

М.И. Баранов, С.В. Рудаков

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСРЕДНЕННОГО ЧИСЛА КВАНТОВАННЫХ ПРОДОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУВОЛН ДЕ БРОЙЛЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ПРОВОДНИКЕ С ИМПУЛЬСНЫМ АКСИАЛЬНЫМ ТОКОМ

Представлені результати теоретичних і експериментальних досліджень, які пов'язані з визначенням усередненого числа n_{0m} квантованих подовжніх електронних півхвиль де Бройля в металевому провіднику з імпульсним аксіальним струмом провідності великої щільності. Отримані результати вказують на квантово-хвильовий характер протікання імпульсного струму провідності в цьому провіднику, що приводить до виникнення в його структурі квантованої подовжньої періодичної локалізації вільних електронів, що дрейфують, на ділянках шириною Δz . Дані зони локалізації електронів відрізняються підвищеною температурою нагріву. Бібл. 26, рис. 4.

Ключові слова: металевий провідник, імпульсний струм, розрахунково-експериментальне визначення усередненого числа квантованих подовжніх електронних півхвиль де Бройля і зон локалізації електронів в провіднику.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, связанных с определением усредненного числа n_{0m} квантованных продольных электронных полувольт де Бройля в металлическом проводнике с импульсным аксиальным током проводимости большой плотности. Полученные результаты указывают на квантово-волновой характер протекания импульсного тока проводимости в этом проводнике, приводящий к возникновению в его структуре квантованной продольной периодической локализации дрейфующих свободных электронов на участках шириной Δz . Данные зоны локализации электронов отличаются повышенной температурой нагрева. Библ. 26, рис. 4.

Ключевые слова: металлический проводник, импульсный ток, расчетно-экспериментальное определение усредненного числа квантованных продольных электронных полувольт де Бройля и зон локализации электронов в проводнике.

Введение. Теоретическим и экспериментальным исследованиям квантово-волновой природы электрического тока проводимости в металлических проводниках цилиндрической формы посвящен ряд научных публикаций в известных отечественных и зарубежных журналах и монографиях [1-11]. Результаты этих исследований носят фундаментальный характер и позволяют по-новому взглянуть на квантовомеханические процессы распространения и локализации в кристаллической структуре металла указанных проводников их дрейфующих коллективизированных свободных электронов, обладающих волновыми свойствами и характеризующихся дебройлевскими длинами λ_e своих волн [12, 13]. Как известно, для длин λ_e электронных волн, распространяющихся в металле цилиндрического проводника с током в его продольном и радиальном направлениях, выполняется фундаментальное соотношение из области волновой механики (квантовой физики), полученное в 1924 г. выдающимся французским физиком-теоретиком Луи де Бройлем и имеющее следующий классический вид [12, 13]:

$$\lambda_e = h / (m_e v_e), \quad (1)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31}$ кг – масса покоя электрона; v_e – скорость движения (дрейфа) свободных электронов в кристаллической структуре материала проводника.

Согласно [1-13] поведение свободных электронов в металлическом проводнике цилиндрической формы описывается соответствующими волновыми ψ -функциями Шредингера (впервые они были предложены и получены в аналитическом виде вначале для связанных электронов водородоподобных атомов при решении соответствующего волнового уравнения (в историю современной физики оно вошло как уравнение Шредингера) выдающимся австрийским физиком-теоретиком Эрвином Шредингером в 1926 г. [14]), изменяющимися в пространстве и времени по гармоническому закону и квадрат модуля которых

определяет плотность вероятности их (электронов) нахождения в том или ином месте цилиндрического объема проводника. В этой связи наиболее вероятными местами пребывания дрейфующих под действием приложенного к противоположным концам проводника постоянного, переменного или импульсного электрического напряжения свободных электронов в металле проводника будут те, которые соответствуют амплитудам волновых ψ -функций Шредингера и соответственно амплитудам электронных волн длиной λ_e , пространственно-временные изменения которых происходят также по гармоническому закону. Кроме того, волновые распределения дрейфующих свободных электронов в структуре металла любого проводника подчиняются фундаментальному принципу квантовой механики – соотношению неопределенностей Гейзенберга [12, 13], сформулированному выдающимся немецким физиком-теоретиком Вернером Гейзенбергом в 1927 г. [14] и имеющему применительно к продольной z и радиальной r координатам цилиндрического проводника с током следующий канонический вид:

$$m_e \Delta v_{ez} \Delta z \geq h / 4\pi; \quad (2)$$

$$m_e \Delta v_{er} \Delta r \geq h / 4\pi, \quad (3)$$

где Δz , Δr – соответственно неопределенности продольной и радиальной координат свободных электронов, дрейфующих в структуре материала проводника; Δv_{ez} , Δv_{er} – соответственно неопределенности продольной и радиальной составляющих скорости дрейфа v_e электронов в материале проводника.

Из (2) и (3) следует, что даже для известных (численно заданных) значений скоростей Δv_{ez} и Δv_{er} дрейфующих свободных электронов их пространственное местоположение в цилиндрическом объеме материала проводника с током остается неопределенным и количественно определяемым соответственно величинами Δz и Δr . Учитывая приведенную выше

физическую (статистическую) интерпретацию волновых ψ -функций Шредингера, предложенную в 1926 г. выдающимся немецким физиком-теоретиком Максом Борном [14], середины указанных величин Δz и Δr для дрейфующих свободных электронов будут соответствовать амплитудам электронных волн длиной λ_e .

При численном значении продольной скорости v_{ez} дрейфа свободных электронов в медном проводнике (соответственно и численного значения ее неопределенности Δv_{ez}), в пределе составляющем, например, для режима короткого замыкания (КЗ) в электрической цепи (при продольной плотности δ_{ez} тока в проводнике около 1 кА/мм² [15]), примерно 37 мм/с, из (1) и (2) следует, что длина $\lambda_{ez}/2$ электронной полуволны де Бройля в данном металле проводника будет численно составлять около 9,8 мм, а величина Δz продольной локализации дрейфующих свободных электронов в проводнике – примерно 1,56 мм. Видно, что в рассматриваемом случае (в режиме КЗ) величины $\lambda_{ez}/2$ и Δz принимают макроразмеры, соизмеримые с поперечными размерами реальных проводников, используемых в электротехнике и электроэнергетике. В этой связи для данного случая волновые проявления в металле проводника дрейфующих свободных электронов, приводящие к локальному периодическому перегреву металла проводника на участках шириной Δz , могут быть физически выявлены и зарегистрированы с помощью измерительной техники (например, тепловизора или фотоаппаратуры). Что касается хаотичного (теплого) движения свободных электронов в медном проводнике без тока проводимости (до подачи на него электрического напряжения), то в этом случае их наибольшая скорость, определяемая согласно квантовой статистике Ферми-Дирака энергией Ферми W_F [12, 13], принимает численное значение, равное около $1,6 \cdot 10^6$ м/с. Подставив это значение скорости электронов в (1) и (2), находим, что для данного случая (исходного состояния «электронного облака» проводника) искомые величины $\lambda_e/2$ и Δz принимают наноразмеры, соответственно равные примерно 0,23 нм и 0,036 нм. Поэтому выявить локальные проявления в металле проводников волновых свойств хаотично перемещающихся в его межатомном пространстве свободных электронов и их влияния на макроскопические электрофизические процессы (например, на контактную разность потенциалов металлов, термоэлектричество [12] и др.), происходящие в проводниках, исследователю не представляется возможным.

Приведенные выше количественные оценки указывают на то, что в связи с относительно небольшими значениями скоростей v_e дрейфа свободных электронов в кристаллической структуре металла проводника (для электроэнергетики не более 1 м/с) их волновые свойства будут оказывать существенное влияние на процессы их пространственного распределения в металлических проводниках и соответственно на процессы джоулевого тепловыделения в их материале.

При изучении поведения дрейфующих свободных электронов в металле проводника с током проводимости в обязательном порядке необходимо учитывать и квантовую природу всех процессов, протекающих в микромире материи. Поэтому решения диффе-

ренциальных уравнений в частных производных, описывающих волновые распределения указанных электронов в проводнике, будут характеризоваться собственными целыми числами $n_0=1,2,3,\dots$, получившими в квантовой физике название квантовых чисел [12-14].

Занимаясь исследованием процессов формирования и распространения дрейфующих свободных электронов в металлическом проводнике следует учитывать и фундаментальный «принцип запрета», сформулированный в 1925 г. выдающимся австрийским физиком-теоретиком Вольфгангом Паули [14] и касающийся свойств связанных электронов в атоме любого вещества. Согласно «принципу запрета Паули» на электронных оболочках атома вещества может находиться только один связанный электрон, имеющий соответствующий и характерный только для него определенный количественный набор четырех квантовых чисел [12, 13]: главного квантового числа n , орбитального квантового числа l , магнитного квантового числа m_l и спинового квантового числа m_s . Поэтому связанные электроны даже в одном и том же атоме вещества отличаются друг от друга энергией, формой электронной орбитали, положением электронной орбитали в атомном пространстве и направлением своего вращения вокруг собственной оси [12, 13]. Покинув свой атом из-за процессов его ионизации, эти различные по свойствам связанные электроны становятся свободными, образуя в межатомном пространстве «электронное облако» с усредненной объемной плотностью (концентрацией) n_{em} , численно составляющей для основных проводниковых материалов (меди, алюминия и др.) значение, равное около 10^{29} м⁻³ [12].

В настоящее время в экспериментальной физике ряд обнаруженных опытным путем новых электрофизических эффектов (например, наличие продольных и радиальных микрострат в «металлической плазме» при электрическом взрыве тонких металлических проводов в газовой среде и вакууме импульсным током большой плотности [16, 17], наличие на оси сильноточного плазменного канала при высоковольтном искровом разряде в газовой среде цилиндрических зон со значительно более высокой объемной плотностью свободных электронов (в тысячу и более раз) по сравнению с его периферийными зонами [18] и др.) не нашли своего теоретического обоснования на основе законов классической физики. В этой связи дальнейшее углубление на основе закономерностей квантовой физики наших представлений о характере продольно-радиального протекания волновых процессов в металлических проводниках цилиндрической конфигурации с электрическим током проводимости различных видов (постоянного, переменного и импульсного) и амплитудно-временных параметров (АВП), применяемых в современной электротехнике, электроэнергетике и технике больших импульсных токов, является актуальной научно-технической задачей. Одним из этапов в решении данной задачи является нахождение количества квантованных дебройлевских электронных полуволн усредненной длиной $\lambda_{ezm}/2$, размещенных вдоль указанных проводников с импульсным током и определяющих в них соответствующее усредненное число зон шириной Δz , отличающихся повы-

шенной объемной плотностью оказавшихся на них согласно законам квантовой физики свободных электронов и соответственно повышенной температурой.

Целью статьи является количественное определение расчетным и экспериментальным путем усредненного числа n_{0m} квантованных продольных электронных полувольт де Бройля длиной $\lambda_{ezm}/2$ в металлическом проводнике цилиндрической формы с импульсным аксиальным током большой плотности.

1. Постановка задачи. Рассмотрим случай, когда по тонкому прямолинейному круглому сплошному цилиндрическому проводнику радиусом r_0 и длиной $l_0 \gg r_0$ протекает аксиальный импульсный ток $i_0(t)$ произвольных АВП с большой усредненной по его поперечному сечению S_0 плотностью $\delta_0(t) = i_0(t)/S_0$. Воспользуемся одноэлектронным приближением Хартри-Фока [12, 13], не учитывающим электронно-ионных взаимодействий во внутренней кристаллической структуре проводника. Принимаем, что пространственно-временные распределения по продольной координате z и времени t дрейфующих свободных электронов в материале исследуемого проводника с импульсным током $i_0(t)$ будут приближенно подчиняться соответствующему одномерному волновому уравнению Шредингера [12, 13]. Требуется на основе квантовомеханического подхода в приближенном виде осуществить расчетную оценку усредненного числа n_{0m} квантованных продольных электронных полувольт де Бройля длиной $\lambda_{ezm}/2$ в рассматриваемом металлическом проводнике цилиндрической формы с импульсным аксиальным током $i_0(t)$, а также выполнить с использованием мощного высоковольтного генератора аperiodических импульсов тока экспериментальную проверку полученных результатов расчета числа n_{0m} квантованных продольных электронных полувольт де Бройля длиной $\lambda_{ezm}/2$ в этом проводнике.

2. Расчетная оценка усредненного числа квантованных продольных дебройлевских электронных полувольт в металлическом проводнике. Начнем с того, что в [1, 4, 6-9] было впервые в области теоретической электрофизики показано, что на длине l_0 металлического проводника с током проводимости $i_0(t)$ любого вида (постоянного, переменного или импульсного) всегда уместится целое квантовое число n_0 продольных электронных полувольт де Бройля, удовлетворяющее следующему соотношению:

$$n_0 = 2l_0 / \lambda_{ez} . \quad (4)$$

Тогда из (4) для искомой величины усредненного числа n_{0m} квантованных продольных электронных полувольт де Бройля в металле проводника следует:

$$n_{0m} = 2l_0 / \lambda_{ezm} , \quad (5)$$

где λ_{ezm} – усредненная длина квантованной продольной дебройлевской электронной волны в металлической структуре проводника с током проводимости.

Из (1) находим, что для величины λ_{ezm} в первом приближении будет справедливо выражение вида:

$$\lambda_{ezm} = h / (m_e v_{em}) , \quad (6)$$

где v_{em} – усредненная скорость дрейфа свободных электронов в однородном материале проводника.

Из атомной физики известно, что величину v_{em} в общем случае можно определить по формуле [12]:

$$v_{em} = \delta_{0m} / (\sqrt{2} e_0 n_{em}) , \quad (7)$$

где $\delta_{0m}/(2)^{1/2}$ – среднеквадратичное значение плотности импульса тока $i_0(t)$ в проводнике с ее амплитудой δ_{0m} ; $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль электрического заряда электрона; n_{em} – усредненная объемная плотность дрейфующих свободных электронов в проводнике.

В результате из (5)-(7) для усредненного числа n_{0m} квантованных продольных электронных полувольт де Бройля в металлическом проводнике с импульсным аксиальным током $i_0(t)$ различных АВП имеем:

$$n_{0m} = \sqrt{2} m_e \delta_{0m} l_0 / (e_0 n_{em} h) . \quad (8)$$

Укажем, что значение усредненной объемной плотности n_{em} дрейфующих свободных электронов в металле проводника, входящее в (8), равно концентрации N_0 атомов металла, умноженной на его валентность, определяемую числом неспаренных электронов на валентных электронных подболочках атомов металла проводника (например, для меди, цинка и железа валентность равна двум [12, 19]). Концентрация N_0 (м⁻³) атомов в металле проводника с его массовой плотностью d_0 (кг/м³) до протекания по нему импульсного тока $i_0(t)$ определяется формулой [12]:

$$N_0 = d_0 (M_a \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27})^{-1} , \quad (9)$$

где M_a – атомная масса материала проводника, входящая в периодическую систему химических элементов Д.И. Менделеева и практически равная массовому числу ядра атома металла проводника, исчисляемому в атомных единицах массы (при этом одна атомная единица массы численно равна $1,6606 \cdot 10^{-27}$ кг [13]).

В формуле (8) величины m_e , e_0 и h являются мировыми константами [12, 13], а характерные для того или иного проводника значения l_0 и δ_{0m} могут быть численно заданы или определены экспериментально.

Следует отметить то, что простое по форме записи расчетное соотношение (8) было получено достаточно строгим путем на основе известных квантовомеханических закономерностей, характерных для волнового распределения дрейфующих свободных электронов в металле проводника с током $i_0(t)$ [10].

Расчетная оценка по (8) усредненного числа n_{0m} квантованных продольных дебройлевских электронных полувольт в стальном проводе ($r_0=0,8$ мм; $l_0=320$ мм; $N_0=8,43 \cdot 10^{28}$ м⁻³; $n_{em}=16,86 \cdot 10^{28}$ м⁻³ [10]), испытывающем прямое воздействие аксиального аperiodического импульса тока временной формы 9 мс/160 мс ($\delta_{0m}=0,37$ кА/мм²), показывает, что в этом случае значение n_{0m} оказывается численно равным примерно 9.

Важно заметить, что аналогичный количественный результат для значения квантового числа n_{0m} в стальном проводе ($n=4$) с током $i_0(t)$ был ранее получен на основании расчетного соотношения вида [10]:

$$n_{0m} = n_m / \ln n_m , \quad (10)$$

где $n_m = 2n^2$ – максимальное значение квантового числа n_0 для волновых ψ -функций Шредингера, описывающих волновые распределения дрейфующих свободных электронов в металлическом проводнике.

При получении аналитического соотношения (10) было принято предположение о том, что максимальное число разновидностей свободных электронов (по их орбитальному l , магнитному m_l и спиновому m_s

квантовым числом) в металле проводника равно максимальному числу $2n^2$ связанных электронов в его атомах с одинаковым главным квантовым числом n .

3. Экспериментальная оценка усредненного числа квантованных продольных дебройлевских электронных полувольт в металлическом проводнике. Для опытной проверки полученных данных по выбору усредненного числа n_{0m} квантованных продольных дебройлевских электронных полувольт в металле проводника с импульсным аксиальным током $i_0(t)$ был использован мощный высоковольтный генератор ГИТ-С, формирующий на RL -нагрузке апериодический импульс тока с амплитудой I_{0m} до 1 кА временной формы $t_m/\tau_p=9$ мс/160 мс (t_m – время, соответствующее амплитуде I_{0m} тока; τ_p – длительность импульса на уровне $0,5I_{0m}$) и полной длительностью t_0 протекания по нагрузке (проводнику) до 1000 мс (рис. 1) [20]. В качестве опытного образца металлического проводника был выбран прямолинейный круглый сплошной стальной провод ($r_0=0,8$ мм; $l_0=320$ мм), снаружи имеющий тонкое цинковое покрытие толщиной $\Delta_0=5$ мкм (рис. 2). Наличие цинкового покрытия на указанном проводе было обусловлено авторским предположением, связанным с визуализацией особенностей процесса интенсивного джоулева нагрева провода на квантованных участках шириной Δz , имеющих тугоплавкое стальное основание (с температурой его плавления до 1536 °С [21]) и сравнительно легкоплавкое цинковое покрытие (с температурой его плавления до 419 °С и кипения до 907 °С [21]).

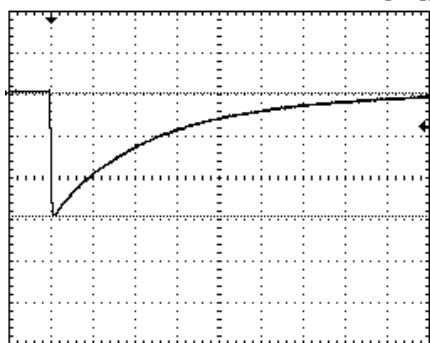


Рис. 1. Осциллограмма апериодического импульса тока $i_0(t)$ отрицательной полярности временной формы $t_m/\tau_p=9$ мс/160 мс, протекающего в разрядной цепи ГИТ-С с эквивалентом электрической нагрузки в виде плоского квадратного алюминиевого листа толщиной 2 мм и размером в плане 500 мм х 500 мм ($W_C \approx 400$ кДж; $U_C \approx -4,2$ кВ; $I_{0m} \approx -835$ А; $t_m \approx 9$ мс; $\tau_p \approx 160$ мс; $t_0 \approx 1000$ мс; масштаб по вертикали – 282 А/клетка; масштаб по горизонтали – 100 мс/клетка) [22]



Рис. 2. Общий вид круглого оцинкованного стального провода ($r_0=0,8$ мм; $l_0=320$ мм; $\Delta_0=5$ мкм; $S_0=2,01$ мм²), размещенного в воздухе над теплозащитным асбестовым полотном и жестко закрепленного в разрядной цепи генератора ГИТ-С ($W_C \approx 310$ кДж; $U_C \approx -3,7$ кВ) до протекания по нему апериодического импульса тока большой плотности [9]

В случае джоулева нагрева указанным импульсом тока в разрядной цепи генератора типа ГИТ-С (с запасаемой электрической энергией W_C до 570 кДж и зарядным напряжением U_C его импульсных конденсаторов типа ИМ2-5-140 до ± 5 кВ) исследуемого провода до температуры порядка 1500 °С и выше вдоль провода на квантованных участках шириной Δz возможно вскипание цинкового покрытия и плавление стального основания указанного провода. При этом становится реальным визуализация периодического образования вдоль провода на участках шириной Δz всплывающих сфер, состоящих из продуктов кипения цинкового покрытия и плавления стального основания провода. Забегая несколько вперед, можно отметить, что именно подобное электрофизическое явление и наблюдали исследователи-электрофизики на рабочем столе генератора типа ГИТ-С с выбранным тонким оцинкованным стальным проводом (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид рабочего стола мощного высоковольтного генератора ГИТ-С и теплового состояния оцинкованного стального провода ($r_0=0,8$ мм; $l_0=320$ мм; $\Delta_0=5$ мкм; $S_0=2,01$ мм²) с четырьмя «горячими» квантованными зонами шириной около $\Delta z=7$ мм и двумя «холодными» продольными участками (перешейками) шириной около 27 мм после воздействия на исследуемый провод апериодического импульса тока $i_0(t)$ временной формы $t_m/\tau_p=9$ мс/160 мс большой плотности ($I_{0m} \approx -745$ А; $|\delta_{0m}|=0,37$ кА/мм²; $n_{0m}=9$) [9]

На рис. 4 приведена осциллограмма импульса тока $t_m/\tau_p=9$ мс/160 мс, примененного при исследовании квантово-волновой природы тока $i_0(t)$ в проводе.

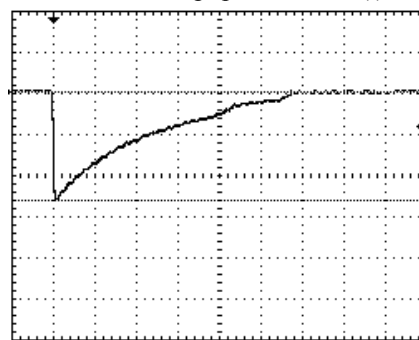


Рис. 4. Осциллограмма апериодического импульса тока $i_0(t)$ отрицательной полярности временной формы $t_m/\tau_p=9$ мс/160 мс большой плотности ($I_{0m} \approx -745$ А; $|\delta_{0m}|=0,37$ кА/мм²), разрушающего оцинкованный стальной провод ($r_0=0,8$ мм; $l_0=320$ мм; $\Delta_0=5$ мкм; $S_0=2,01$ мм²), масштаб по вертикали – 282 А/клетка; масштаб по горизонтали – 100 мс/клетка) [22]

Согласно [1-11] продольные участки шириной Δz рассматриваемого провода принято называть относи-

тельно «горячими», а периодически расположенные между его зонами шириной Δz продольные участки (перешейки) – «холодными». При этом укажем, что в [7, 9] было показано, что температуры джоулевого нагрева этих продольных участков круглого металлического провода током проводимости $i_0(t)$ могут отличаться до 3,5 раз. Именно в этом и заключается главная опасность термического действия больших аварийных токов КЗ на кабельно-проводниковую продукцию (КПП) объектов электроэнергетики, производственных и жилых помещений. Из-за локализации дрейфующих свободных электронов в токоведущих частях КПП на их узких продольных участках шириной Δz , составляющей при КЗ не более (3-10) мм [10], может происходить их быстрый интенсивный нагрев аварийным током до температуры воспламенения изоляции КПП (до 450 °С и выше) [23]. На наш взгляд, это обстоятельство может являться главной причиной многих пожаров из-за наступления возгорания при внезапных КЗ силовой КПП не только на объектах электроэнергетики, но и в быту граждан, пользующихся электрическими сетями переменного (постоянного) тока. В этой связи не только чисто научные, но и прикладные интересы могут мотивировать ученых-электрофизиков при решении сформулированной выше квантовомеханической задачи и соответственно достижению поставленной ранее цели.

Основные схемы построения, технические характеристики и принципы работы высоковольтного генератора типа ГИТ-С были изложены в [20, 24-26]. Там же были описаны и регулярно поверяемые в государственной метрологической службе средства высокопрецизионной измерительной техники (шунты, осциллографы и др.), используемые в составе генератора ГИТ-С при опытном определении АВП протекающего по испытываемому проводу импульса тока $i_0(t)$. Из полученных с помощью указанного генератора ГИТ-С опытных результатов и данных рис. 3 следует, что при протекании вдоль биметаллического провода ($r_0=0,8$ мм; $l_0=320$ мм) с тонким наружным цинковым покрытием ($\Delta_0=5$ мкм) и стальным основанием мощного аperiodического импульса тока отрицательной полярности ($|\delta_{0m}| \approx |I_{0m}|/S_0 \approx 0,37$ кА/мм²) наблюдается такое волновое продольное распределение дрейфующих свободных электронов в металле провода, которое потенциально приводит к периодическому возникновению вдоль провода девяти ярко светящихся «горячих» продольных зон шириной примерно $\Delta z=7$ мм, принимающих сферообразную форму. Так как середина каждой из таких «горячих» продольных зон провода соответствуют амплитуды квантованной волновой ψ -функции Шредингера ($n_0=9$) [8], то им же (серединам зон шириной Δz) будут соответствовать и свои квантованные дебройлевские электронные полуволны, характеризующиеся квантовым числом $n_{0m}=9$.

Необходимо отметить, что из-за различных условий продольного теплоотвода от периодически возникающих вдоль исследуемого тонкого цилиндрического стального провода относительно «горячих» и «холодных» продольных участков с геометрическим шагом, примерно равным $\lambda_{ezm}/2 \approx 34$ мм без учета двух крайних «холодных» и прямо примыкающих к

болтовым соединениям участков (см. рис. 3), в выполненном эксперименте пять «горячих» и восемь «холодных» продольных участков оцинкованного стального провода подверглись полной сублимации [21]. Нарушение металлической проводимости испытываемого провода, вызванное интенсивным джоулевым нагревом его токонесущей части, начинается момента времени, соответствующего примерно 380 мс (см. рис. 4). Из данных рис. 4 видно, что при времени от начала протекания по проводу рассматриваемого импульсного тока $i_0(t)$, равном около 570 мс, наступает полное разрушение металлической структуры провода и прекращение протекания тока проводимости по проводу.

Полученные результаты в ходе выполненного высокопрецизионного и высокотемпературного эксперимента с применением мощного высоковольтного генератора ГИТ-С и указанного оцинкованного стального провода однозначно указывают на работоспособность рекомендуемого квантовомеханического соотношения (8) при приближенном выборе усредненного числа n_{0m} квантованных продольных электронных полуволн де Бройля в цилиндрическом проводнике с импульсным аксиальным током $i_0(t)$ различных АВП.

Выводы.

1. Для оценочного прогнозирования возможных мест наступления продольной локализации дрейфующих свободных электронов на узких участках шириной Δz токонесущих частей силовых проводов и кабелей объектов электроэнергетики, производственных и жилых помещений, проявляющейся наиболее сильно в аварийных режимах работы КПП с токами КЗ и большими плотностями тока, предложено новое квантовомеханическое расчетное соотношение (8).

2. Экспериментальная проверка с помощью мощного высокопрецизионного высоковольтного оборудования и опытного образца оголенного оцинкованного стального провода диаметром 1,6 мм и длиной 320 мм (при модуле амплитуды плотности протекающего в течение до 570 мс по проводу аperiodического импульса тока около $\delta_{0m}=0,37$ кА/мм² и ширинах Δz каждого из продольных участков локализации в нем дрейфующих свободных электронов до 7 мм) предложенного соотношения (8), определяющего при указанном численном значении δ_{0m} усредненное число $n_{0m}=9$ квантованных продольных дебройлевских электронных полуволн длиной $\lambda_{ezm}/2 \approx 34$ мм в металлическом проводе, подтвердила его работоспособность.

3. Для обеспечения пожарной безопасности силовой КПП в аварийных режимах ее работы, сопровождающихся протеканием по токонесущим частям проводов и кабелей переменных токов КЗ с их большими плотностями (200 А/мм² и более), необходимых в соответствующих нормативных документах, определяющих условия надежной эксплуатации КПП в промышленных и бытовых условиях, учитывать особенности влияния волнового характера распределения вдоль металлических жил (оболочек) КПП дрейфующих в них свободных электронов на возможность появления в токонесущих частях КПП коротких продольных зон шириной Δz с аномально повышенной концентрацией таких электронов и соответственно температурой для указанных режимов работы КПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Волновое распределение свободных электронов в проводнике с электрическим током проводимости. *Электротехника*, 2005, № 7, С. 25-33.
2. Баранов М.И. Энергетический и частотный спектры свободных электронов проводника с электрическим током проводимости. *Электротехника*, 2006, № 7, С. 29-34.
3. Баранов М.И. Волновой электронный пакет проводника с электрическим током проводимости. *Электротехніка і електромеханіка*, 2006, № 3, С. 49-53.
4. 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.
5. Баранов М.И. Волновое радиальное распределение свободных электронов в цилиндрическом проводнике с переменным электрическим током. *Технічна електродинаміка*, 2009, № 1, С. 6-11.
6. Баранов М.И. Теоретические и экспериментальные результаты исследований по обоснованию существования в микроструктуре металлического проводника с током электронных дебройлевских полувольт. *Электротехніка і електромеханіка*, 2014, № 3, С. 45-49. doi: 10.20998/2074-272X.2014.3.09.
7. Баранов М.И. Особенности нагрева тонкого биметаллического проводника большим импульсным током. *Электричество*, 2014, № 4, С. 34-42.
8. Баранов М.И. Квантово-волновая природа электрического тока в металлическом проводнике и ее некоторые электрофизические макропроявления. *Электротехніка і електромеханіка*, 2014.– №4.– С.25-33. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.05.
9. Баранов М.И. Основные характеристики волнового распределения свободных электронов в тонком металлическом проводнике с импульсным током большой плотности. *Электричество*, 2015, № 10, С. 20-32.
10. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 3-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с.
11. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 3-х томах. Том 2, Кн. 2: Теория электрофизических эффектов и задач. – Харьков: Точка, 2010. – 407 с.
12. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
13. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1990. – 624 с.
14. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 4-х томах. Том 3. – Харьков: ФЛП Панов А.Н., 2016. – 415 с.
15. Baranov M.I. Refined selection of allowable cross-sections of electrical conductors and cables in the power circuits of industrial electrical equipment taking into account emergency operating modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.3, pp. 37-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.06.
16. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии / Под ред. В.Н. Карнюшина. – Минск: Наука и техника, 1983. – 151 с.
17. Соболев Н.Н. Исследование электрического взрыва тонких проволок. *Журнал экспериментальной и теоретической физики*, 1947, Том 17, №11, С. 986-997.
18. Ivanovskii A.V., Spirov G.M., Dudai P.V., Volkov A.A., Luk'yanov N.B., Solov'ev A.A., Volkova T.I., Lysenko V.P. A test bench for studying the mechanisms of breakdowns of insulating gaps by short voltage pulses. *Instruments and Experimental Techniques*, 2003, vol. 46, no. 4, pp. 494-501. doi: 10.1023/A:1025182031922.
19. Солимар Л., Уолш Д. Лекции по электрическим свойствам материалов: Пер. с англ. / Под ред. Баскакова С.И. – М.: Мир, 1991. – 504 с.
20. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of engineering objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/s0020441208030123.
21. Кухлинг Х. Справочник по физике / Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1982. – 520 с.
22. Baranov M.I., Rudakov S.V. Calculation-experimental method of research in a metallic conductor with the pulse current of electronic wavepackages and de Broglie electronic half-waves. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.6, pp. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.08.
23. Электрические кабели, провода и шнуры: Справочник / Н.И. Белоруссов, А.Е. Саакян, А.И. Яковлева; Под ред. Н.И. Белоруссова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
24. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulsed current of artificial lightning. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.4, pp. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.08.
25. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. The coaxial shunt for measurement of current pulses of artificial lightning with the amplitude up to ±220 kA. *Instruments and Experimental Technique*, 2018, vol.61, no.4, pp. 501-505. doi: 10.1134/S0020441218030156.
26. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.5, pp. 44-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.5.08.

REFERENCES

1. Baranov M.I. Wave distribution of free electrons in conductor with electric current of the conductivities. *Russian Electrical engineering*, 2005, no.7, pp. 25-33. (Rus).
2. Baranov M.I. Energy and frequency specters of the free electrons conductor with electric current conduction. *Russian Electrical engineering*, 2006, no.7, pp. 29-34. (Rus).
3. Baranov M.I. Wave electronic package of a conductor with electric conduction current. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.3, pp. 49-53. (Rus).
4. Baranov M.I. New physical mechanisms and approaches in the study of the formation and distribution of the electric conduction current in the conductor. *Technical Electrodynamics*, 2007, no.1, pp.13-19. (Rus).
5. Baranov M.I. Characteristic radial distribution of free electrons in a cylindrical conductor with varying electric current. *Technical Electrodynamics*, 2009, no.1, pp. 6-11. (Rus).
6. Baranov M.I. Theoretical and experimental results of research into explanation of de Broglie half-wave existence in the microstructure of an active metallic conductor. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.3, pp. 45-49. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2014.3.09.
7. Baranov M.I. Features heating thin bimetallic conductor large pulse current. *Elektrichestvo*, 2014, no.4, pp. 34-42. (Rus).
8. Baranov M.I. Quantum-wave nature of electric current in a metallic conductor and some of its electrophysical macrophenomena. *Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.4, pp. 25-33. doi: 10.20998/2074-272X.2014.4.05.
9. Baranov M.I. The main characteristics of the wave distribution of free electrons in a thin metallic conductor with a pulse current of high density. *Elektrichestvo*, 2015, no.10, pp. 20-32. (Rus).
10. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografiya v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teoriya elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 2 vols. Vol. 2, book. 1: Theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2009. 384 p. (Rus).

11. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki. Monografiya v 3kh tomakh. Tom 2, Kn. 2: Teoriia elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics. Monograph in 3 Vols. Vol.2, Book 2. A theory of electrophysical effects and tasks]. Kharkiv, Tochka Publ., 2010. 407 p. (Rus).
12. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
13. Javorskij B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike* [Handbook of physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 624 p. (Rus).
14. Baranov M.I. *Antologija vydajushihhsja dostizhenij v nauke i tehnike: Monografija v 3-h tomah. Tom 3* [An anthology of the distinguished achievements in science and technique: Monograph in 3 volumes. Volume 3]. Kharkiv, PhPB Panov A.N. Publ., 2016. 415 p. (Rus).
15. Baranov M.I. Refined selection of allowable cross-sections of electrical conductors and cables in the power circuits of industrial electrical equipment taking into account emergency operating modes. *Electrical engineering & electromechanics*, 2019, no.3, pp. 37-43. doi: 10.20998/2074-272X.2019.3.06.
16. Stolovich N.N. *Elektrovzryvnye preobrazovateli energii* [Electroexplosion energy converters]. Minsk, Nauka & Tehnika Publ., 1983. 151 p. (Rus).
17. Sobolev N.N. The study of electrical explosion of thin wires. *Journal of experimental and theoretical physics*, 1947, Vol.17, no.11, pp. 986-997. (Rus).
18. Ivanovskii A.V., Spirov G.M., Dudai P.V., Volkov A.A., Luk'yanov N.B., Solov'ev A.A., Volkova T.I., Lysenko V.P.. A test bench for studying the mechanisms of breakdowns of insulating gaps by short voltage pulses. *Instruments and Experimental Techniques*, 2003, vol. 46, no. 4, pp. 494-501. doi: 10.1023/A:1025182031922.
19. Solymar L., Walsh D. *Lekcii po elektricheskim svojstvam materialov* [Lectures on the electrical properties of materials]. Moscow, Mir Publ., 1991. 504 p. (Rus).
20. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A current generator of the artificial lightning for full-scale tests of engineering objects. *Instruments and Experimental Technique*, 2008, no.3, pp. 401-405. doi: 10.1134/S0020441208030123.
21. Kuhlning H. *Spravochnik po fizike. Per. s nem.* [Dictionary on Physics. Translated from German]. Moscow, Mir Publ., 1982. 520 p. (Rus).
22. Baranov M.I., Rudakov S.V. Calculation-experimental method of research in a metallic conductor with the pulse current of electronic wavepackages and de Broglie electronic half-waves. *Electrical engineering & electromechanics*, 2016, no.6, pp. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2016.6.08.
23. Belorussov N.I., Saakjan A.E., Jakovleva A.I. *Elektricheskie kabeli, provoda i shmury. Spravochnik* [Electrical cables, wires and cords. Directory]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 536 p. (Rus).
24. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The tooling in Ukraine of model tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulsed current of artificial lightning. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.4, pp. 45-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.4.08.
25. Baranov M.I., Kniaziev V.V., Rudakov S.V. The coaxial shunt for measurement of current pulses of artificial lightning with the amplitude up to ± 220 kA. *Instruments and Experimental Technique*, 2018, vol.61, no.4, pp. 501-505. doi: 10.1134/S0020441218030156.
26. Baranov M.I., Buriakovskiy S.G., Rudakov S.V. The metrology support in Ukraine of tests of objects of energy, aviation and space-rocket engineering on resistibility to action of pulses of current (voltage) of artificial lightning and commutation pulses of voltage. *Electrical engineering & electromechanics*, 2018, no.5, pp. 44-53. doi: 10.20998/2074-272X.2018.5.08.

Поступила (received) 19.11.2019

Баранов Михаил Иванович¹, д.т.н., гл.н.с.,
Рудаков Сергей Валерьевич², к.т.н., доц.,
¹ НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,
тел/phone +380 57 7076841,
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

² Национальный университет гражданской защиты Украины,
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,
тел/phone +38 057 7073438,
e-mail: serg_73@i.ua

M.I. Baranov¹, S.V. Rudakov²

¹ Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

² National University of Civil Protection of Ukraine,
94, Chernyshevska Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

Calculation-experimental determination of the average number of quantized longitudinal electron de Broglie half waves in a cylindrical conductor with pulsed axial current.

Purpose. Implementation of calculation-experimental determination of average number n_{0m} of the quantized longitudinal electron de Broglie half waves of length $\lambda_{em}/2$ in the metal cylindrical conductor with the pulsed axial current of high density.

Methodology. Scientific bases of theoretical electrophysics and quantum physics, theoretical bases of the electrical engineering, electrophysics bases of technique of high-voltage and high pulsed currents. **Results.** The results of calculation-experimental estimations of average number n_{0m} of the quantized longitudinal electron de Broglie half waves in the round continuous zinked steel wire of radius 0.8mm and of length 320 mm with aperiodic pulsed axial current $i_0(t)$ of temporal shape 9 ms/160 ms of high density (at its amplitude of $\delta_{0m}=0.37$ kA/mm²). It is shown that in examined case the numeral value of the average quantized number from data of calculation and experiment makes $n_{0m}=9$, and test average length of quantized longitudinal electron de Broglie half waves in the indicated steel wire appears approximately equal to $\lambda_{em}/2 \approx 34$ mm. Electrophysical results are confirmed during the high current high temperature experiment conducted by a powerful high-voltage equipment calculation information on the choice of average value of quantized number n_{0m} for longitudinal «hot» areas of the width Δz of the wire, different anomalous enhanceable concentration of drifting lone electrons and accordingly temperature of Joule heating. **Originality.** On the basis of the known conformities to the law of atomic and quantum physics new quantum-mechanical calculation correlation is obtained for determination in a metallic conductor with axial current of conductivity $i_0(t)$ of different type (direct, alternating and pulsed) of average number n_{0m} of the quantized longitudinal electron de Broglie half waves and accordingly longitudinal «hot» areas of the width Δz of periodic localization along the conductor of drifting lone electrons. **Practical value.** Obtained results allow to make an evaluation prognosis on finding of possible places of longitudinal periodic localization of drifting lone electrons on narrow areas of the width Δz of current-carrying parts of power wires and cables of objects of electrical power energy, production and dwellings apartments, showing up most strongly (expressed) in malfunctions of operation of cable-conductor products with the currents of short-circuit and high current density. References 26, figures 4.

Key words: metal conductor, pulsed current, calculation-experimental determination of the average number of quantized longitudinal electron de Broglie half waves and electron localization zones in a conductor.