

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СМЕЩЕНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛНОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПАКЕТА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ С ПЕРЕМЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ ПРОВОДИМОСТИ

Баранов М.И., д.т.н., с.н.с.

НИПКИ "Молния" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61013, Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ"

тел. (057) 707-68-41, факс (057) 707-61-33, E-mail: eft@kpi.kharkov.ua

*На основі положень квантової фізики і класичної електродинаміки запропоноване наближене співвідношення для розрахункової оцінки подовжнього зміщення в часі електронних напівхвиль де Бройля в тонкому металевому провіднику з перемінним або двополярним імпульсним електричним струмом провідності.*

*На основе положений квантовой физики и классической электродинамики предложено приближенное соотношение для расчетной оценки продольного смещения во времени электронных полувольт де Бройля в тонком металлическом проводнике с переменным или двуполярным импульсным электрическим током проводимости.*

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на весьма высокий уровень развития в настоящее время теоретической электротехники и электрофизики, квантовой физики и механики [1-3], вопросы теоретического описания микропроцессов на атомарном (электронном) уровне в материале металлических проводников, по которым протекает электрический ток проводимости различных амплитудно-временных параметров (АВП), не нашли на сегодня у специалистов из указанных областей знаний должного внимания и глубокой научной разработки.

В [4-8] автором были представлены определенные теоретические результаты по оригинальному применению квантовомеханического подхода к изучению процессов формирования и распределения униполярного электрического тока проводимости в тонком металлическом проводнике. Для дальнейшего исследования электромагнитных и тепловых процессов внутри материала таких проводников с электрическим током проводимости, обусловленным возникновением в нем стоячих электронных "дебройлевских" полувольт, описываемых соответствующим дискретным набором волновых  $\psi$  – функций, требуется знать величину продольного смещения указанных электронных полувольт в случае изменения протекающего по проводнику тока проводимости по амплитуде и направлению протекания с течением времени.

Целью статьи является приближенная расчетная оценка продольного смещения во времени электронных полувольт де Бройля, возникающих в металлическом проводнике с переменным или двуполярным импульсным электрическим током проводимости различных АВП.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пусть по тонкому сплошному круглому однородному металлическому проводнику цилиндрической формы радиусом  $r_{\Pi}$  и длиной  $l_{\Pi}$  вдоль его продольной оси  $OZ$  протекает известный из классической физики переменный или двуполярный импульсный электрический ток проводимости  $i_{\Pi}(t)$  с произвольными АВП, равномерно распределенный с плотностью  $\delta_{\Pi}(t)$  по его поперечному сечению  $S_{\Pi} = \pi r_{\Pi}^2$

(рис.). Примем, что выполняется условие вида  $l_{\Pi} \gg r_{\Pi}$ , а неподвижный изотропный проводник размещен в изоляционной газовой (конденсированной) среде при комнатной температуре, равной  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ . Считаем, что в исследуемом проводнике поведение в межатомном пространстве его материала свободных электронов, характеризующихся корпускулярно-волновым дуализмом, приближенно подчиняется одномерному временному волновому уравнению Шредингера и описывается на его основании соответствующими стоячими электронными полуволнами – собственными волновыми  $\psi$  – функциями [4, 8]. Данные волновые  $\psi$  – функции, как известно, определяют в металлическом проводнике пространственно-временную эволюцию и закономерности продольного распределения свободных электронов и формируют волновой электронный пакет (ВЭП) проводника с электрическим током проводимости [5, 8].

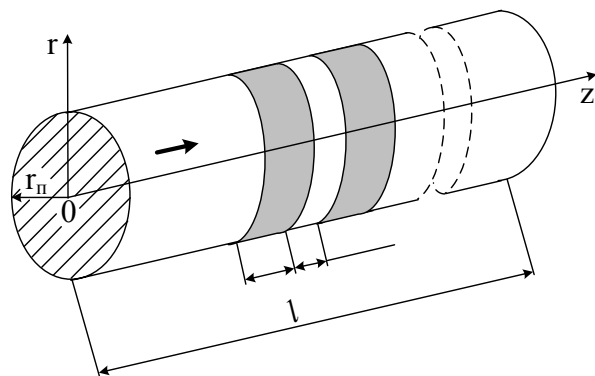


Рис. Расчетная модель проводника с переменным электрическим током проводимости  $i_{\Pi}(t)$

ВЭП рассматриваемого проводника (квантованный дискретный набор собственных волновых  $\psi$  – функций проводника) макроскопически распределяется вдоль его продольной оси  $OZ$  в периодическую структуру, шаг которой равен сумме ширин относительно "горячего"  $\Delta z_{\Gamma}$  и "холодного"  $\Delta z_{\chi}$  продольных участков проводника [5, 7] (см. рис.). Экспериментально подтвержденные формулы для расчета

величин  $\Delta z_{\Gamma}$  и  $\Delta z_{\chi}$  автором приведены в [7, 9]. Исходя из [4, 8] и известных положений квантовой физики и механики, считаем, что свободные электроны в межатомном пространстве материала исследуемого металлического проводника распределяются в его продольном направлении в соответствии с числовой последовательностью изменения целого квантового числа  $n=1,2,3,\dots$  электронных полувольт де Бройля и подчиняются квантовой статистике Ферми–Дирака [10, 11]. Требуется на основе положений классической электродинамики и квантовой физики определить продольное смещение  $\Delta z_{ЭПВ}$  во времени  $t$  электронных полувольт де Бройля в металлическом проводнике с переменным (двуполярным импульсным) электрическим током проводимости  $i_{\Pi}(t)$ .

## 2. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД ПО ОЦЕНКЕ ПРОДОЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ В ПРОВОДНИКЕ

Согласно [4, 8] на длине  $l_{\Pi}$  исследуемого проводника с электрическим током проводимости  $i_{\Pi}(t)$  всегда умещается целое квантовое число  $n=1,2,3,\dots$  стоячих электронных полувольт де Бройля, длина которых удовлетворяет следующему квантовому соотношению:

$$\lambda_{en}/2 = l_{\Pi}/n, \quad (1)$$

где  $\lambda_{en} = h/m_e v_{en}$  – квантованная длина волны свободного электрона в материале проводника, равная длине соответствующей стоячей электронной волны де Бройля для рассматриваемой элементарной частицы с полуцельным спином – фермиона;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$  кг – масса покоя свободного электрона;  $v_{en} = nh/2m_e l_{\Pi}$  – квантованная скорость упорядоченного движения (дрейфа) свободного электрона в материале проводника.

Причем, на ширине каждой электронной полуволны  $\lambda_{en}/2$  де Бройля в металлическом проводнике с электрическим током проводимости  $i_{\Pi}(t)$  умещается один относительно "горячий" шириной  $\Delta z_{\Gamma}$  и один относительно "холодный" шириной  $\Delta z_{\chi}$  продольный участок ВЭП проводника [7, 9]. Следует напомнить читателю тот факт, что в рассматриваемом проводнике каждый свободный электрон характеризуется двумя скоростями [8, 10]: *во-первых*, тепловой (хаотичной) и не имеющей преимущественного направления скоростью  $v_{eT} = (2W_F/m_e)^{1/2}$ , где  $W_F$  – энергия Ферми (например, для стального проводника, примененного в [12] при исследовании "горячих" и "холодных" участков ВЭП проводника с постоянным электрическим током проводимости большой плотности, усредненное значение энергии Ферми примерно составляет  $W_F = 10,67 \cdot 10^{-19}$  Дж [10]), которая для стального проводника принимает большое численное значение, составляющее примерно  $v_{eT} = 1,53 \cdot 10^6$  м/с; *во-вторых*, дрейфовой квантованной и направленной строго вдоль проводника скоростью  $v_{en}$ , обусловленной приложен-

ным к проводнику переменным электрическим напряжением  $U_{\Pi}(t)$ , вызывающим возникновение внутри материала проводника продольного электрического поля напряженностью  $E_{\Pi}(t) = U_{\Pi}(t)/l_{\Pi}$  и соответственно появление электродинамической силы  $F_e = e_0 \cdot E_{\Pi}(t)$ , действующей на элементарный отрицательный электрический заряд электрона, равный  $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл, и заставляющей его перемещаться вдоль вектора напряженности электрического поля  $E_{\Pi}(t)$ , и соответственно принимающей для указанного стального проводника даже в области сильноточной импульсной техники (при  $\delta_{\Pi}(t)$  порядка  $10^{10}$  А/м<sup>2</sup>) незначительное усредненное численное значение, составляющее в рассматриваемом случае не более  $v_{en} \leq 0,37$  м/с [13]. Видно, что  $v_{en} \ll v_{eT}$ . Поэтому и приобретенная свободным электроном за счет ускорения в продольном электрическом поле проводника дополнительная усредненная кинетическая энергия  $W_{eK}$  будет ничтожно мала по сравнению с его энергией Ферми  $W_F$ , то есть  $W_{eK} \ll W_F$ . В этой связи можно заключить, что в металлическом проводнике с электрическим током проводимости произвольных АВП максимальное значение энергии свободного электрона в случае незначительных изменений первоначальной температуры  $\theta_0$  его материала и отсутствия поступления извне внутрь проводника внешних интенсивных квантов энергии излучения будет практически равно энергии Ферми  $W_F$ .

В нашем случае для приближенной оценки продольного смещения  $\Delta z_{ЭПВ}$  во времени электронных полувольт де Бройля (периодической структуры ВЭП проводника) с учетом положений классической электронной теории электропроводности металлов [10] целесообразно воспользоваться средней дрейфовой скоростью  $v_D$  свободного электрона в металлическом проводнике, равной [13, 14]:

$$v_D = \delta_{\Pi}(t) / e_0 \cdot n_{e0}, \quad (2)$$

где  $n_{e0}$  – усредненная плотность свободных электронов в материале проводника (м<sup>-3</sup>) до воздействия на него напряжения  $U_{\Pi}(t)$  и соответственно протекания в нем электрического тока проводимости  $i_{\Pi}(t)$ .

Как известно, усредненная плотность  $n_{e0}$  свободных электронов в металлическом проводнике равна концентрации его атомов  $N_0$  (м<sup>-3</sup>), умноженной на валентность материала проводника, определяемую числом неспаренных электронов на внешних валентных энергетических уровнях атомов материала исследуемого проводника (например, для стального проводника валентность примерно равна двум [15]). Кроме того, для расчетной оценки концентрации атомов  $N_0$  в металлическом проводнике с плотностью его материала  $d_{\Pi}$  (кг/м<sup>3</sup>) можно воспользоваться следующим известным соотношением [16]:

$$N_0 = d_{\Pi} (M_a \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27})^{-1}, \quad (3)$$

где  $M_a$  – атомная масса материала проводника (например, для стального проводника  $M_a = 55,85$  [15]), практически равная массовому числу  $A$  ядра атома металлического проводника, определяемому в соответствии с периодической системой химических элементов Менделеева (одна атомная единица массы равна 1/12 массы атома изотопа углерода  $^{12}_6C$ , численно составляющей  $1,6606 \cdot 10^{-27}$  кг).

Тогда, при изменении во времени  $t$  направления протекания в рассматриваемом проводнике переменного или двуполярного импульсного электрического тока проводимости  $i_{\Pi}(t)$  для вычисления величины продольного смещения  $\Delta z_{ЭПВ}$  его ВЭП можно приближенно записать:

$$\Delta z_{ЭПВ} = \tau_{ПВ} \cdot v_D, \quad (4)$$

где  $\tau_{ПВ}$  – длительность отрицательной (положительной) полуволны тока  $i_{\Pi}(t)$  в материале проводника.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОЙ ОЦЕНКИ ПРОДОЛЬНОГО СМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ В ПРОВОДНИКЕ

Выполним на основе предложенного расчетного выражения (4) количественную оценку величины продольного смещения  $\Delta z_{ЭПВ}$  электронных полувольт де Бройля в тонком оцинкованном стальном проводнике ( $l_{\Pi} = 118$  мм;  $r_{\Pi} = 0,15$  мм;  $\delta_{\Pi}(t) = 6,87 \cdot 10^8$  А/м<sup>2</sup>;  $n_{e0} = 16,86 \cdot 10^{28}$  м<sup>-3</sup>), по которому протекает: а) переменный гармонический ток промышленной частоты 50 Гц; б) двуполярный затухающий синусоидальный импульсный ток частотой  $10^5$  Гц. Как известно, первый случай соответствует устройствам, используемым в силовой электротехнике (электроэнергетике) [17], а второй – устройствам, применяемым в электроразрядных технологиях и технике больших импульсных токов и сильных магнитных (электрических) полей [13, 18]. Согласно принятым исходным данным, (2) и (3) следует, что для рассматриваемых случаев средняя дрейфовая скорость  $v_D$  свободных электронов в стальном проводе равна 0,0255 м/с. Так как для частоты 50 Гц величина длительности полувольты (полупериода) тока составляет  $\tau_{ПВ} = 10$  мс, то для первого случая в соответствии с (4) искомая величина продольного смещения  $\Delta z_{ЭПВ}$  в стальном проводнике ВЭП оказывается численно равной 0,255 мм. Во втором нашем случае длительность токовой полувольты принимает значение, равное  $\tau_{ПВ} = 5$  мкс. Поэтому здесь согласно (4) величина продольного смещения  $\Delta z_{ЭПВ}$  электронных полувольт де Бройля будет равна примерно 0,13 мкм. Для сравнения полученных расчетных данных для  $\Delta z_{ЭПВ}$  с известными экспериментально установленными геометрическими параметрами для ВЭП металлического проводника отметим, что в случае протекания по выбранному тонкому оцинкованному стальному проводу постоянного тока указанной плотности ( $\delta_{\Pi} = 6,87 \cdot 10^2$  А/мм<sup>2</sup>) опытное значение продольной ширины ВЭП  $\Delta z_{ВЭП}$  численно

составляет 3,84 мм [12]. Приведенные нами данные позволяют заключить, что в наших случаях выполняется неравенство  $\Delta z_{ЭПВ} \ll \Delta z_{ВЭП}$ .

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На практике в слабо- и сильноточной импульсной технике величиной продольного смещения  $\Delta z_{ЭПВ}$  во времени ВЭП в металлических проводниках с электрическим током проводимости различных АВП можно пренебрегать.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тамм И.Е. Основы теории электричества.- М.: Наука, 1976. - 616 с.
- [2] Займан Дж. М. Современная квантовая теория/ Пер. с англ. под ред. В.Л. Бонч-Бруевича.- М.: Мир, 1971.-288 с.
- [3] Дирак П.А.М. Принципы квантовой механики/ Пер. с англ. под ред. акад. В.А. Фока.- М.: Наука, 1979.-480 с.
- [4] Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости // Электротехника.-2005.- №7.- С. 25-33.
- [5] Баранов М.И. Волновой электронный пакет проводника с электрическим током проводимости // Электротехника і електромеханіка.-2006.- №3.-С.49-53.
- [6] Баранов М.И. Квантовомеханическая модель быстрого нагрева проводника электрическим током проводимости большой плотности//Электротехника.-2006.-№4.- С. 38-44.
- [7] Баранов М.И. Энергетический и частотный спектры свободных электронов проводника с электрическим током проводимости // Электротехника.-2006.- №7.- С. 29-34.
- [8] Баранов М.И. Новые физические подходы и механизмы при изучении процессов формирования и распределения электрического тока проводимости в проводнике // Технічна електродинаміка.-2007.-№1.-С. 13-19.
- [9] Баранов М.И. Эвристическое определение максимального числа электронных полувольт де Бройля в металлическом проводнике с электрическим током проводимости // Электротехніка і електромеханіка.-2007.- №6.- С. 69-73.
- [10] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.- М.: Наука, 1990. - 624 с.
- [11] Баранов М.И. Энрико Ферми – один из основоположников квантовой статистики, электродинамики и ядерной энергетики // Электротехніка і електромеханіка.-2007.-№2.- С. 5-12.
- [12] Марахтанов М.К., Марахтанов А.М. Периодические изменения температуры по длине стальной проволоки, вызванные электрическим током// Вестник МГТУ им. Баумана. Серия: Машиностроение.-2003.-№1.-С.37-47.
- [13] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.- М.: Мир, 1972.- 391 с.
- [14] Баранов М.И. Упрощенная математическая модель микропроцессов в проводнике с электрическим током проводимости // Электротехніка і електромеханіка.-2006.- №2.- С. 66-70.
- [15] Астафуров В.И., Бусев А.И. Строение вещества.- М.: Просвещение, 1977.- 160 с.
- [16] Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский.- Киев: Наукова думка, 1989.-864с.
- [17] Баранов М.И. Никола Тесла и современная электротехника // Электротехніка і електромеханіка.-2006.- №2.- С. 5-11.
- [18] Гулий Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий.- Киев: Наукова думка, 1990.- 208 с.

Поступила 03.07.2007