Из (2) для усредненного значения энергии Ферми  $W_F$  применительно к свободным электронам медного проводника при  $n_{e0} = 16,86 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup> следует, что  $W_F = 10,69 \cdot 10^{-19}$  Дж [6]. При данном значении энергии Ферми  $W_F$  величина расстояния  $l_D$  между наноконденсаторными слоями на концах (плоских торцах) медного проводника в режиме проявления в нем явления ЭМИ оказывается равной около  $0,66 \cdot 10^{-10}$  м [6]. Тогда с помощью (4) получаем, что при ЭМИ ускорение  $a_e$  свободных электронов в рассматриваемых краевых областях медного проводника может принимать огромное численное значение, составляющее примерно  $1,77 \cdot 10^{22}$  м/с<sup>2</sup>. При таком значении ускорения  $a_e$  и при  $t_D = 0,61 \cdot 10^{-16}$  с согласно (5) усредненная скорость  $v_e$  продольного смещения электронов проводимости в зоне противоположных концов (плоских торцов) исследуемого медного проводника может составить около  $1,08 \cdot 10^6$  м/с. Полученное приближенным расчетным путем значение скорости  $v_e$  продольного смещения плоских слоев свободных электронов в медном проводнике оказывается меньше значения тепловой скорости  $v_F$  хаотичного движения при  $T_0 = 0$  °С свободных электронов в меди, определяемой их энергией Ферми  $W_F$  и численно составляющей  $v_F = (2W_F/m_e)^{1/2} = 1,53 \cdot 10^6$  м/с. Полученные оценочные численные результаты для величин  $t_D < \tau_e$  и  $v_e < v_F$  могут косвенно указывать на работоспособность предложенного здесь приближенного физико-технического подхода для изучения электрофизических процессов в микроструктуре металлического проводника, испытывающего проявление ЭМИ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для дальнейшего изучения электрофизических микропроцессов в твердых металлических проводниках (электрических контурах), содержащих твердотельную плазму и испытывающих проявление ЭМИ, на основе известных положений физики плазмы предложен упрощенный физико-технический подход, который позволяет расширить и углубить наши представления о явлении ЭМИ в проводящих средах.

2. На основании предложенного подхода получена формула (6) для приближенного расчета минимального времени  $t_D$  разделения и возникновения объемных индукционных электрических зарядов на противоположных концах (плоских торцах) металлического проводника, испытывающего действие ЭМИ.

3. Выполненная по формуле (6) расчетная численная оценка минимального времени  $t_D$  разделения и появления индукционных отрицательных и положительных электрических зарядов на краях (плоских торцах) разомкнутого медного проводника показала, что оно оказывается существенно меньше времени релаксации  $\tau_e$  для свободного электрона в меди.

4. Расчетная численная оценка усредненной скорости  $v_e$  продольного смещения при ЭМИ плоских слоев свободных электронов в зонах двойных электрических нанослоев на противоположных концах (плоских торцах) медного проводника свидетельствует о том, что она меньше тепловой скорости  $v_F$  их хаотичного движения, определяемой энергией Ферми  $W_F$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Майкл Фарадей и его научные заслуги перед человечеством // Электротехника і електромеханіка. – 2009. – № 6. – С. 3-12.
2. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
3. Баранов М.И. Новый электрофизический подход по теоретическому обоснованию явления электромагнитной индукции Фарадея в движущемся металлическом проводнике // Электротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 1. – С. 24-28.
4. Баранов М.И. Электрофизический микромеханизм явления электромагнитной индукции в движущемся металлическом проводнике // Электричество. – 2010. – № 11. – С. 69-75.
5. Баранов М.И. Новый электрофизический подход по теоретическому обоснованию явления электромагнитной индукции Фарадея в неподвижном металлическом проводнике // Электротехніка і електромеханіка. – 2010. – № 4. – С. 32-36.
6. Баранов М.И. Расчетная оценка толщины слоя индукционных электрических зарядов в металлическом проводнике // Электротехніка і електромеханіка. – 2011. – № 4. – С. 55-57.
7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
8. Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. – М.: Атомиздат, 1977. – 384 с.
9. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2009. – 384 с.
10. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Baranov M.I. Majkl Faradej i ego nauchnye zaslugi pered chelovechestvom // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2009. – № 6. – S. 3-12. 2. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 s. 3. Baranov M.I. Novyj `elektrofizicheskij podhod po teoreticheskomu obosnovaniyu yavleniya `elektromagnitnoj indukcii Faradeya v dvizhushchemsya metallicheskom provodnike // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2010. – № 1. – S. 24-28. 4. Baranov M.I. `Elektrofizicheskij mikromehanizm yavleniya `elektromagnitnoj indukcii v dvizhushchemsya metallicheskom provodnike // `Elektrichestvo. – 2010. – № 11. – S. 69-75. 5. Baranov M.I. Novyj `elektrofizicheskij podhod po teoreticheskomu obosnovaniyu yavleniya `elektromagnitnoj indukcii Faradeya v nepodvizhnom metallicheskom provodnike // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2010. – № 4. – S. 32-36. 6. Baranov M.I. Raschetnaya ocenka tolschiny sloya indukcionnyh `elektricheskikh zaryadov v metallicheskom provodnike // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2011. – № 4. – S. 55-57. 7. Yavorskij B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike. – M.: Nauka, 1990. – 624 s. 8. Golant V.E., Zhilinskij A.P., Saharov I.E. Osnovy fiziki plazmy. – M.: Atomizdat, 1977. – 384 s. 9. Baranov M.I. Izbrannye voprosy `elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya `elektrofizicheskikh `effektov i zadach. – Har'kov: Izd-vo NTU "HPI", 2009. – 384 s. 10. Knopfel' G. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polya. – M.: Mir, 1972. – 391 s.

Поступила 23.02.2011

Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.  
НИПКИ "Молния"  
Национального технического университета  
"Харьковский политехнический институт"  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47  
тел. (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua

Baranov M.I.

#### Estimation of electric charge separation time in a metallic conductor under electromagnetic induction.

A formula is obtained for approximate calculation of excess electric charges generation time at the ends (butt ends) of a metallic conductor under action of electromagnetic induction.

**Key words** – metallic conductor, electromagnetic induction, excess electric charges, charge separation time.