

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 ψ – 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_{Π} и длиной l_{Π} 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 ψ – функциями [4, 8]. Данные волновые ψ – 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].

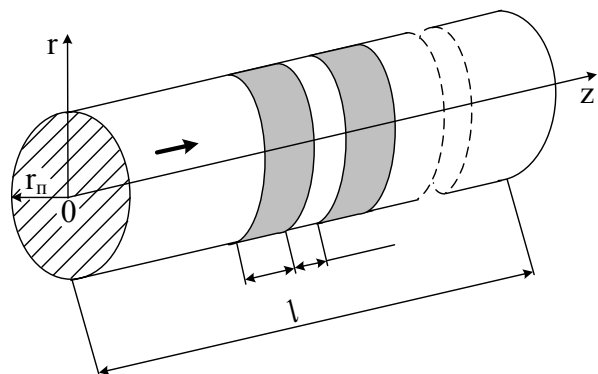


Рис. Расчетная модель проводника с переменным электрическим током проводимости $i_{\Pi}(t)$

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

величин Δz_{Γ} и Δz_{χ} 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_{Π} 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 полуцелым 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 Δz_{Γ} и один относительно "холодный" шириной Δz_{χ} 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/м²) 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 θ_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⁻³) 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⁻³), 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_{Π} (кг/м³) 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/м²; $n_{e0} = 16,86 \cdot 10^{28}$ м⁻³), 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/мм²) 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