

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №4 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-4>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/78PVN415.pdf>

DOI: 10.15862/78PVN415 (<http://dx.doi.org/10.15862/78PVN415>)

УДК 530.1

Кочетков Андрей Викторович

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Россия, г. Пермь¹

Профессор

Доктор технических наук

E-mail: soni.81@mail.ru

Федотов Петр Викторович

ООО «Научно-технический центр технического регулирования»

Россия, г. Саратов

Инженер

E-mail: klk50@mail.ru

Особенности преподавания терминологии и постановки проблематики электрического тока

¹ 410022, г. Саратов, ул. Азина, д. 38 «В», кв. 4

Аннотация. В статье авторы анализируют общепринятое определение электрического тока. Авторы утверждают, что более адекватно, исходя из имеющихся опытных данных, другое определение электрического тока. Принятое сейчас определение электрического тока, как направленное движение электронов допустимо только для постоянного тока, т.к. направление движения электронов не меняется. Для переменных токов, когда направление движения зарядов меняется каждый полупериод, такое определение не удачно. Это касается токов высокой частоты и сверхвысокой частоты (СВЧ). Медленное движение зарядов, определяемое из опытов по гальванике, убеждают, что за полупериод колебаний тока, электроны успевают пройти очень малое расстояние, например при СВЧ частотах расстояние, пройденное зарядом за полупериод, составляет порядка нескольких нанометров. В этом случае необходимо говорить не о направленном, а о возвратно поступательном движении зарядов. Тем не менее, «ток идет». Необходимо говорить не о направленном движении зарядов, а о направленном движении энергии вдоль цепи.

Необходимо признать, что электрическим током является направленное движение энергии возбуждения электронов. Предложенный подход не противоречит ни одному имеющемуся эксперименту, в т.ч. и эксперименту Толмена-Стюарта, а имеет некоторые достоинства квантовой зонной теории электричества, сохраняя при этом классическую простоту и наглядность.

Ключевые слова: электрический ток; опыт Толмена-Стюарта; электроны проводимости; свободные электроны в металлах; классическая электронная теория Друде; квантовая электронная теория Зоммерфельда; зонная теория электричества.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Кочетков А.В., Федотов П.В. Особенности преподавания терминологии и постановки проблематики электрического тока // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №4 (2015)
<http://naukovedenie.ru/PDF/78PVN415.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/78PVN415

Кажется, что ответ на вопрос «что такое электрический ток?» знают все. По крайней мере, во всех учебниках по электричеству написано что-то подобное: «Электрический ток — это направленное (упорядоченное) движение заряженных частиц» [1, с. 174].

Такое определение кажется убедительным и, главное, достаточным.

Но это только на первый взгляд. При внимательном рассмотрении этого явления возникает два вопроса. Во-первых, как движутся заряженные частицы при переменном токе? Второй вопрос, каким образом направленное движение заряженных частиц трансформируется в разнообразные виды энергии, в т.ч. и в механическую энергию движения электроприводов?

Если внимательно рассмотреть эти вопросы, то оказывается, что современная электродинамика не в состоянии ответить на эти вопросы.

Рассмотрим сначала движение заряженных частиц (электронов) в металлическом проводе при переменном токе.

Уже при низких частотах характер движения электронов противоречит принятому определению. Так, при частоте всего в 50 Гц электроны движутся $1/100$ с в прямом направлении, а следующие $1/100$ с в обратном. Воспользовавшись значениями скорости движения электронов в проводнике $v \approx 6 \cdot 10^{-5}$ м/с [2], получим, что при токе промышленной частоты электроны качаются около положения равновесия с амплитудой $6 \cdot 10^{-7}$ м или 0,6 мкм. Ни о каком «направленном движении» электронов речи быть не может. Но, в тоже время ток «течет» и потребители, расположенные за тысячи км от источника генерации, получают энергию для собственных нужд. Это только при промышленной частоте в 50 Гц. При частоте в 1 МГц амплитуда колебаний составляет всего $3 \cdot 10^{-11}$ м или 0,3 ангстрема, что даже меньше размеров атома.

Т.о. необходимо новое определение, что такое электрический ток. Электрический ток — это передача вдоль проводника энергии электрического поля. Энергия электрического тока — это энергия колебаний заряженных частиц. При электрическом токе основное значение имеет не самодвижение электронов, а движение энергии их колебаний. Именно эта энергия и заставляет вращаться валы электромоторов, а вовсе не какое то «направленное движение» электронов. Другими словами можно сказать: электрический ток — это способ передачи энергии с использованием проводников.

Направленное (поступательное) движение имеет значение только в гальванике. При гальванических процессах происходит передача электронов в окислительно-восстановительных химических реакциях и сама по себе энергия не имеет решающего значения, главное это количество отнятых и отданных электронов. Именно поэтому во всех гальванических процессах применяется только постоянный ток. А вот при сварке существенное значение имеет не количество перемещенных зарядов, а энергия, необходимая для расплавления металла, поэтому применяется как постоянный, так и переменный ток.

Еще характернее пример с электродвигателями. Даже в двигателях «постоянного тока» ток в обмотках переключается коллекторами либо вентилями, но в любом случае в обмотках всех без исключения электродвигателей направление тока переменное.

Есть и другой способ рассмотреть тот же самый случай. Воспользуемся интернет-ресурсом КГУ [2]. В нем говорится, что скорость электронов $v \approx 6 \cdot 10^{-5}$ м/с рассчитана для провода сечением 1 мм^2 и с током 1 А. Предположим, что длина провода цепи 1 м, тогда можно подсчитать энергию всех электронов, проводящих ток.

Сопротивление участка цепи, состоящего из 1 м медного провода сечением 1 мм^2 , равно 0,018 Ом. По закону Ома, напряжение на концах провода 0,018 В.

Электрическая мощность определяется по известной формуле и равна 0,018 Вт. За одну секунду выделяется энергия 0,018 Дж или $11 \cdot 10^{14}$ эВ.

Подсчитаем энергию движения переносчиков электричества.

Объем меди в проводнике длиной 1 м и сечением 1 мм^2 , равен $10^{-6} \text{ м}^3 = 1 \text{ см}^3$. При удельном весе меди равном $8,96 \text{ г/см}^3$, вес провода составляет 8,96 г. Молярная масса меди – 63,5 грамм/моль, значит, в образце содержится 0,141 г*атома меди или $0,85 \cdot 10^{23}$ атомов меди. С учетом двухвалентности меди, свободных электронов, переносящих электрический ток на выделенном участке цепи, будет примерно $1,7 \cdot 10^{23}$ электронов. Суммарный заряд «свободных» электронов $2,72 \cdot 10^4$ Кл. По известной формуле переноса зарядов в электростатическом поле можно рассчитать напряжение поля, необходимое для получения указанной выше энергии ($0,011 \cdot 10^{17}$ эВ). Простым делением энергии на полный заряд получим $4,04 \cdot 10^{10}$ В.

Обратно, зная полный заряд переносимый электрическим током ($2,72 \cdot 10^4$ Кл) и напряжение поля (0,018 В), получим энергию переноса, она будет равна 489,6 Дж.

Попробуем еще один способ расчета энергии. Если скорость электронов в проводнике $v \approx 6 \cdot 10^{-5}$ м/с, а масса электрона $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, то отсюда следует, что совокупная кинетическая энергия всех свободных электронов в проводнике $278 \cdot 10^{-18}$ Дж.

В результате простых расчетов получили три значения энергии «свободных» электронов в образце меди при условии протекания тока. Причем эти значения различаются не в разы, а на порядки.

Такие различия невозможно объяснить тем, что не учтены какие-то несущественные второстепенные факты. Отметим, что все использованные формулы верные, каждая из них многократно подтверждена всеми имеющимися опытами. Но, сведенные в одно место, а именно при попытке объяснить электрический ток направленным движением электронов, дают полный диссонанс.

Правда, формулы расчета кинетической энергии и энергии частиц в электрическом поле априори считаются равными и используются в физике ускорителей для расчета скорости электронов в ускоряющем поле. В случае электрического тока они различаются на четырнадцать порядков. Не говоря уже об энергии, полученной по формуле Джоуля-Ленца, которая отличается от наименьшей энергии, полученной из формул для ускорителей еще на шесть порядков.

При этом никаких других материальных носителей энергии электрического тока не предполагается, значит, именно электроны являются носителями электрического тока.

Такие разногласия не могут быть объяснены второстепенными факторами, значит ошибка в принципе.

Все несуразности могут быть сняты, если принять гипотезу, что электрический ток – это не поступательное движение электронов, а поступательное движение **энергии** электронов. Отсюда следует возможная формулировка – электрический ток – это передача **энергии возбуждения** электронов. Причем совершенно не обязательно, чтобы электроны покидали пределы своего атома, достаточно, чтобы они колебались в пределах атома, при этом энергия колебаний должна иметь возможность передаваться соседним атомам.

Основополагающим экспериментом, якобы подтверждающим движение электронов в проводнике, как основой электрического тока считается эксперимент Толмена и Стюарта, проведенный в 1916 г.

Разберем этот опыт подробно. Описание эксперимента опубликовано в журнале *Physical Review* [3]. Там же дается физическое обоснование и методика проведения эксперимента.

Разбор статьи ставит больше вопросов, чем дает ответов. Теоретическое обоснование содержит утверждение, что в процессе эксперимента проверяется соответствие результатов формуле (формула 11 в тексте статьи):

$$Q = \frac{(m - k)v}{RF},$$

где Q – заряд, перемещаемый под действием механических сил при торможении проводника; m – масса электрона; k – подвижность электронов, v – скорость проводника с которой крутится катушка перед остановкой; R – сопротивление электрической цепи; F – механические силы, действующие на электроны в момент остановки.

Т.е. основным объектом проверки якобы являлось количество электричества (заряд), которое проходило через измерительный прибор. Но в качестве измерительного прибора использовался гальванометр. Надо понимать, что ни один гальванометр не измеряет количество электричества, все гальванометры измеряют только ток, текущий через цепь, содержащую гальванометр. Вначале принимается на веру гипотеза, что электрический ток – это есть движение зарядов, а затем постулат движения зарядов якобы подтверждается тем, что в цепи существует электрический ток.

Легко видеть, что если согласно первой части данной статьи электрический ток – это передача возмущения колебательного движения зарядов, которые, на самом деле, никуда не движутся, то опыт Толмена-Стюарта полностью подтверждает и эту точку зрения.

В этом случае интерпретация опыта следующая: резкая остановка проводника возбуждает колебательные движения зарядов в катушке, а возмущения от этих колебаний передаются во внешнюю цепь и воспринимаются гальванометром как электрический ток.

Второе. При обсуждении опыта Толмена-Стюарта принимается априори, что при резком торможении проводника по инерции движутся только электроны, а ядра атомов, которые имеют в массу инерции несколько тысяч раз больше электронов² спокойно стоят на месте и в процессе создания электрического тока участия не принимают.

Последнее. При описании опыта Толмена-Стюарта не указывается, а какого рода ток, на самом деле, получался: переменный или постоянный? Можно подумать, что постоянный, т.к. легко представить, что электроны, никак не связанные с атомами при резкой остановке, продолжали свой путь по инерции.

На самом деле все не так. Ток был импульсный. В описании экспериментальной установки Толмен и Стюарт, специально оговаривали, что катушка, на которой была намотана проволока, которая и подвергалась ускорению и торможению изготовлена из дерева (березы). Первоначально каркас катушки изготовлялся из алюминия, но при этом получались паразитные токи, которые смазывали результаты экспериментов. Авторы эксперимента не указывают причины паразитных токов, но их легко угадать. Источником паразитных токов являлась электромагнитная индукция токов, возбуждаемых в алюминиевом каркасе.

² Масса ядра меди 63,65 а.е., или в 117498 раз тяжелее электрона (прим. авт.).

Но если все токи были постоянными, то никаких паразитных токов бы не возбуждалось³. Авторы эксперимента указывали, что остановка раскрученной катушки с проводом осуществлялась за доли секунды, а электрический ток наблюдался в течение примерно 10 с. Речь не шла об однократном коротком импульсе, а именно о пакете импульсов тока. На присутствие импульсного тока указывает и наличие специальной катушки в цепи, существование которой обычно упускают в современной литературе, при описании схемы опыта Толмена-Стюарта. Приводим рисунок из статьи Толмена-Стюарта (см. рис. 1). На рисунке указаны: вращающаяся катушка (испытательная), гальванометр и дополнительная катушка (F), включенная последовательно с испытательной катушкой.



Fig. 1.

Рис. 1. Схема эксперимента Толмена-Стюарта из оригинала статьи [3]

В современной терминологии такие катушки называют дросселем, и служат они именно для сглаживания пульсирующего тока. Получается, что в опытах Толмена-Стюарта возбуждались носители тока, и это возбуждение выражалось и улавливалось в виде электрического тока, но никаких сведений, о том, что при электрическом токе наблюдалось направленное поступательное движение электронов не имеется. Т.о., что такое электрический ток – вопрос остается открытым.

Нельзя обойти и вопрос омического сопротивления проводников. В Берклеевском курсе физики автор второго тома подробно останавливается на этом вопросе. Рассматривая природу сопротивления электрическому току и причины действия закона Ома, автор пишет: «Рассмотрим газ, состоящий из нейтральных атомов, положительных ионов и отрицательных ионов, с плотностью близкой к плотности при нормальных условиях, т.е. около 10^{19} атомов/см³. предположим, что преобладают нейтральные атомы, а положительные и отрицательные ионы рассеяны между ними. Расстояние между частицами, будь то нейтральные или заряженные, много больше радиусов атомов или ионов, поэтому большую часть времени ионы не находятся в состоянии столкновения» [4, с. 130].

Что можно сказать по поводу представленной теории? Она адекватно описывает проводимость ионизированных газов. На это указывает плотность упаковки атомов, соответствующее числу Лошмидта $N_L = 2,68 \cdot 10^{19}$ атомов/см³. Но число Лошмидта соответствует числу атомов идеального газа при н.у. Но никак не плотности атомов в твердых телах или металлах. Элементарные расчеты показывают, что плотность упаковки атомов, как приведено выше $0,85 \cdot 10^{23}$ атомов/см³. Что в 10000 раз плотнее, чем в теории, представленной Э. Парселом. Это означает, что атомы практически полностью занимают то пространство, в котором должны свободно двигаться электроны проводимости. В такой ситуации впору говорить не о том, что электроны летают между атомами и ионами, изредка испытывая столкновения, а о том, что они с трудом протискиваются между плотно упакованными атомами и ионами.

³ Электромагнитная индукция возбуждает ток во вторичной цепи только при наличии переменных токов в первичной цепи. В данном случае роль первичной цепи играл корпус катушки (из алюминия), а роль вторичной цепи играла обмотка из медного провода (прим. авт.).

Есть еще более сильное возражение против т.н. «свободных электронов». В гипотезе о том, что электрический ток образуют «свободные электроны», почему-то опускается из вида тот момент, что т.н. «свободные электроны» - это валентные электроны, которые и удерживают ядра атомов в кристаллической решетке. Получается парадокс, что свободные электроны удерживают атомы в кристаллах, а сами при этом совершенно ни к чему не привязаны и могут свободно перемещаться по всему объему металла, образуя «электронный газ». В таком случае, попробуйте удержать тело газом, тогда легко понять, что крепление из газа изготовить не удастся.

Тем не менее свойства твердых тел и состоят в том, что атомы образуют кристаллы, в которых ядра атомов располагаются в узлах, на строго определенных расстояниях друг от друга, и удерживают атомы в кристалле именно валентные электроны. По теории в учебнике, «электронный газ» не оказывает никакого давления на ядра атомов, а как бы существует сам по себе. Но если электроны осуществляют связь атомов в кристалле, то и сами они являются крепко привязанными к атомам. Т.е., концепция электронного газа, образуемого свободными электронами, т.н. *классическая электронная модель*, предложенная Паулем Друде [5, с. 108] в 1900 г., не выдерживает никакой критики. Классическая модель оказалась плодотворной в некотором смысле, так она достаточно неплохо, на качественном уровне объясняет некоторые эффекты. Но явно противоречит некоторым экспериментам, например, опытным данным по теплопроводности металлов. Поэтому в 1928 г. Зоммерфельд предложил *квантовую электронную теорию* проводников. «В большинстве случаев модель Зоммерфельда представляет собой просто модель классического электронного газа Друде с единственным отличием: распределение электронов по скоростям описывается статистикой Ферми-Дирака, а не Максвелла-Больцмана» [6, с. 45].

Для того, чтобы заменить классический электронный газ на квантово-механический, необходимо внести в процесс обучения абстрактно-математические методы квантовой механики. Т.е., квантовая модель теряет главные достоинства модели Друде – простоту и наглядность. Хотя и сохраняет главный недостаток – кинетическую теорию свободных электронов. Следующим шагом по пути отхода от наглядности послужила *зонная теория*, основанная на теории коллективных колебаний в кристаллах Борна-Кармана [7, с. 296]. В этой теории полностью отказались от кинетики и свободных электронов, но т.о., теория полностью утратила свою наглядность. Именно зонная теория оказалась самой плодотворной для практики.

Но, т.к., она полностью утратила наглядность, то преподавание этой теории ведется на математически-абстрактном уровне: «подставим – получим». При этом математический аппарат, применяемый в зонной теории один из самых сложных, поэтому в технических ВУЗах ограничиваются преподаванием классической теории Друде, несмотря на все её недостатки.

На самом деле электроны не летают между ионами металла, а в основном находятся в связанном состоянии, и только иногда под действием электромагнитного поля могут за короткое время перескочить из потенциальной ямы одного атома в потенциальную яму другого. Учитывая обычные скорости электронов в атоме порядка 10^6 м/с и расстояния между атомами в твердых телах порядка 10^{-9} м можно утверждать, что на переход от одного атома к другому у электрона уходит время порядка 10^{-15} с.

Соотношения между временем привязанности к атому ко времени свободного перелета к другому атому можно получить, сравнивая скорости электронов, обычные для атомной физики, порядка $10^6...10^7$ м/с и средние скорости, полученные при протекании гальванических процессов, порядка $10^{-5}...10^{-4}$ м/с, на 10...11 порядков меньшие.

Подавляющую часть времени электрон проводит в связанном состоянии, и только очень редко, но очень быстро, перескакивает с одного атома к другому.

Представленная теория имеет наглядные представления, является классической, но в тоже время теория коллективных колебаний является ее неотъемлемой частью.

Выше сказано, что основными постулатами электронной теории предлагаемой авторами являются наличие в металлах связанных с атомами кристаллической решетки электронов. Тем самым осуществляется уход от кинетики «свободных электронов».

Второе, это возможность передачи энергии колебаний электронов между атомами, т.е. должен существовать эффект коллективных колебаний электронов в кристалле. Предлагаемая теория, сохраняя простоту и наглядность представлений, оставаясь полностью классической, приобретает достоинства коллективной электронной теории, составляющей рациональное зерно зонной теории.

В тоже время, движение электронов вдоль проводника под действием разности потенциалов подтверждается опытами по гальванике. Исходя из вышеизложенного, следует признать, что такое явление играет существенную роль только в гальванике. В остальных же случаях, и особенно при переменных токах высокой частоты значение имеет только передача энергии возбуждения колебательных движений электронов.

Выводы.

1. Классическая электронная теория Друде страдает полной неадекватностью представлений электрического тока в виде направленного движения электронного газа «свободных электронов». При этом допускает вопиющие несоответствия с опытными данными, полученными из экспериментов.
2. Квантовые электронные теории Гейзенберга, особенно зонная теория, допускают меньше отклонений от опытных данных, и в тоже время страдают абстрактно-математическим уклоном.
3. В технических ВУЗах ограничиваются преподаванием классической электронной теории, в виду наглядности и простоты. В отличие от квантовой теории, теория Друде не требует специальной математической подготовки.
4. Предлагаемая авторами статьи электронная теория сохраняет наглядность, т.к. основана на классических представлениях, при этом имеет достоинства зонной теории.
5. Суть предложений авторов содержится в двух постулатах. Первое: валентные электроны в атоме являются не свободными (как в теории Друде и Зоммерфельда), а связанными с ионами кристаллической решетки. Второе: колебания электронов в атомах кристаллов проводников могут свободно передаваться от одного атома к другому.
6. Отсюда следует главный вывод: электрический ток – это не направленное перемещение электронов, а передача энергии колебаний электронов вдоль проводника.
7. Направленное движение электронов при условии разности потенциалов на концах провода существует, но играет существенную роль только при гальванических процессах. В остальных случаях движение электронов в теле металла несущественно, и играет самую незаметную роль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Изд. 4-е, стереотипное. – М.: Физматлит; Изд-во МФТИ, 2004. Т. III. Электричество. 656 с.
2. Электронный ресурс http://physics.kgsu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=203.
3. R.C. Tolman, T.D. Stewart (1917). "The electromotive force produced by the acceleration of metals". *Physical Review* 8 (2): pp. 97–116.
4. Парселл Э. Берклевский курс физики. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1972. 445 с.
5. Терлецкий Я.П., Рыбаков Ю.П. Электродинамика. – М.: Высшая школа, 1990, 352 с.
6. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. В двух томах. Т. 1. – М.: Мир, 1979. 399 с.
7. Борн М. Атомная физика. – М.: Мир, 1965. 479 с.

Рецензент: Кокодеева Наталия Евсегнеевна, доктор технических наук, профессор, ФГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

Kochetkov Andrej Viktorovich
Perm national research polytechnical university
Russia, Perm
E-mail: soni.81@mail.ru

Fedotov Petr Viktorovich
JSC Research Center of Technical Regulation
Russia, Perm
E-mail: klk50@mail.ru

Features of teaching terminology and statement of a perspective of electric current

Abstract. The standard definition of electric current isn't true. More adequately, proceeding from available skilled data, other definition of electric current. The definition of electric current as the directed movement of electrons accepted now is admissible only for a direct current since direction of the movement of electrons doesn't change. For alternating currents when direction movement of charges changes each half-cycle, such definition isn't successful. It concerns currents of high frequency and ultrahigh frequency (microwave oven). The slow movement of charges defined from experiments on a galvanics convince that for a half-cycle of fluctuations of current, electrons manage to pass very small distance, for example at microwave oven frequencies distance passed by a charge for a half-cycle makes about several nanometers. In this case it is necessary to speak not about directed, and about *vozvratno* progress of charges. Nevertheless, «current goes». It is necessary to speak not about the directed movement of charges, and about the directed movement of energy along a chain.

It is necessary to recognize that electric current is the directed movement of energy of excitement of electrons. The offered approach doesn't contradict any available experiment, including and Tolmena-Stewart's experiment, and has some advantages of quantum zonal theory of electricity, keeping thus classical simplicity and presentation.

Keywords: electric current; Tolmena-Stewart's experience; conductivity electrons; free electrons in metals; the classical.

REFERENCES

1. Sivuhin D.V. Obshhij kurs fiziki. Izd. 4-e, stereotipnoe. – M.: Fizmatlit; Izd-vo MFTI, 2004. T. III. Jelektrichestvo. 656 s.
2. Jelektronnyj resurs
http://physics.kgsu.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=203.
3. R.C. Tolman, T.D. Stewart (1917). "The electromotive force produced by the acceleration of metals". Physical Review 8 (2): pp. 97–116.
4. Parsell Je. Berkleevskij kurs fiziki. Jelektrichestvo i magnetizm. – M.: Nauka, 1972. 445 s.
5. Terleckij Ja.P., Rybakov Ju.P. Jelektrodinamika. – M.: Vysshaja shkola, 1990, 352 s.
6. Ashkroft N., Mermin N. Fizika tverdogo tela. V dvuh tomah. T. 1. – M.: Mir, 1979. 399 s.
7. Born M. Atomnaja fizika. – M.: Mir, 1965. 479 s.