

ПОЛЕВАЯ И ЦЕПНАЯ ФОРМУЛИРОВКИ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ О ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ В СИСТЕМЕ "МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ПРОВОД – ПРОВОДЯЩАЯ ЗЕМЛЯ" С ПЕРЕМЕННЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

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 класичної електродинаміки і теоретичної електротехніки показана еквівалентність польового і колового формулювань задачі про передачу електромагнітної енергії в системі "металевий провід-провідна земля" з перемінним електричним струмом провідності. З квантовомеханічних і електродинамічних позицій однозначно встановлено, що в даній системі електромагнітна енергія передається тільки за рахунок потоку електромагнітної енергії в ізоляційному просторі між проводом і землею.

На основе положений классической электродинамики и теоретической электротехники показана эквивалентность полевой и цепной формулировок задачи о передаче электромагнитной энергии в системе "металлический провод-проводящая земля" с переменным электрическим током проводимости. С квантовомеханических и электродинамических позиций однозначно установлено, что в данной системе электромагнитная энергия передается только за счет потока электромагнитной энергии в изоляционном пространстве между проводом и землей.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в теории электричества [1], теоретической электротехнике [2] и классической электродинамике [3] достаточно глубоко и подробно изучены вопросы распространения переменного (импульсного) электромагнитного поля как в диэлектрике, так и в проводящей среде. Тем не менее, до сих пор, по мнению автора, отсутствует единый аргументированный электрофизический подход к задаче, связанной с передачей электромагнитной энергии в проводных линиях, подключенных, с одной стороны, к источнику переменного (импульсного) электрического напряжения (ИПЭН), а, с другой стороны, к электрической (активной или реактивной) нагрузке (ЭН). В этой связи до сих пор нет однозначного обоснованного ответа на такие важные для указанных областей физики электрофизические вопросы как: во-первых, каким путем все же передается электромагнитная энергия в металлических проводах с переменным электрическим током проводимости различных амплитудно-временных параметров (АВП), размещенных в воздухе над землей и подключенных к ИПЭН и ЭН?; во-вторых, какова "роль" при такой передаче электромагнитной энергии токопроводящего материала, размеров и геометрической формы самих металлических проводов?; в-третьих, какими расчетными соотношениями при этом для оценки величины передаваемой электромагнитной энергии лучше и правильней пользоваться (то ли найденными на основе теории поля, то ли полученными на основе теории электрических цепей)? Ответы на эти непростые вопросы могут быть даны только после тщательного теоретического рассмотрения квазистационарных или волновых электромагнитных процессов, протекающих вне и внутри металлических проводов в указанной выше электромагнитной системе "металлический провод – проводящая земля" с переменным (импульсным) электрическим током проводимости, включенной в электрическую цепь с сосредоточенными или распределенными электрическими пара-

метрами, содержащую на своих противоположных концах ИПЭН и ЭН.

В [4-10] автором на основе квантовомеханического подхода было рассмотрено ряд новых физико-математических моделей, направленных на изучение процессов формирования и распределения постоянно-го, униполярного или биполярного переменного (импульсного) электрического тока проводимости в тонком металлическом проводнике. При этом теоретически было показано, что в исследуемом металлическом проводнике с электрическим током проводимости различных АВП возникают стоячие электронные "дебройлевские" полуволны, формирующие волновой электронный пакет (ВЭП) проводника, описываемый соответствующим дискретным набором собственных волновых ψ – функций. Используемые в [4-10] идеи и подходы, базирующиеся на основополагающих положениях квантовой физики (механики), нашли свое экспериментальное подтверждение в [11] при исследовании неоднородного периодического продольного температурного поля тонкого оцинкованного стального провода, нагреваемого постоянным электрическим током проводимости большой плотности.

Целью данной статьи является рассмотрение полевой и цепной постановок задачи о передаче электромагнитной энергии в квазистационарной системе "металлический провод – проводящая земля" с переменным (импульсным) электрическим током проводимости различных АВП и выяснение на их основе с учетом квантовомеханических особенностей распределения в ее токопроводящих частях свободных электронов путей канализации и выделения в ней электромагнитной энергии.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим тонкий сплошной круглый однородный металлический провод 1 цилиндрической формы радиусом r_{Π} и длиной l_{Π} при соблюдении условия $l_{\Pi} \gg r_{\Pi}$, размещенный на высоте $h \ll l_{\Pi}$ над пло-

ской поверхностью однородной неограниченной по геометрическим размерам проводящей земли 2 (рис.). Считаем, что металлический провод и проводящая земля образуют двухпроводную линию, работающую в квазистационарном режиме [12] и, соответственно, в которой длина электромагнитной волны $\lambda_{ЭМВ}$ будет значительно превышать ее основные геометрические размеры, то есть будут выполняться следующие неравенства: $\lambda_{ЭМВ} \gg l_{П}$ и $\lambda_{ЭМВ} \gg h$. Пусть вдоль продольной оси OZ металлического провода, подключенного к ИПЭН и ЭН, протекает известный из классической физики переменный электрический ток проводимости $i_{П}(t)$ с произвольными АВП, равномерно

распределенный по его поперечному сечению $S_{П}$ с плотностью $\delta_{П}$ и приповерхностному слою проводящей земли с усредненной плотностью δ_3 . Примем, что неподвижный изотропный металлический провод с переменным электрическим током проводимости $i_{П}(t)$ размещен в изоляционной газовой или конденсированной среде при комнатной температуре, равной $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$, а электрофизические характеристики плоской неограниченной проводящей земли (удельная электропроводность γ_3 и другие) удовлетворяют требованиям линейности электропроводящей среды с электрическим током проводимости, равным $-i_{П}(t)$.

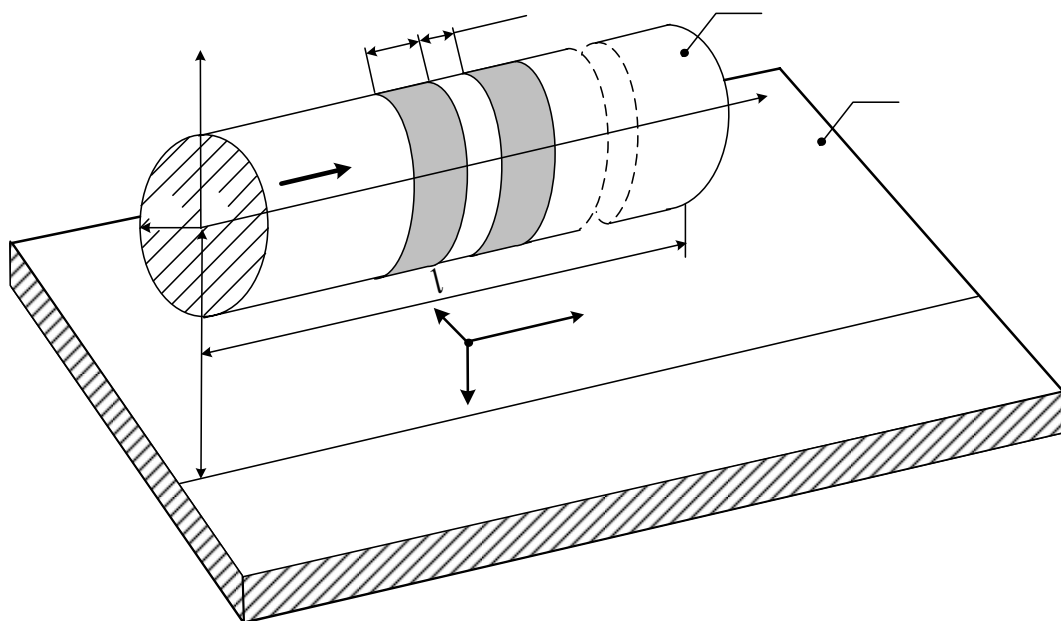


Рис. Упрощенная расчетная модель электромагнитной системы "металлический провод – проводящая земля", с переменным электрическим током проводимости $i_{П}(t)$

Будем считать, что изоляционная среда между проводом радиусом $r_{П} \ll h$ и землей однородна и в ней отсутствуют источники электромагнитной энергии. Для упрощения дальнейших выкладок, большей конкретности и однозначности примем, что в качестве такой среды у нас служит воздух. Принимаем то допущение, что на расстоянии от провода, большем чем h , напряженности электрического и магнитного полей близки к нулю [2, 3]. Полагаем, что в металлическом проводе исследуемой системы существует только прямая плоская электромагнитная волна, а поведение в межатомном пространстве его материала с удельной электропроводностью $\gamma_{П}$ свободных электронов, характеризующихся в соответствии с основными принципами квантовой физики корпускулярно-волновым дуализмом, приближенно подчиняется одномерному временному волновому уравнению Шредингера и описывается на его основании соответствующими стоячими электронными полуволнами де Бройля – собственными волновыми ψ – функциями [4, 8]. Данные волновые ψ – функции, как известно, определяют в металлическом проводе электромагнит-

ной системы "металлический провод – проводящая земля" пространственно-временную эволюцию и закономерности продольного распределения свободных электронов и формируют ВЭП провода с переменным электрическим током проводимости $i_{П}(t)$ [5, 8]. С учетом изложенного выше примем, что в воздухе между проводом и землей распространяется также плоская поперечная электромагнитная волна длиной $\lambda_{ЭМВ}$. Влиянием джоулева нагрева на значения удельных электропроводностей материала провода $\gamma_{П}$ и грунта γ_3 пренебрегаем. Считаем, что в рассматриваемой электромагнитной системе проводящая земля удалена от металлического провода настолько, что ее влияние на распределения напряженностей электрического и магнитного полей в воздушной среде между проводом и землей будет незначительным.

ВЭП рассматриваемого провода или квантованный дискретный набор его собственных волновых ψ – функций макроскопически распределяется вдоль продольной оси OZ провода в периодическую электронную структуру, шаг которой согласно приведенному выше рис. равен сумме ширин относительно

"горячего" Δz_{Γ} и относительно "холодного" Δz_{χ} продольных участков металлического провода [5, 7]. Подтвержденные опытным путем формулы для расчета Δz_{Γ} и Δz_{χ} даны в [7, 9]. Исходя из [4, 8] и положений квантовой физики, считаем, что свободные электроны в межатомном пространстве материала металлического провода нашей простейшей системы распределяются в его продольном направлении в соответствии с целочисленной последовательностью изменения электронных полувольт де Бройля согласно дискретному набору собственных волновых ψ_n -функций ($n=1,2,3,\dots$) и подчиняются квантовой статистике Ферми – Дирака [13, 14]. Требуется на основе положений классической электродинамики и теоретической электротехники рассмотреть с позиций теории поля и теории цепей фундаментальный вопрос о передаче электромагнитной энергии в квазистационарной системе "металлический провод – проводящая земля" с переменным электрическим током проводимости различных АВП и установить с учетом положений квантовой физики электрофизическую "роль" металлического провода и его проводящего материала в рассматриваемом нами электромагнитном процессе.

2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАДЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОВОДЕ И ЗЕМЛЕ НА ПОЛЕ ИССЛЕДУЕМОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Вначале выполним для рассматриваемой электромагнитной системы "металлический провод – проводящая земля" сравнение между собой значений тангенциальной (касательной) $E_{\text{тп}}$ и нормальной $E_{\text{н}}$ составляющих напряженности электрического поля в воздухе вблизи поверхности металлического (например, алюминиевого) провода с переменным электрическим током проводимости $i_{\text{п}}(t)$ и уровнем электрического напряжения на нем, равным $U_{\text{п}}$. Примем, что для выбранного провода нашей электромагнитной системы характерны следующие исходные данные [2, 12]: $\gamma_{\text{п}}=3,61 \cdot 10^7$ См/м; $\delta_{\text{п}}=5 \cdot 10^6$ А/м²; $r_{\text{п}}=5 \cdot 10^{-3}$ м; $l_{\text{п}}=10^3$ м; $h=10$ м; $U_{\text{п}}=110$ кВ. Так как $E_{\text{тп}}=\delta_{\text{п}}/\gamma_{\text{п}}$, то для рассматриваемого случая в алюминиевом проводе численное значение тангенциальной напряженности электрического поля будет примерно равным 0,138 В/м. Напряженность неоднородного электрического поля в системе "металлический провод – проводящая земля" будет наибольшей около провода, причем $E_{\text{п}} \geq U_{\text{п}}/h$. Тогда, в нашем случае для нормальной составляющей напряженности электрического поля следует, что $E_{\text{н}} \geq 11 \cdot 10^3$ В/м. Видно, что $E_{\text{н}}/E_{\text{тп}} \geq 8 \cdot 10^4$. Поэтому при рассмотрении электрического поля в исследуемой электромагнитной системе влиянием падения электрического напряжения вдоль провода $U_{\text{пп}}=E_{\text{тп}} \cdot l_{\text{п}}$ и соответственно величиной $E_{\text{тп}}$ на "картину" распределения электрического поля между проводом и землей можно пренебрегать.

При $\gamma_3=0,01$ См/м [16], $i_{\text{п}}=\pi r_{\text{п}}^2 \delta_{\text{п}}=393$ А и $E_{\text{тз}} \approx 10^2$ В/м, полученного с учетом перерасчета

E – поля в земле на основе результатов, приведенных в [16], усредненное значение плотности тока δ_3 в приповерхностных слоях земли достигает величины порядка 1 А/м². Из приведенных данных следует, что, несмотря на возрастание роли тангенциальной составляющей электрического поля в земле ($E_{\text{п}}/E_{\text{тз}} \geq 10^2$), влиянием значений $E_{\text{тз}}$ на оцениваемую нами приближенную "картину" электрического поля в воздушном пространстве между проводом и землей все же можно также пренебречь.

3. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД ПО ОЦЕНКЕ ПЕРЕДАВАЕМОЙ ЭНЕРГИИ В ИССЛЕДУЕМОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЕ

Положение 1. В связи с тем, что в материале металлического провода с переменным электрическим током проводимости $i_{\text{п}}(t)$ исследуемой нами электромагнитной системы "металлический провод – проводящая земля" возникают стоячие электронные полувольты де Бройля [4, 8] и несмещающийся во времени t ВЭП провода [5, 10], можно обоснованно предположить о существовании подобных волн и аналогичной электромагнитной "картины" в приповерхностном слое проводящего материала земли. Наличие в электропроводящем материале стоячей электронной (электромагнитной) волны, как известно [3, 15], приводит к тому, что в нем электромагнитная энергия не будет переходить вдоль металлического провода и проводящей земли ни через один узел этой волны. Поэтому, учитывая вышеизложенное, в нашем случае можно однозначно утверждать: с учетом существования в электропроводящих материалах провода и земли стоячих электронных (электромагнитных) волн передача электромагнитной энергии в продольном направлении рассматриваемой электромагнитной системы через эти токопроводящие материалы от ИПЭН к ЭН будет отсутствовать.

Положение 2. В основу полевой формулировки рассматриваемой задачи положим известное понятие

вектора Умова-Пойнтинга $\vec{P}_{\text{п}}$ [1, 2], который определяет мощность потока электромагнитной энергии, отнесенную к единичной поверхности изоляционного (проводящего) пространства, нормальной к направлению распространения в нем электромагнитной волны.

Как известно, для вектора $\vec{P}_{\text{п}}$ (см. рис.) справедливо следующее соотношение [1-3]:

$$\vec{P}_{\text{п}} = [\vec{E}_{\text{п}} \vec{H}_{\text{п}}], \quad (1)$$

где $\vec{E}_{\text{п}} \vec{H}_{\text{п}}$ – соответственно векторы напряженности электрического и магнитного полей в исследуемой области пространства электромагнитной системы "металлический провод – проводящая земля".

Из приведенного рис. видно, что направление потока электромагнитной энергии в воздушном пространстве между металлическим проводом и проводящей землей (обозначение на рис. электрического тока проводимости в ней, равного $-i_{\text{п}}(t)$, нами опу-

щено) совпадает с направлением протекания электрического тока проводимости в проводе. В дальнейшем для упрощения записи и удобства в пользовании знаками векторов над указанными выше тремя полевыми символами опустим. Тогда, с учетом принятых допущений и выполненных расчетных оценок в разделе 3 для нормальной составляющей напряженности электрического поля $E_{\Pi}(t)$ в изоляционном пространстве между проводом и землей приближенно запишем:

$$E_{\Pi}(t) = U_{\Pi}(t) / h, \quad (2)$$

где $U_{\Pi}(t)$ – переменное электрическое напряжение провода, равное разности электрических потенциалов в заданной текущей точке металлического провода и в точке его заземленного конца с условно нулевым электрическим потенциалом.

Напомним, что для рассматриваемого случая переменный электрический ток проводимости $i_{\Pi}(t)$ будет представлять собой гармонические (осциллирующие) колебания "электронного газа" (совокупности свободных электронов) электропроводящего материала провода (земли) вдоль продольной оси OZ провода и соответственно вдоль электромагнитной системы "металлический провод – проводящая земля" во взаимно противоположных направлениях [8]. Причем, частота этих колебаний будет соответствовать частоте изменения во времени переменного электрического напряжения $U_{\Pi}(t)$, задаваемой ИПЭН.

Для напряженности магнитного поля $H_{\Pi}(t)$ вокруг провода в рассматриваемой электромагнитной системе приближенно имеем [2, 12]:

$$H_{\Pi}(t) = i_{\Pi}(t) / 2 \pi r, \quad (3)$$

где $r \geq r_{\Pi}$ – текущее значение расстояния от провода до заданной точки в изоляционном (воздушном) пространстве между проводом и землей.

С учетом (1) для электромагнитной энергии W_{Π} , передаваемой вдоль провода от ИПЭН к ЭН в изоляционной среде между проводом и землей, можно записать следующее выражение:

$$W_{\Pi} = \int_0^t \oint_S E_{\Pi}(t) H_{\Pi}(t) ds dt, \quad (4)$$

где S – поверхность в изоляционной (воздушной) среде между проводом и землей, сквозь которую передается электромагнитная энергия.

Для элемента ds указанной поверхности S воздушного пространства между проводом и землей найдем:

$$ds = r dr d\varphi, \quad (5)$$

где $d\varphi$ – элементарный угол в азимутальном направлении поперечной к исследуемой электромагнитной системе плоскости, выбираемый между вертикалью от провода к земле в этой плоскости и текущим радиусом r заданной точки в изоляционной среде вне провода, расположенным также в указанной плоскости.

В результате с учетом (2)–(5) для величины электромагнитной энергии W_{Π} в исследуемой электромагнитной системе получаем следующее выражение:

$$W_{\Pi} = (2\pi h)^{-1} \int_0^t \int_0^{2\pi} \int_{r_{\Pi}}^h U_{\Pi}(t) i_{\Pi}(t) r dr d\varphi dt. \quad (6)$$

Пренебрегая после интегрирования в (6) пренебрежимо малым слагаемым, определяемым значением $r_{\Pi} \ll h$ в нижнем пределе интегрирования по радиусу r , окончательно для электромагнитной энергии W_{Π} , передаваемой в воздухе вдоль металлического провода с переменным электрическим током проводимости $i_{\Pi}(t)$ рассматриваемой электромагнитной системы от ИПЭН к ЭН, в принятом приближении получаем:

$$W_{\Pi} = \int_0^t U_{\Pi}(t) i_{\Pi}(t) dt, \quad (7)$$

где $U_{\Pi}(t) i_{\Pi}(t) = p(t)$ – мгновенная мощность электрической цепи переменного тока [17], последовательно образованной ИПЭН, металлическим проводом, ЭН и проводящей землей.

Положение 3. Несмотря на кажущуюся простоту приведенных выше физических соображений и математических соотношений, нами получен новый и важный для прикладной электротехники (электродинамики) и не известный доселе автору научный результат. Данный результат заключается в том, что классическое соотношение (4) и полученное на его основе соотношение (7) свидетельствуют об эквивалентности полевой и цепной математических формулировок задачи о передаче электромагнитной энергии в исследуемой электромагнитной системе "металлический провод – проводящая земля". В этой связи в электроэнергетике при оценке и учете передаваемой по проводным линиям электромагнитной энергии W_{Π} от производителя электроэнергии к ее потребителю целесообразно пользоваться соотношением (7) и получаемыми на его основе классическими выражениями для активной и реактивной мощностей [1, 17]. В технике и электрофизике высоких напряжений [18], технике сильных электрических и магнитных полей [12, 19], когда в воздушных (как правило) рабочих объемах формируются мощные переменные (импульсные) электромагнитные поля и измеряются необходимые АВП напряженностей E – и H – полей [20], при оценке значений W_{Π} более предпочтительно использовать расчетное соотношение (4).

4. ОЦЕНКА ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ НА "ГОРЯЧИХ" И "ХОЛОДНЫХ" УЧАСТКАХ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОВОДА ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМЫ

Для расчетной оценки максимального приращения плотности тепловой энергии $Q_{\Pi\Pi}$ (Дж/м³) на "горячем" продольном участке металлического провода нашей системы можно с привлечением квантовой физики получить следующее соотношение:

$$Q_{\Pi\Pi} = 2 \Delta z_{\Gamma} \cdot I_{\Pi}^{-1} \cdot n_{e0} \cdot W_{F0}, \quad (8)$$

где $W_{F0} = 0,6 h^2 (8m_e)^{-1} \cdot (3n_{e0} / \pi)^{2/3}$ – среднее значение энергии Ферми для свободного электрона провода с усредненной плотностью n_{e0} свободных электронов в его материале до протекания по нему элек-

трического тока $i_{\Pi}(t)$ [13], где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $m_e = 9,108 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона с электрическим зарядом e_0 , равным $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл [15]; $\Delta z_{\Gamma} \geq e_0 n_{e0} h / 4\pi m_e \delta_{\Pi}$ – расчетная усредненная ширина "горячего" продольного участка провода, определенная из соотношения неопределенностей Гейзенберга [4, 8].

Усредненная плотность n_{e0} свободных электронов в рассматриваемом проводе, как известно, равна концентрации атомов N_0 (м^{-3}) материала провода, умноженной на его валентность, определяемую числом неспаренных электронов на внешних валентных энергетических уровнях атомов материала провода [13]. Для такого широко используемого в электротехнике и технике больших импульсных токов (полей) материала как медь валентность равна двум [15]. Кроме того, в металлическом проводе с плотностью материала d_{Π} ($\text{кг}/\text{м}^3$) для концентрации его атомов N_0 будет справедливо следующее соотношение [15]:

$$N_0 = d_{\Pi} (M_a \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27})^{-1}, \quad (9)$$

где M_a – атомная масса материала провода, практически равная массовому числу A ядра атома металлического провода, определяемому в соответствии с периодической системой химических элементов Менделеева (одна атомная единица массы равна $1/12$ массы атома изотопа углерода $^{12}_6\text{C}$, численно составляющей $1,6606 \cdot 10^{-27}$ кг).

Аналогично (8) для максимального приращения плотности тепловой энергии $Q_{\Pi X}$ ($\text{Дж}/\text{м}^3$) на "холодном" продольном участке металлического провода получаем следующее расчетное выражение:

$$Q_{\Pi X} = \Delta z_{\chi} \cdot I_{\Pi}^{-1} \cdot n_{e0} \cdot W_{F0}, \quad (10)$$

где $\Delta z_{\chi} \leq e_0 n_{e0} h (\pi - 2) / 8\pi m_e \delta_{\Pi}$ – расчетная усредненная ширина "холодного" продольного участка провода, найденная из (8) и соотношения неопределенностей Гейзенберга [4, 8].

Из (8) и (10) следует, что расчетное отношение величин приращений плотностей тепловой энергии на "горячих" и "холодных" участках провода равно:

$$Q_{\Pi \Gamma} / Q_{\Pi X} = 4 / (\pi - 2). \quad (11)$$

Из (11) вытекает такой вывод: приращение температуры джоулевого нагрева на "горячих" участках провода будет примерно в 3,5 раза выше, чем на его "холодных" продольных участках, что отвечает опытным данным [11]. Приведенные данные говорят о том, что металлический провод в рассматриваемой системе выполняет лишь "роль" направляющей структуры, определяющей требуемое направление потока электромагнитной энергии от ИПЭН к ЭН. Одновременно наличие в проводе металла приводит к паразитным джоулевым потерям энергии, вызванным рассеиванием электронных полувольт де Бройля на тепловых колебаниях регулярно расположенных положительных ионов кристаллической решетки металла провода.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Тамм И.Е. Основы теории электричества.– М.: Наука, 1976. – 616с.

- [2] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, Том 2.–Л.: Энергоиздат, 1981.– 416 с.
- [3] Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн: М.: Наука, 1989.– 544 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// Электротехніка 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] Баранов М.И. Аналитическая оценка смещения периодической структуры волнового электронного пакета в металлическом проводнике с переменным электрическим током проводимости // Электротехніка і електромеханіка.–2008.– №1.– С. 72–74.
- [11] 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.
- [12] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля.– М.: Мир, 1972.– 391 с.
- [13] Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике.– М.: Наука, 1990.– 624 с.
- [14] Баранов М.И. Энрико Ферми – один из основоположников квантовой статистики, электродинамики и ядерной энергетики// Электротехніка і електромеханіка.–2007.–№2.–С. 5–12; 2007.–№3.– С. 5–11.
- [15] Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский.– Киев: Наукова думка, 1989.–864с.
- [16] Баранов М.И., Даценко В.П., Колиушко Г.М. Расчет двумерного импульсного электромагнитного поля в земле при прямом ударе в нее молнии // Технічна електродинаміка.–2002.–№3.– С. 13–18.
- [17] Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, Том 1.–Л.: Энергоиздат, 1981.–536с.
- [18] Техника высоких напряжений / Под общей ред. Г.С. Кучинского.– Санкт–Петербург: Изд–во ПЭИПК, 1998.–700 с.
- [19] Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова.– М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
- [20] Баранов М.И., Колиушко Г.М., Колобовский А.К., Кравченко В.И. Комплекс высоковольтного испытательного электрофизического оборудования экспериментальной базы НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ" // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика та перетворююча техніка. Харків: НТУ "ХПИ".–2004.– №4.– С. 3–13.

Поступила 11.07.2007