

# ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА, НАПРЯЖЕНИЕ И ТОК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

С.С. Волков, д. физ.-мат. наук, Ю.Е. Дмитриевский, Т.И. Китаева,  
С.В. Николин, В.А. Саблин, Н.П. Шевченко\*

390005, ул. Гагарина 59/1, г. Рязань, Россия,

Рязанский государственный радиотехнический университет

\* 390014, ул. Военных автомобилистов 12, г. Рязань, Россия,

Рязанский военный автомобильный институт им. генерала армии В.П. Дубынина

*По результатам экспериментов и теоретического анализа предложены уточненные модели образования электродвижущей силы, тока и напряжения в электрических цепях постоянного и переменного тока.*

*In accordance with the findings of experiments and theoretical analysis, the refined models of formation of electromotive force, current and voltage in the electric dc and ac circuits are proposed.*

Целью работы являлся анализ противоречий в механизмах протекания электрического тока в проводниках и уточнение физического смысла понятий «электродвижущая сила», «электрическое напряжение».

Разработка устройств для коммутации электрических токов и напряжений связана с научными, техническими и технологическими задачами, успех в решении которых зависит от конкретизации физического смысла понятий фундаментального характера, таких как ток, напряжение, электродвижущая сила.

Несмотря на широкое использование и кажущуюся полную ясность в определениях приведенных основных электрических понятий, их содержание, причины возникновения и физическая природа нуждаются в уточнениях. Для решения такой задачи необходимо исходно конкретизировать уже существующие представления об основных электрических характеристиках и понятиях.

По существующим представлениям электрический ток в электронных проводниках образуется под действием электрического поля, создаваемого источником электродвижущей силы (ЭДС). В цепях с источниками постоянного тока электрическое поле имеет электростатический характер. Оно формируется разделенными избыточными отрицательными и положительными зарядами и характеризуется напряжением  $U$  электрического поля [1-6].

Согласно электронной теории твердого тела [7-9], в электронных проводниках (в металлах) имеются свободные электроны, представляющие в совокупности электронный газ, но с особыми свойствами. Энергии свободных электронов проводимости квантованы на основе условия стоячих электронных волн в размерах проводника и принципа Паули (одинаковую энергию могут иметь только два свободных электрона с разными спинами), использованных Зоммерфельдом для построения электронной модели твердого тела [7].

При соединении проводника с клеммами источника ЭДС электрическое поле источника распространяется по проводнику со скоростью распространения электромагнитных волн и далее оказывает силовое действие на носители тока, то есть на свободные электроны электронного газа, перемещая их в направлении действия поля с силой

$$F = e E = e dU/dx, \quad (1)$$

где  $e$  - заряд электрона,  $E$  - напряженность электрического поля.

Согласно классической электронной теории, плотность электрического тока определяется как

$$j = e n v_{др.}, \quad (2)$$

где  $n$  – концентрация носителей заряда (электронов),  $v_{др}$  – направленная дрейфовая скорость перемещения электронов под действием электрического поля.

Энергетические возможности избыточных разделенных зарядов в источнике энергии характеризуются напряжением, точнее величиной ЭДС, измеряемой в единицах напряжения. При соединении электронным проводником полюсов источника снимается потенциальный барьер между электродами источника, и избыточные заряды создают в цепи электрический ток, стремясь к выравниванию концентраций зарядов на электродах. При этом сторонние силы в источнике ЭДС восстанавливают нарушающуюся разность концентраций зарядов и поддерживают протекание электрического тока постоянной величины. Несомненным является также представление о разной концентрации электрических зарядов между концами сопротивления во внешней цепи, являющейся исходной причиной протекания электрического тока. В таком варианте направленное движение электрических зарядов создается под действием кулоновских сил отталкивания между одноименными и притягивания между разноименными зарядами. Это уже принципиально другой механизм токопрохождения в электронных проводниках. В таком, можно сказать, концентрационном варианте нет необходимости в наличии электрического поля в проводнике. Однако без полевого механизма концентрационный механизм приводит к инерционности распространения тока по длине проводника из-за сжимаемости электронного газа. Первый вариант (силовое действие на заряды полем) можно отнести к дальнему действию через поле макрочарядов, а второй – к близкому действию через микрополя элементарных заряженных частиц, носителей тока. В обоих вариантах основной причиной образования тока в замкнутой внешней цепи источника ЭДС является наличие избыточных зарядов противоположного знака на клеммах источника электрической энергии. Эти механизмы считаются взаимодополняющими и не противопоставляются друг другу. Приведенная в таком общем виде модель токообразования считается бесспорной и не вызывает сомнений.

Приведенная модель образования и протекания тока полностью относится и к электрическим цепям переменного тока, которые отличаются непостоянством количества и знаков зарядов на полюсах источника. В цепях переменного тока добавляется третий механизм токообразования, заключающийся в действии переменного вихревого электрического поля. Согласно закону электромагнитной индукции, при изменении магнитного поля вокруг него образуется вихревое электрическое поле (замкнутое по контуру), которое движет электрические заряды в проводнике подобно электростатическому полю. Под действием вихревого электрического поля в обмотке индукционного источника создается электродвижущая сила, равная

$$e = - d\Phi/dt, \quad (3)$$

измеряемая в единицах электростатического напряжения (в вольтах). Под действием этого поля происходит разделение отрицательных и положительных электрических зарядов, и на концах обмотки (контур) создаются избыточные заряды, обладающие электростатическим полем. Вклад этих двух видов электрических полей не разделяется. Тем не менее, наличие разделенных зарядов констатируется знаками (+) и (-) [1-6].

Источники ЭДС переменного тока отличаются природой сторонней силы и ее непостоянством, но в процессах токопрохождения рассматриваются как квазиэлектростатические, хотя подобных формулировок в литературе не встречается. При соединении проводника (внешней цепи) к полюсам (к концам) обмотки с разделенными зарядами в проводнике создается электрический ток, подобно вышеописанным механизмам для цепей постоянного тока. С изменением скорости изменения и направления магнитного потока через обмотку изменяются соответственно количества и знаки зарядов на полюсах источника. Однако в каждый момент времени состояние электрической цепи эквивалентно цепи постоянного тока, а именно на клеммах источника энергии имеются избыточные электрические заряды, создающие электрическое поле на внешнем участке электрической цепи. Падение напряжения на сопротивлениях внешней цепи рассматривается как разность

потенциалов в точках с разной концентрацией избыточных электрических зарядов, то есть в понятиях электростатического поля. Такое же определение остается для падения напряжения при протекании переменного тока.

Наряду с дальнедействующими полевыми механизмами в цепях переменного тока вполне применима модель образования тока по концентрационному механизму кулоновского взаимодействия электронов друг с другом, то есть отталкивание-притягивание электрических зарядов на уровне элементарных зарядов.

Вероятно, из-за очевидности описанные механизмы токообразования в электротехнической литературе не приводятся, но могут быть сформулированы самим читателем в результате анализа литературы по теоретической электротехнике и электронной технике. Такие модели используются как основа для построения других более подробных физических моделей и для решения практических задач.

Однако физика протекания электрического тока в комплексе с учетом представлений квантовой и классической физики, теоретических основ электротехники, электронной теории и электродинамики в литературе не рассматривалась. При комплексном анализе существующей модели протекания тока, особенно при уточнении подробностей модели, возникают неразрешимые противоречия.

Например, если вихревое электрическое поле образует ток, то по временной фазе этот ток, как и вихревое поле, будет отличаться (отставать) от магнитного поля на четверть периода. Это означает, что в максимуме тока носителей заряда (тока электронов) в проводнике магнитное поле вокруг проводника имеет нулевое значение. Однако известно из опыта, что магнитное поле и ток неразрывны и связаны соотношением  $W_H = I^2 L/2$ , а величина и фаза тока неизменны по всей длине контура. Это означает, что электрический ток в контуре переменного тока создается не вихревым электрическим полем, а непосредственно магнитным полем.

Прямое силовое действие индуцирующего магнитного поля на свободные электроны возможно при формировании вихревой составляющей магнитного поля вокруг электрона в плоскости, перпендикулярной движению электрона. Вихревое поле вокруг носителя заряда создается двумя способами: 1) движением проводника поперек силовых линий магнитного поля (принцип действия коллекторного генератора постоянного тока); 2) изменением магнитного поля во времени (принцип действия синхронного генератора переменного тока) [1-6].

Отсюда следует противоречащий существующей модели вывод: вихревое электрическое поле, создаваемое изменением магнитного поля, не оказывает силового действия на электрические заряды. Однако это положение записано Фарадеем [4] в виде исходного условия процесса электромагнитной индукции

$$I R = - d\Phi/dt \quad (4)$$

и записано в уравнении Максвелла [2-4, 10]

$$\text{rot } \mathbf{H} = 4\pi \mathbf{j} + d\mathbf{D}/dt \quad (5)$$

Из формулы Фарадея следует, что изменение магнитного поля  $d\Phi/dt$  создает ток  $I$  через проводник с сопротивлением  $R$ , но не напряжение  $e$  в электростатическом выражении, как в формуле (4). Заменой  $I R$  в формуле Фарадея его последователями (по-видимому, Герцем) величиной  $e$  произведена замена магнитной силы, движущей электрические заряды, электростатическим напряжением, создающим кулоновскую силу такой же величины. Для электротехнических расчетов это удобно, но для изучения физических процессов протекания тока такая замена не адекватна реальности.

В приведенном уравнении Максвелла записано, что постоянное вихревое (оно всегда вихревое) магнитное поле  $\text{rot } \mathbf{H}(x, y, z)$  создает ток  $\mathbf{j}$ , а изменение напряженности вихря  $\text{rot } \mathbf{H}(x, y, z, t)$  создает дополнительно вихревое электрическое поле  $d\mathbf{D}/dt$ . Это поле Максвелл назвал электрокинетическим [10]. В отличие от электростатического поля оно является

соленоидальным с замкнутыми силовыми линиями, не имеющими ни начала, ни конца. Силовые линии электрокинетического поля не замыкаются на зарядах, а соответственно не оказывают на них силового действия. Заметим, что лаконичная запись Герцем и Хевисайдом уравнений Максвелла делает содержание каждого уравнения более емким, но и более трудным в чтении. Потенциал этого электрокинетического поля является векторной величиной  $A$ , связанной с напряженностью магнитного поля соотношением  $A = rot B$ . Напряженность поля есть изменение векторного потенциала в зависимости от времени  $E(x, y, z, t) = - \partial A(x, y, z, t) / \partial t$ , но не от пространственной координаты, как в случае электростатического поля. Стремлением к универсальности и лаконичности описание электромагнитных процессов доведено до удобного использования в инженерной практике, но существенно формализовало их до потери возможности индивидуального описания физических процессов. Такая формализация начинает сказываться в предельных случаях и на инженерные расчеты.

Вихревое электрокинетическое поле образуется только вокруг индуцирующего магнитного поля. При длинных линиях электропередачи движимые заряды в проводниках находятся вовсе вне пределов локализации наведенного электрокинетического поля и никоим образом не могут оказаться под его силовым воздействием. Распространение электрокинетического поля, возбужденного магнитным полем генератора вдоль линии, противоречит уравнению (3) и закону электромагнитной индукции Фарадея в целом.

Другим противоречием является «неподчинение» большинства свободных электронов электрическому полю источника и отсутствие физического (силового) обоснования запрета Паули. В частности, согласно квантово-механической теории с учетом принципа Паули, в создании электрического тока принимают участие только около 1/30 доли всех свободных электронов, способных изменять свою энергию под действием электрического поля – это электроны с энергиями, отличающимися от энергии уровня Ферми в пределах около 3/2 кТ [7, 8]. Электроны с энергиями  $E < (E_F - 3/2 \text{ кТ})$ , то есть на уровнях много ниже уровня Ферми, не могут изменять свои энергии, а соответственно не могут двигаться. Принцип запрета Паули налагает ограничение не только на изменение энергии под действием поля, но и ограничивает перераспределение избыточной энергии электрона между другими электронами, то есть термализацию возбужденного электронного газа электронно-электронными и любыми другими взаимодействиями. При соударениях суммарная энергия электронов не изменяется, свободных электронных состояний нет, поэтому два соударяющихся электрона могут только поменяться энергиями. Для этого должны быть строго определенные единственные условия столкновения. Например, величина энергии при кинетическом обмене зависит от прицельного параметра взаимодействия. Это означает, что для передачи заданной порции энергии низкоэнергетическому электрону необходимо, чтобы столкновение произошло только при определенном прицельном параметре.

Так как большинство квантово-механических характеристик экспериментально неизмеримы, то физические механизмы токопрохождения целесообразно строить на экспериментально измеряемых параметрах в понятиях классической физики.

Для выяснения физических процессов токопрохождения в металлах были проведены экспериментальные исследования по выяснению причин образования направленного движения электронов и природы электрического напряжения в источниках постоянного тока. Целью эксперимента являлось определение зарядового состояния элементов и участков электрической цепи при протекании постоянного тока, наличия или отсутствия избыточных зарядов на полюсах источника при протекании тока.

Из опытов Л. Гальвани и А. Вольты [11] известно, что при приведении в контакт двух разнородных проводников электричество переходит из одного материала в другой и (по-современному) образуется контактная разность потенциалов. В известных опытах [7-9, 12-14] количество переходящего заряда неизмеримо мало, поэтому в литературе обсуждался результат перехода зарядов, а не процесс перехода. Если выполнить геометрию металлов в виде замкнутого кольца и разместить между близко расположенными поверхностями диэлектрик с большим  $\epsilon$ , то количество переходящего заряда увеличится  $q = C U$ , где  $U$  – контактная разность потенциалов,  $C$  – электрическая емкость конденсатора,  $C = \epsilon_0 \epsilon S / 4\pi d$ ,

где  $\varepsilon_0$   $\varepsilon$  – диэлектрические постоянные,  $S$  – площадь диэлектрика,  $d$  – расстояние между пластинами. В качестве диэлектрика использовался сегнетоэлектрик с большой диэлектрической постоянной  $\varepsilon = 175000$ , а электроды были изготовлены из разных материалов Al, Pb, Ti, Mo, Ni Cu, [15-17].

При приведении в контакт металлов с разными энергиями связи свободных электронов в них на границе раздела образуется сила, перетягивающая электроны из металла с малой энергией связи в металл с большой энергией связи.

**Электродвижущая сила.** Замыкание электрически нейтральных пластин конденсатора из разных материалов показало появление тока во внешней цепи, спадающего со временем до нуля с образованием противодействующей контактной разности потенциалов. Наличие тока без электрического зарядового напряжения между электродами обусловлено природой электронного сродства атомов, проявляющейся разной энергией связи электронов, например, в Cu и Al пластинах экспериментального конденсатора.

На границе раздела Cu и Al образуется межатомная сила, перемещающая электроны из одного металла в другой [7, 12-14]. Этот эксперимент показал возможность получения тока зарядово-нейтральными электродами. В такой системе электродвижущей силой является разная сила притяжения электронов разными атомами химических элементов [18]. Она образуется на границе раздела между металлами. При наличии в цепи других материалов величина электродвижущей силы обусловлена разностью энергий связи электронов на поверхностях, образующих электрическую емкость, то есть на внешних поверхностях [1, 12-14].

Этим экспериментом показана возможность получения электрического тока в переходном процессе образования контактной разности потенциалов с сухим химически пассивным диэлектриком при отсутствии электрохимических реакций на поверхности пластин и при отсутствии двойных слоев, а значит электродных потенциалов.

Отметим, что аналогичную природу имеет электродвижущая сила и в гальванических элементах. Такой вывод сделан на основе результатов большого объема экспериментальных исследований поверхностей электродов свинцово-кислотного аккумулятора [19-22], выполненных в том числе авторами, указанными в конце статьи. Этим подчеркиваем, что в гальванических элементах ток протекает также при зарядово-нейтральных электродах. Подробный механизм работы гальванических элементов будет изложен в последующих публикациях. Для решения рассматриваемого вопроса о природе тока, напряжения и ЭДС вполне достаточным и однозначным по результату является опыт с конденсатором [15].

Таким образом, электродвижущая сила в источниках постоянного тока измеряется в единицах напряжения электростатического поля, но имеет природу разности энергий связи электронов с атомами на межфазных границах. Она обусловлена не разницей концентраций зарядов, а явлением сродства атомов, коллективно действующих на границе раздела металлов, и вызывает силу, действующую на свободные (валентные) электроны в проводнике.

**Напряжение** на участках внешнего контура цепи. Появление тока по всему контуру в момент замыкания внешней цепи показывает отсутствие избыточных зарядов на каком-либо участке контура, в том числе на границе контакта. Поэтому напряжение на внешних участках цепи есть характеристика силы, действующей на свободные электроны и создающей направленное движение электронов. Это напряжение также выражается в величинах напряжения электростатического поля, хотя в действительности в цепи нет избыточных зарядов и нет соответственно электростатического и другого электрического поля в макроразмерах.

Направленное движение свободных электронов во внешней цепи конденсатора с нейтральными пластинами при отсутствии электрического поля в проводнике указывает на распространение силы (электродвижущей силы), возникающей на границе раздела металлов, по всему контуру внешней цепи. Электротехническая практика показывает, что электрическая сила в электронной подсистеме проводника распространяется по всему контуру синфазно с возникновением напряжения, точнее электродвижущей силы. Передача

силового действия возможна только кулоновским взаимодействием между электронами и ионной решеткой атомов. Мгновенное распространение силы взаимодействия по внешней цепи указывает на то, что свободные электроны (проводимости, точнее валентные) связаны друг с другом жестким потенциалом взаимодействия, то есть в совокупности образуют не газ с некоторой свободной длиной пробега электрона, а несжимаемую жидкость.

Несжимаемость газа свободных электронов возможна при энергетической связанности электронов с атомами и возможности свободного перехода электронов от атома к атому. Несжимаемость электронного газа обусловлена потенциалом взаимодействия валентного электрона с атомным остовом, то есть сжимаемостью атома в области орбиты валентного электрона. Несмотря на значительное среднее расстояние между валентными электронами (постоянная решетки) сжатие их орбит противодействует потенциальное поле атомного остова с потенциалом взаимодействия «ион-валентный электрон». Упругость электронного газа в такой модели косвенно можно охарактеризовать механическим модулем сжатия кристалла.

Эта рассмотренная модель токообразования находит экспериментальное подтверждение. В наших экспериментах по рассеянию ионов поверхностью вольфрама с цезием [23] показано, что «вытекающего» свободного электронного газа над поверхностью нет. Ни в одном из многочисленных экспериментов наших и других авторов [24-28] по рассеянию ионов инертных газов от поверхности металлов, полупроводников и диэлектриков вклад свободных электронов в нейтрализацию ионов не обнаружен.

Другим подтверждением этого предположения являются эксперименты по туннельной микроскопии, в которой при приближении зонда к поверхности туннельный ток возникает сразу с поверхностных состояний, а затем – прямой ток с атомных орбиталей без составляющей от свободного электронного газа.

Приведенные эксперименты и теоретический анализ позволяют предполагать, что электроны проводимости в металле связаны с атомами решетки, но отличаются энергией связи от одиночных атомов из-за взаимодействия электронов соседних атомов друг с другом. Решетку кристалла образуют не ионы атомов, а сами нейтральные атомы. Энергетически возбужденные валентные электроны ближними и дальними соседями распределяются в некоторой энергетической полосе, оставаясь связанными с атомами. Свободный электрон со средней кинетической энергией  $3/2 kT = 0.34$  эВ (при  $T = 300$  К), попадая в поле влияния атома, неизбежно захватывается на валентную орбиталь, так как энергия связи валентного электрона составляет единицы эВ и намного больше кинетической энергии электрона. Свободность электронов для направленного движения заключается в отсутствии потенциального барьера между атомами. Электроны могут свободно переходить от атома к атому при наличии электронной вакансии. При переходе от атома к атому электроны кинетически взаимодействуют с атомами, передают часть своей энергии атомам и увеличивают их колебательную энергию. Такая модель хорошо согласуется с теплоемкостью металлов и диэлектриков.

**Электронная зонная модель.** Энергетическая зонная схема [7-9] в такой модели претерпевает существенное изменение: энергетические уровни, образующие валентную зону, являются не кинетическими в отсчете от дна валентной зоны, а потенциальными энергиями электронов атомов, отсчитываемых от нулевого уровня. При этом отпадает необходимость в применении принципа запрета Паули и в гипотезе о волновых свойствах электрона, по крайней мере, в квантовании его поведения кристаллом. Поведение электронов квантуется не геометрией кристалла, а отдельными атомами, что согласуется с атомными оптическими спектрами. Это снимает запрет энергетического взаимодействия электронов нижней части валентной зоны с атомами: все валентные электроны могут энергетически взаимодействовать с атомами и друг с другом, приобретать другие потенциальные энергии по всей ширине валентной зоны, если полученная им энергия позволяет сместить электрон с занятой орбиты.

Приведенная краткая описательная форма модели может претендовать только на роль основы для гипотезы, но ее основные положения сформулированы по результатам экспериментов. Такая модель может быть непротиворечиво построена на категориях и

понятиях классической физики, не прибегая к использованию теоретических положений квантовой механики. Существующая квантово-механическая зонная модель построена на принципиально ненаблюдаемых теоретических параметрах, таких как запрет Паули, электронные волны и т.д., поэтому ее целесообразно использовать как инструмент математической физики для построения математических моделей.

**Электрический ток.** При протекании электрического тока дрейфовая скорость электронов может быть определена по формуле (2). При максимальной плотности тока в меди  $10 \text{ А/мм}^2$  и при одном свободном электроном на атом и диаметре атома  $3 \text{ \AA}$ , т.е. ( $n = 3 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^3$ ) дрейфовая скорость равна

$$v_{\text{др}} = j / e n = 1000 / (1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 3 \cdot 10^{22}) = 0.2 \text{ см/сек.}$$

В приближении равномерного движения время прохождения электрона на расстояние постоянной решетки составляет  $t = s / v_{\text{др}} = 3 \cdot 10^{-8} / 0.2 = 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ сек.}$

Учитывая, что орбитальный период электрона находится в пределах  $t_{\text{орб}} = 10^{-12} \text{ сек.}$ , то процесс токопрохождения практически не нарушает электронное состояние атома и твердого тела в целом. Электрон переходит от атома к атому в среднем через  $10^{+6}$  оборотов в поле атома. Такой процесс вполне можно охарактеризовать как статический.

Протекание тока по механизму кулоновского взаимодействия валентных орбитальных электронов не создает скоплений зарядов на отдельных участках и не нарушает зарядовой нейтральности ни одного из участков электрической цепи. На языке электротехники, точнее электростатики, это означает, что зарядовая (кулоновская) разность потенциалов на всех участках электрической цепи равна нулю, электрическое напряжение в кулоновском смысле, обусловленная избыточными электрическими зарядами, в цепях отсутствует. В электрической цепи избыточные заряды содержат только электрические емкости (рабочие и паразитные). Напряжение на концах любого сопротивления, измеряемое вольтметром, есть разность величины сил кулоновского давления электронной жидкости. На активном сопротивлении кулоновской силе направленного давления электронного газа (жидкости) противодействует по всему объему электронного проводника сила сопротивления атомов (потенциальных барьеров между атомами). Поэтому сила давления электронного газа в направлении движения электронов уменьшается. Разность сил оказывает на измерительный прибор воздействие, равное силовому воздействию электростатической напряженности.

**Передача энергии** по двухпроводной линии постоянного и низкочастотного переменного токов по существующим моделям в электротехнике объясняется [2-5] наличием между проводниками ортогональных магнитного и электрического полей и описывается вектором Пойнтинга; энергия распространяется в пространстве между проводниками, проводники служат направляющими.

Результаты экспериментов и анализа электромагнитных процессов в магнитных и электрических системах цепей переменного тока показали, что энергия переносится по проводникам направленной силой кулоновского взаимодействия электронов в проводнике, вызванной электродвижущей силой. Электрическое поле между проводниками обусловлено только паразитными емкостями между ними. Это поле не входит в уравнение (5) Максвелла. Оно не связано с магнитным полем индукционного источника и, следовательно, не участвует в передаче энергии по двухпроводной линии. Вектор Пойнтинга, ортогональный пространственно разнесенным векторам взаимосвязанных уравнением (5) напряженностей электрического и магнитного полей в области источника ЭДС, показывает направление переноса энергии от вихревого электрокинетического поля к магнитному полю и обратно. В течение одного периода направление вектора изменяется четыре раза. В цепях постоянного тока вихревого электрического поля нет, а вихревое магнитное поле постоянное по энергии, потому перекачки энергии от магнитного поля к электрическому не происходит.

Выводы:

1. Электродвижущая сила есть сторонняя сила, действующая на электронную

подсистему проводника и передаваемая по всем контурам электрической цепи.

2. Электрический ток в цепях постоянного и переменного тока протекает под действием кулоновских сил, вызванных электродвижущей силой, между валентными электронами, связанными с атомами, но свободно переходящими от атома к атому в отсутствие какого-либо внешнего (стороннего) макроразмерного электрического поля.

3. Электрическое напряжение в электрических цепях имеется в трех видах, отличающихся по своей природе и действию:

- напряжение электростатического поля, создаваемое разделенными зарядами, характеризующее работу по переносу заряда в этом поле;

- напряжение на резистивном сопротивлении (на участке электрической цепи) при протекании тока есть разность кулоновских сил, действующих на электронную подсистему проводника, между концами сопротивления и передаваемых от электродвижущей силы;

- напряжение вихревого электрического поля, (электрокинетического поля), создаваемого изменением магнитного поля, характеризует пространственное распределение и направление потока энергии вихревого поля, возбуждающего вихревое магнитное поле.

4. При протекании тока в замкнутой электрической цепи все точки и участки цепи (кроме электрических емкостей) зарядово-нейтральны.

5. Электрическая энергия в двухпроводной линии передается путем кулоновского взаимодействия электронов электронной подсистемы проводников.

Более подробная аргументация выводов статьи будет приведена в последующих публикациях.

В работе использованы неопубликованные результаты экспериментальных и теоретических исследований Г.Н. Шуппе, А.А. Аристарховой, Т.Н. Исаевой, Т.М. Машковой, Е.А. Мишуровой, М.Ю. Тимашева, А.Б. Толстогузова, В.В. Трухина.

### Литература:

1. Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики. Т.2. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 509 с.
2. Калантаров П.Л., Нейман Р.Л. Теоретические основы электротехники. – М.: Гостехиздат, 1952. – 464 с.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высш. шк., 1973.
4. Лавров В.М. Теория электромагнитного поля и основы распространения радиоволн. – М.: Изд. «Связь», 1964. – 368 с.
5. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1966.
6. Поль Р.В. Учение об электричестве. – М.: Физматгиз, 1962. – 515 с.
7. Зейтц Ф. Современная теория твердого тела. Пер. с англ. / Под ред. Г.С.Жданова. – М.-Л.: Гостехиздат, 1949.
8. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. – М.: Изд. «Наука», 1966. – 564 с.
9. Шуппе Г.Н. О проблемах работы выхода электронов и адсорбции на металлах в зависимости от кристаллографических направлений // Эмиссионная электроника – Рязань: Московский рабочий, 1974. – С. 3-44.
10. Джемс Клерк Максвелл. Статьи речи. – М.: Наука, 1968. – 421 с. С.54.
11. Волков С.С., Камышенцев Ю.И., Николин С.В., Шевченко Н.П. Природа гальванического электричества. Научные гипотезы XVIII-XIX веков: Учебное пособие. – Рязань, 2004. – 82 с.
12. Царев Б.М. Контактная разность потенциалов. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1949. – 171 с.
13. Большанина М.А. Электрические явления в контактах металлов. – Томск: ТГУ, 1975.
14. Матосов М.В. Физика работы выхода электрона. – М.: МАИ, 1989. – 176 с.



15. Аристархова А.А., Волков С.С., Николин С.В., Кочуров А.А. Экспериментальное исследование процесса образования контактной разности потенциалов // Вестник РГРТА, 2000. – Вып. 7. – С.99-101. УДК 621.387.132.
16. Волков С.С., Николин С.В. Физические и аппаратные особенности измерения контактной разности потенциалов методом задерживающего потенциала / В сб.: Электроника. Межвузовский сборник трудов. – Рязань: РГРТУ, 2006. – 131 с. С.56-63.
17. Волков С.С., Николин С.В., Шевченко Н.П. Расчет зарядовой емкости гальванического элемента // Электроника. Межвуз. сборник научн. трудов. – Рязань: РГРТА, 2005. – С.72-77.
18. Месси Г. Отрицательные ионы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1979. – 754 с.
19. Аристархова А.А., Волков С.С., Дмитриевский Ю.Е., Кочуров А.А., Митрошкина С.В., Николин С.В. Электродные потенциалы в растворах электролитов // Материалы XIII Международн. конференции. ВИП - 13. Взаимодействие ионов с поверхностью. Звенигород, 1-5 сент. 1997 г. – М.: МИФИ - МАИ, 1997. – Т.1. – С.159.
20. Аристархова А.А., Волков С.С., Дмитриевский Ю.Е., Николин С.В. Ионное зондирование поверхности «металл-электролит» // Тезисы докладов XXVIII Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, 25-27 мая 1998 г. МГУ. Изд. Моск. ун-та, 1998. – С.71.
21. Аристархова А.А., Волков С.С., Гумелев В.Ю., Дмитриевский Ю.Е., Кочуров А.А., Николин С.В. Исследование взаимодействия ионов с поверхностью на границе раздела «металл-электролит» // Материалы XV Международн. конференции ВИП - 2001. Взаимодействие ионов с поверхностью. 27-31 авг. 2001 г. Звенигород. – М.: Изд. МАИ, 2001. – Т.2. – С. 278-279.
22. Аристархова А.А., Волков С.С., Гумелев В.Ю., Дмитриевский Ю.Е., Китаева Т.И., Кочуров А.А., Николин С.В., Тимашев М.Ю. Диагностика состава монослоев границы раздела «металл-электролит» // Тезисы докладов XXIX Международной конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва. 31 мая - 2 июня 1999 г. НИИЯФ МГУ. Изд. МГУ, 1999. – С.82.
23. Аристархова А.А., Волков С.С., Тимашев М.Ю., Шуппе Г.Н. Адсорбция цезия на поверхности вольфрама // Поверхность, 1990. – № 7. – С. 63-69.
24. Волков С.С., Толстогузов А.Б. Спектроскопия обратно рассеянных ионов низких энергий. Обзоры по электронной технике. Сер. 7. Технология и организация производства и оборудование. – М.: ЦНИИ Электроника, 1981. – Вып. 15(820). – 79 с.
25. Аристархова А.А., Волков С.С., Тимашев М.Ю., Шуппе Г.Н. Нейтрализация ионов неона гипертермальных энергий, рассеянных от поверхности твердых тел // Радиотехника и электроника. 1993. – № 1. – С. 168-172.
26. Волков С.С., Китаева Т.И., Николин С.В., Путилин И.К., Саблин В.А., Тимашев М.Ю. Потенциальное взаимодействие ионов с поверхностью // Материалы XVII Международн. конференции ВИП - 2005. Взаимодействие ионов с поверхностью. 25-29 авг. 2005 г. Звенигород. – М.: Изд-во МАИ, 2005. – Т.1. – С. 385-387.
27. Аристархова А.А., Волков С.С., Тимашев М.Ю., Шуппе Г.Н. Нейтрализация ионов неона гипертермальных энергий // В кн.: Вторичн. онно-ионная и ионно-фотонная эмиссия. Тез. докл. VI Всесоюзн. семинара. 29-31 окт. 1991 г. Харьков, ХГУ, 1991. – С. 212.
28. Волков С.С., Исаева Т.Н. Динамика парного соударения «ион-атом» в приближении кулоновского экранированного потенциала взаимодействия // Поверхность. 1992. – N 6. – С. 83-90.