

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

*С.С. Волков, д.ф.-м.н.**, *Н.Н. Бисярин***, *Л.А. Ивлева, к.т.н.**, *Т.И. Китаева***,
*С.В. Николин***, *В.А. Саблин, к.ф.-м.н.***, *Н.Л. Пузевич, к.т.н.**
* 390031, Россия, г. Рязань, ул. Каляева, д. 20
Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище
(Военный институт) им. генерала армии В.Ф. Маргелова
** 390005, Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1
ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Исследованиями взаимодействия ионов с поверхностью, образования контактной разности потенциалов, гальванического электричества и переменного тока показано, что направленное движение электронов в металле (электрический ток) происходит при отсутствии электрического поля полюсов источника электрической энергии в металле, а также против поля заряженных электродов. Предполагается, что сторонняя сила передается по контуру путем взаимодействия валентных электронов, связанных с атомами.

It is shown by researches into the interaction of ions with the surface, of contact potential difference, of a galvanic electricity origin and of an alternating current generation processes that directed movement of electrons in the metal occurs in the absence of an electric field in the metal, as well as against the field of the charged electrodes. It is assumed that electrons movement in the metal occurs under action of the Coulomb interactions of valence electrons associated with atoms.

Введение

Искрение при прерывании тока в электротехнических коммутационных устройствах обусловлено во многом током, создаваемым электродвижущей силой (эдс) самоиндукции. Физическая сущность и процесс образования эдс самоиндукции известны на уровне закона электромагнитной индукции Фарадея, правила Ленца и формул для инженерных расчетов. Образование любых эдс, в том числе и эдс самоиндукции, трактуется как разделение зарядов, создание избытка зарядов противоположного знака на полюсах источников электрической энергии. Увеличение заряда концов катушки при повышении тока и перезарядка при уменьшении тока со скоростью коммутации вызывает необходимость более подробного выяснения механизма протекания электрического тока. Любые изменения количества электрических зарядов на локальных участках электрической цепи являются неизбежным следствием протекания электрического тока. Таким образом, образованию эдс самоиндукции должны предшествовать соответствующие токи в течение времени коммутации. Локализованное избыточное количество зарядов определяется емкостными характеристиками цепи. Количество избыточных зарядов должно определять энергетические характеристики системы. Так как эдс самоиндукции образуется в результате прерывания тока, и ее действие проявляется создаваемым током, то целесообразно изучить более подробно физические процессы, создающие электрический ток. Электрический ток в проводниках в учебной литературе и в монографиях определяется в общем виде как «направленное движение заряженных частиц под действием электрического поля» [1-5]. Более подробного и однозначного аргументированного физического механизма протекания тока в литературе не имеется. Не уточняется вид поля (электростатическое или вихревое), не рассматривается противодействующая сила опоры при силовом воздействии на электроны проводимости. Остаются неясными вопросы о способе передачи сторонней силы и действия на электроны в проводнике, о поведении электронов проводимости в проводнике. В случае эдс самоиндукции не выяснены процессы разделения зарядов при коммутации. Из сведений, содержащихся в монографиях и учебниках по физике взаимодействий в твердом теле, по физическим основам электротехники, можно заключить, что ток в металле есть движение

свободных электронов под действием силы электрического поля в проводнике, образованного электрическими зарядами противоположного знака, расположенными на полюсах источника электрической энергии. В свою очередь, электрические заряды внутри источника электрической энергии разделяются на полюсы сторонними силами – химическими, магнитными и др. По существующим представлениям, эти механизмы считаются однозначными, не подвергаются сомнениям, но и не имеют необходимого теоретического и экспериментального подтверждения. Целью данной работы являлось определение зарядового состояния полюсов источников электрической энергии и природы силы, движущей электроны проводимости в цепях постоянного и переменного тока.

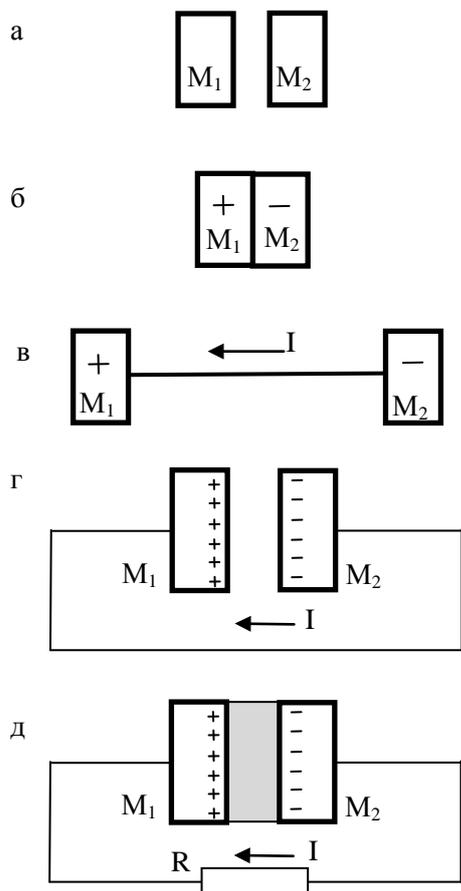


Рис. 1. Схема образования тока контактной разности потенциалов и гальванического элемента

заряжаются зарядами с противоположными знаками. Электроны проводимости из металла M_1 с малой работой выхода $e\phi_1$ (с малой энергией связи $E_{св1}$) переходят в металл M_2 с большой работой выхода $e\phi_2$ (с большой энергией связи $E_{св2}$). Зарядку проводников из-за перетекания электричества при контактировании обнаружил Вольта еще до создания источника постоянного тока. Считается, что количество переходящих электронов очень мало, и об электрическом токе вопрос не возникал. Не рассматривался и вопрос о локализации и перераспределении зарядов. Если пластины M_1 и M_2 соединить не напрямую, а проводником (рис. 1, в), то электроны при переходе из одного металла в другой создадут в проводнике ток – спадающий ток заряжения. Если те же металлические пластины M_1 и M_2 расположить обращенными друг к другу на малом расстоянии в виде конденсатора (рис. 1, г), то их электрическая емкость C увеличится, и количество перетекающего заряда будет больше: $q = C U_{к.р.п.}$, где $U_{к.р.п.} = (e\phi_1 - e\phi_2)/e$ –напряжение к.р.п., равное разности работ выхода металлов M_1 и M_2 . Если расположить между пластинами сегнетоэлектрик с $\epsilon >$

Результаты исследований

Как следует из практики, в замкнутых цепях избыточных электрических зарядов на полюсах источников нет. В гальванических цепях постоянного и переменного токов все точки замкнутой электрической цепи электростатически нейтральны. А, соответственно, в проводниках внешней цепи электростатическое поле отсутствует. Возникает вопрос о силе, движущей электрические заряды во внешней цепи, в металле. При введении понятий «напряжение» и «ток» Ампер считал, что в разомкнутой цепи есть напряжение, а в замкнутой – ток. Он написал [6], что при замыкании электрической цепи «электрическое напряжение отсутствует, легкие тела заметным образом не притягиваются, и обычный электромметр не может уже служить указателем того, что происходит в теле». В подтверждение тезиса о зарядовой нейтральности замкнутых цепей приведем ряд примеров. Наиболее наглядным примером токопрохождения без зарядового поля является процесс образования внешней контактной разности потенциалов.

Из экспериментов по изучению контактной разности потенциалов (к.р.п.) [7 - 11] известно, что два разных электростатически нейтральных металла M_1 и M_2 с разными работами выхода электрона с поверхности $e\phi_1$ и $e\phi_2$ (рис. 1, а) после соединения друг с другом (рис. 1, б)

10000, то емкость конденсатора увеличится, количество перетекающего заряда при образовании внешней к.р.п. также увеличится. Если расположить во внешней цепи сопротивление R (рис. 1, δ), то можно зарегистрировать протекающий через сопротивление ток [12].

$$I_C = ((E_{св2} - E_{св1})/R) \exp(-t / (RC)). \quad (1)$$

Особенность результата эксперимента заключается в том, что электрический ток в начальный момент ($t = 0$) возникает между нейтральными пластинами M_1 и M_2 в нейтральном проводнике. При $t > 0$ ток протекает не под действием электрического поля, а при противодействии отрицательно заряженной пластины: электроны движутся в направлении отрицательно заряжающегося металла M_2 против поля к.р.п. В такой конденсаторной системе зависимость тока I_C от времени (1) спадающая (рис. 2) с постоянной времени $\tau = RC$, где R – сопротивление цепи, C – электрическая емкость пластин [11, 12]. Очевидно, что сила перемещения электронов возникает на границе между пластинами из-за разной энергии связи электронов в металлах.

Другой особенностью конденсатора с пластинами из разных материалов является то, что он обладает электрической энергией при нейтральных пластинах и способен создавать электрический ток [11].

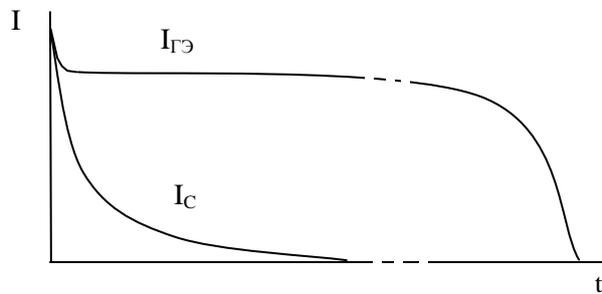


Рис. 2. Зависимости от времени тока разряда I_C конденсатора и тока разряда $I_{ГЭ}$ гальванического элемента

Какая сила движет электроны в нейтральной цепи и даже против поля к.р.п.? Концентрационный механизм передачи силы для модели свободного электронного газа реализуется с большой временной инерционностью и не согласуется с характеристиками тока в цепи. В рассматриваемом примере согласно концентрационному механизму ток должен течь в обратную сторону.

Если вместо сегнетоэлектрика между электродами из разных материалов M_1 и M_2 с разными работами выхода $e\phi_1$ и $e\phi_2$ поместить раствор электролита, то получится гальванический элемент (рис. 3) с постоянным значением зависимости тока $I_{ГЭ}$ от времени (в некоторых длительных пределах времени). Нижеприведенный физический механизм работы гальванического элемента основан на экспериментально установленном факте отсутствия токообразующих электрохимических реакций (на примере свинцово-кислотного аккумулятора) [13, 14] и на результатах исследования явления к.р.п. [6-10].

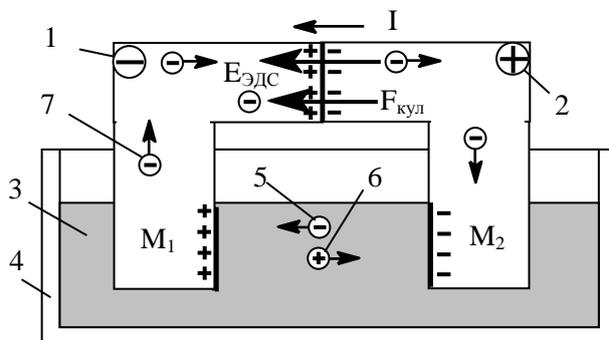


Рис. 3. Схема гальванического элемента:
 1 – отрицательный электрод;
 2 – положительный электрод;
 3 – раствор электролита; 4 – корпус;
 5, 6 – отрицательные и положительные ионы; 7 – электроны в электродах

Предположим, электроды 1 и 2 (рис. 3), размещенные в электролите 3, электрически нейтральны. Отметим, что образование «электродных потенциалов» объясняется растворением положительных ионов электрода в электролит и образованием двойного зарядового слоя [16]. Зарядовые слои находятся друг от друга на атомном расстоянии, связаны друг с другом кулоновскими силами, находятся в состоянии минимума свободной энергии и не способны совершать работу. Растворенный положительный слой сильнее связан с электродом (кулоновские силы), чем с электролитом (силы Ван-дер-Ваальса). Связанные друг с другом равные по величине

заряды слоев оставляют электрод в целом электростатически нейтральным, незаряженным.

Согласно явлению электронного сродства и практике к.р.п., «электродный потенциал» есть энергия связи электрона в проводнике $E_{св}$, которая характеризуется работой выхода $E_{св} = e\phi$. Разность электродных потенциалов в гальваническом элементе есть разность энергий связи $E_{св1} - E_{св2}$ электронов в электродах или разность работ выхода, равная контактной разности потенциалов

$$E_{св1} - E_{св2} = e(\phi_1 - \phi_2) = eU_{КРП}. \quad (2)$$

Контактная разность потенциалов проявляется в четырех формах или состояниях, а характеризуется одинаковым термином, что создает неясности и приводит к неверным толкованиям.

1. При отсутствии электрического контакта до образования внешней к.р.п. система из двух нейтральных электродов (рис. 1, а) обладает свободной энергией, равной энергии электрической емкости

$$W = C(e\phi_1 - e\phi_2)^2/2. \quad (3)$$

Такая емкость исходно «заряжена» энергией при зарядово-нейтральных электродах.

2. В начальный момент контакта ($t = 0$) электроды электростатически не заряжены. Контактная разность потенциалов является внутренней, проявляется на границе раздела и выражается в виде разности энергий связи электронов в электродах. Она характеризует направленную силу сродства атомов, действующую на границе контакта на электроны электрода с малой энергией связи и перемещающую их в электрод с большой энергией связи. Ток по всему контуру равен току на границе раздела.

3. Промежуточное состояние при $t > 0$. Электроны, переходящие в электрод с большой работой выхода, заряжают его отрицательно, а электрод с малой работой выхода – положительно, но напряжение зарядки меньше контактной разности потенциалов, и ток продолжает течь.

4. В установившемся состоянии (при $t = \infty$) электроды заряжаются, и между ними образуется внешнее электростатическое поле, внешняя, кулоновская разность потенциалов, равная разности энергий связи (2), то есть к.р.п. На границе раздела сила поля зарядки равна силе сродства, вызываемой разными энергиями связи, и действует в противоположном направлении. При этом электронная система двух тел находится в состоянии минимума свободной энергии и неспособна без внешней силы совершать работу.

В гальваническом элементе между электродами нет электронного контакта, так как в электролите нет электронной проводимости. Электроны из электродов не переходят в электролит, а ионы из электролита не переходят в электроды. Если не рассматривать процессы адсорбции и нейтрализации, то электрический ток на границе раздела «электрод-электролит» между ионным в электролите и электронным в металле замыкается токами смещения. Гальванический элемент подобен конденсатору с большой диэлектрической постоянной ϵ .

Таким образом, исходно в системе «два электрода – электролит» электроды электрически нейтральны и обладают свободной энергией. При внешнем соединении электродов 1 и 2 (рис. 3) из-за разной энергии связи электронов в них (в металлах M_1 и M_2) на границе раздела образуются направленные силы сродства, перетягивающие электроны из металла M_1 с работой выхода $e\phi_1$ в металл M_2 с $e\phi_2$.

Электроны γ из электрода 1 с малой работой выхода (по электротехническому критерию токоотдачи это отрицательный электрод) переходят в электрод 2 с большой работой выхода (положительный электрод). Движение электронов γ создает электрический ток. Отрицательный электрод 1 из-за ухода электронов заряжается положительно, а положительный электрод 2 из-за их прихода – отрицательно. На границе контакта

электродов образуется тормозящее поле, и ток уменьшится. Уменьшение тока происходит по емкостному принципу (1). Перетягивание электронов может идти до тех пор, пока сила поля перешедших зарядов не уравнивает силы сродства, или энергия тормозящего поля зарядов станет равной разнице энергий связи электронов в металлах, то есть разнице работ выхода (2).

Однако после небольшой зарядки начинаются процессы нейтрализации электродов электролитом. Наряду с торможением электронов на границе раздела электродов уже чуть заряженные электроды создают электрическое поле в электролите, которое приводит в движение ионы электролита 5 и 6. Положительные ионы 6 притягиваются к положительному электроду 2 и адсорбируются на его поверхности. Избыточные электроны, находящиеся на поверхности положительного электрода, нейтрализуют адсорбированные ионы. В кислотных аккумуляторах электроположительными являются ионы водорода с потенциалом ионизации $eV_i = 13,59$ эВ. Такие ионы нейтрализуются даже на незаряженной поверхности, так как работа выхода металлов ($e\phi = 4 - 5$ эВ) всегда значительно меньше первого потенциала ионизации водорода.

Отрицательные ионы 5 электролита под действием поля движутся к отрицательному электроду 1, заряженному положительно, и тоже адсорбируются. Так как потенциал ионизации иона (или сродство S к электрону) составляет обычно порядка менее $S < 1-0,1$ эВ, а работы выхода металлов более $3 - 4$ эВ, то отрицательные ионы нейтрализуются на поверхности положительно заряженного отрицательного электрода. Отдавая электрон, анионы снижают заряженность поверхности отрицательного электрода. Нейтрализация зарядов на электродах создает равновесие между процессами заряжения и разряжения электродов и поддерживает ток гальванического элемента во внешней цепи $I_{гэ}$ на постоянном уровне (рис. 2). Измеряемое и действующее напряжение на клеммах имеет не зарядовую, а энергетическую природу и представляет собой алгебраическую сумму энергетического и зарядового напряжений. Энергетическое напряжение равно

$$U_{ист} = (e\phi_1 - e\phi_2)/e - \Delta U_{зар}. \quad (4)$$

Зарядовая емкость гальванического элемента определяется количеством заряда раствора электролита. В нейтральном виде атомы связаны с поверхностью электродов слабыми ван-дер-ваальсовскими силами ($E_{св} = 0,1 - 0,01$ эВ) и десорбируются с поверхности. На освободившиеся места приходят следующие ионы, создавая ток в электролите.

Электростатическая заряженность электродов по знакам всегда противоположна их электротехническим названиям, обусловленным направлением тока. Увеличение зарядки электродов $\Delta U_{зар}$ из-за перехода электронов по внешней цепи в положительный электрод уменьшает электронный ток по внешней цепи и увеличивает ионный ток в электролите. Они находятся в обратной зависимости от величины напряжения зарядки электродов. Поэтому зарядка устанавливается на определенном уровне, при котором электронный ток внешней цепи равен ионному току электролита. Из-за высокой электропроводности электролитов зарядка электродов, как правило, составляет $\Delta U_{зар} = 0,1$ В. С уменьшением концентрации ионов электропроводность электролита уменьшается, а, соответственно, для поддержания тока на заданном уровне зарядка электродов увеличивается. При этом напряжение на клеммах источника уменьшается.

Электроны в металлах M_1 и M_2 и во внешней цепи движутся от положительно заряженного электрода к отрицательно заряженному, то есть против поля зарядки, а ионы в электролите движутся под действием этого поля. После того, как ионы электролита будут нейтрализованы, электроды зарядятся полностью до $U_{крп}$, а ток упадет до нуля.

Таким образом, в гальваническом элементе электроны во внешней цепи протекают против поля избыточных зарядов. Какая сила движет электроны во внешней цепи? Как следует из приведенных экспериментов, в контурах с постоянным током полюсных дальнедействующих зарядовых электрических полей не имеется. Электростатические поля между полюсами источника или проводниками и элементами схемы имеют емкостной

характер и не влияют на формирование электрического тока в замкнутых цепях. Для полноты картины рассмотрим цепь переменного тока.

В цепях переменного тока электроны движутся поступательно-возвратно. При известных величинах амплитуды и частоты тока можно определить расстояние, проходимое электронами в одном направлении. Величина тока определяется формулой

$$I = e n v_{др} S = e n (l / t) S, \quad (5)$$

где e – заряд электрона; n – концентрация электронов в проводнике; $v_{др}$ – дрейфовая скорость электронов; S – сечение проводника; l – пройденный путь электроном за половину периода; t – время движения электрона в одну сторону.

Для предельно допустимых токов в медном проводнике при сечении проводника $S = 1 \text{ мм}^2$, при токе $I = 10 \text{ А}$ и частоте 50 Гц длина пути электрона в одну сторону составит

$$l = I t / (e n S) = 10 \cdot 0,01 / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{23} \cdot 1 \cdot 10^{-2}) = 6,6 \cdot 10^{-4} \text{ см} \approx 6,6 \text{ мкм}.$$

Как видно, длина перемещения электронов в цепях переменного тока с частотой в 50 Гц составляет значительно меньше размеров клемм полюсов, поэтому никаких скоплений электронов на полюсах наблюдаться не может.

Исходной силой, движущей электроны, является электродвижущая (сторонняя) сила. Электрический ток в цепях переменного тока создается изменением магнитного поля. Фарадей выразил этот процесс уравнением

$$d\Phi / dt = I R, \quad (6)$$

где Φ – магнитный поток, t – время, I – ток в цепи, R – сопротивление цепи.

В настоящее время процесс создания электрической энергии описывается формулой

$$- d\Phi / dt = E, \quad (7)$$

где E – электродвижущая сила источника, определяемая как напряжение (зарядовое) на разомкнутых клеммах источника.

Из этой формулы следует, что изменение магнитного поля создает эдс, которая, в свою очередь, создает электрическое поле, а поле приводит в движение заряды. Такой механизм имеет два принципиальных противоречия.

1. Так как эдс представляется как сила поля разделенных электрических зарядов, то возникновению эдс должно предшествовать движение зарядов по их разделению, то есть сначала ток, потом разделенные заряды. Это следует из формулы Фарадея (6) и из положения о том, что сторонние силы разделяют внутри источника заряды на полюса. Исходно Фарадей отметил, что изменение магнитного поля создает ток (6).

2. Разделенные заряды на полюсах источника эдс не обеспечивают достаточную мощность для питания внешней цепи.

Первое противоречие очевидное, но дискуссионное: это разная трактовка результата изменения магнитного поля $d\Phi / dt$. В формуле (7) символ " E " имеет смысл электростатической эдс, а Фарадей связал (6) изменение магнитного поля с образованием тока.

Максвелл связал изменение магнитного поля от времени с вихревым (замкнутым) электрическим полем, но первичным здесь является электрическое поле, создающее магнитное поле

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \partial \Phi / \partial t, \quad (8)$$

где \mathbf{E} – напряженность электрического (электрокинетического) поля.

Согласно [2], интеграл по контуру от напряженности есть эдс.

$$\mathcal{E}_{инд} = \oint \mathbf{E}_{инд} d\mathbf{l}.$$

Эта эдс ввиду вихревого характера поля (rot) есть эдс электрокинетического поля. В радиофизике вихревая эдс именуется индукционной эдс и обозначается символом "Э". Электрокинетическая эдс (вихревого поля) отличается от эдс электростатического поля. Особенность эдс индукции заключается в том, что наведенное электрическое поле замкнуто по контуру, но по всему контуру напряженность электрического поля больше нуля и направлена в одну сторону. Кроме того, в этом контуре нет стоковых и истоковых электрических зарядов. Силовые линии вихревой эдс не замыкаются на зарядах и, соответственно, не взаимодействуют с ними.

В [15] представлено, что наведенное электрическое поле образуется в замкнутом контуре вокруг изменяющейся магнитной индукции

$$-\partial\Phi/\partial t = \mathcal{E}_{инд} = \oint \mathbf{E}_{инд} d\mathbf{l},$$

хотя второе уравнение Максвелла (8) указывает на обратное: вихревое электрическое поле создает магнитное поле.

Изменяющееся магнитное поле, действительно, создает изменяющееся электрическое поле, но так как этот процесс несимметричный генерации магнитного поля электрическим, то Максвелл записал его другим, «первым уравнением». Он объединил генерацию вихревого электрического поля с процессом создания тока проводимости. По Максвеллу, как и по Фарадею, следует, что направленное движение заряженных частиц создается напрямую магнитным полем. При этом одновременно создается вихревое электрическое поле

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j} + \varepsilon\varepsilon_0\partial\mathbf{E} / \partial t. \quad (9)$$

Это созданное вихревое электрическое поле является индукционной эдс и создает магнитное поле, что описывается «вторым уравнением» (8). Таким образом, электрическое поле в (8) и (9) по Максвеллу является электрокинетическим, вихревым, но не электростатическим, характеризуемым уравнением

$$\text{div } \mathbf{E} = 4\pi\rho. \quad (10)$$

В формуле (7) символом "E" обозначено напряжение, которое образуется в результате протекания тока под действием изменения магнитного поля. Эта величина, хотя и является переменной, имеет электростатический характер. Если не рассматривать временные (фазовые) процессы между E, Φ, I, то равенство (7) для инженерных расчетов является справедливым. При рассмотрении фаз колебаний E, Φ, I получим, что значение тока оказывается максимальным в момент равенства магнитного потока нулю. Согласно закону Био-Савара-Лапласа, ток в проводнике и магнитное поле вокруг проводника неразрывны.

Из рассмотренного следует, что электрические заряды приводятся в движение изменением магнитного поля (6). Понятие эдс в формуле (7) противоречит (8) и введено, видимо, для удобства использования в инженерных расчетах с использованием только действующих значений электрических величин.

Другим противоречием является невозможность накопления на клеммах такого количества зарядов, сила и мощность электрического поля которых была бы достаточной для перемещения всех электронов внешней цепи. Всегда имеющиеся емкостные заряды полюсов неспособны создавать ток. Приведем обоснование такого утверждения.

В индукционном источнике изменение магнитного поля создает ток (9), а не эдс в виде разделенных зарядов по полюсам. Известно, что в замкнутом контуре, длина которого $L_{\text{конт}} \ll \lambda = c / f$, где λ – длина волны колебаний, f – частота переменного тока, c – скорость света, величина электрического тока во всех сечениях одна и та же. Отсюда следует, что скопления зарядов на отдельных участках цепи не должно быть. Наглядно, на практике это можно продемонстрировать на примере контура из однородного материала, например, медного кольца, на одном из участков которого создается изменяющееся магнитное поле.

Последнее создает ток, величина которого неизменна по всему контуру. Соответственно, нет причин и оснований образования скоплений электронов и, соответственно, электрического поля. Возникает вопрос – какая сила движет электроны на участке, где нет магнитного поля?

Если допустить, что заряды на полюсах накапливаются и создают электрическое поле внутри металла, то необходимо рассмотреть численно силовые характеристики электрического поля этих зарядов. Основным вопросом является природа силы, движущей электроны в металле при протекании тока. Количество зарядов на разомкнутых клеммах источника тока определяется единственным способом – по формуле конденсатора

$$q = C_{\text{клем}} U_{\text{ист}}, \quad (11)$$

где C – электрическая емкость клеммных соединений, $U_{\text{ист}}$ – напряжение на разомкнутых клеммах источника.

Как правило, емкость клеммных соединений составляет десятки – сотни пФ. Избыточные (емкостные заряды) располагаются только на поверхности электродов конденсатора. Силовые линии их замыкаются либо друг на друга (+ на –), либо на «землю». Из электростатики известно, что избыточных зарядов внутри металла не имеется (принцип электрофора и лейденской банки). В связи с этим при соединении внешней цепи к клеммам источника внутри металла клемм и проводников внешней цепи избыточных электронов нет. Пусть имевшиеся на разомкнутых клеммах источника избыточные «конденсаторные» заряды (11) образуют в проводнике внешней цепи электрическое поле. Суммарная сила действия этих зарядов $F_{\text{пол}}$ должна быть больше силы, необходимой для перемещения зарядов (свободных электронов) в проводнике внешней цепи $F_{\text{пров}}$. Сила зарядов полюсов должна создаваться сторонней силой $F_{\text{стор}}$ источника энергии

$$F_{\text{стор}} \geq F_{\text{пол}} \geq F_{\text{пров}}. \quad (12)$$

Сила, действующая на один электрон проводника, определится из равенства

$$F_{\text{пров}} = f_{1\text{пров}} N_{\text{пров}} = f_{1\text{пров}} n l_{\text{пров}} S_{\text{пров}}, \quad (13)$$

где $f_{1\text{пров}}$ – сила, действующая на один электрон проводника; $N_{\text{пров}}$ – число электронов в проводнике; n – концентрация свободных электронов в проводнике; $l_{\text{пров}}$ – длина проводника; $S_{\text{пров}}$ – сечение проводника.

Сила, действующая на один электрон полюса, определится из равенства

$$F_{\text{пол}} = f_{1\text{пол}} N_{\text{пол}} = f_{1\text{пол}} q_{\text{пол}} / e = f_{1\text{пол}} (C_{\text{пол}} U_{\text{ист}}) / e, \quad (14)$$

где $f_{1\text{пол}}$ – сила, действующая на один избыточный электрон полюса; $N_{\text{пол}}$ – число избыточных электронов в полюсе; $q_{\text{пол}}$ – полный заряд на полюсе; $U_{\text{ист}}$ – напряжение на полюсах; $C_{\text{пол}}$ – электрическая емкость полюсов.

Сила, действующая на электрон в электрическом поле, равна $f_1 = e E$, где E – напряженность электрического поля. С учетом этого из (12), (13) и (14) получим

$$e E_{\text{пров}} n l_{\text{пров}} S_{\text{пров}} = e E_{\text{пол}} (C_{\text{пол}} U_{\text{ист}}) / e. \quad (15)$$

Отсюда при предположении, что поле во внешней цепи создается зарядами на полюсах и распределяется равномерно по длине проводника, получим

$$E_{\text{пол}} = E_{\text{пров}} (e n l_{\text{пров}} S_{\text{пров}}) / (C_{\text{пол}} U_{\text{ист}}) = E_{\text{пров}} (q_{\text{пров}} / q_{\text{пол}}) = (U_{\text{ист}} / l) (q_{\text{пров}} / q_{\text{пол}}). \quad (16)$$

Напряженность, создаваемая сторонней силой, должна быть больше напряженности во внешней цепи и при $l_{\text{пров}} = 1$ м, $S_{\text{пров}} = 1$ мм², $C_{\text{пол}} = 100$ пФ, $U_{\text{ист}} = 12$ В из равенства (16) получим

$$E_{\text{пол}} / E_{\text{пров}} = e n l_{\text{пров}} S_{\text{пров}} / (C_{\text{пол}} U_{\text{ист}}) = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{23} \cdot 100 \cdot 10^{-2} / 100 \cdot 10^{-12} \cdot 12 \approx 1,3 \cdot 10^{13} \text{ раз}. \quad (17)$$

Абсолютные значения напряженностей при принятых параметрах составят

$$E_{\text{пол}} = U_{\text{ист}} / l_{\text{пров}} = 12 / 100 = 0,12 \text{ В / см.}$$

$$E_{\text{стор}} = E_{\text{пров}} (q_{\text{пров}}/q_{\text{пол}}) = (U_{\text{ист}}/l_{\text{пров}}) (q_{\text{пров}}/q_{\text{пол}}) = \\ (U_{\text{ист}} / l_{\text{пров}}) (e n l_{\text{пров}} S_{\text{пров}}) / (C_{\text{пол}} U_{\text{ист}}) = (e n S_{\text{пров}}) / C_{\text{пол}} = \\ = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 \cdot 10^{23} \cdot 10^{-2} / 100 \cdot 10^{-12} \approx 1,6 \cdot 10^{12} \text{ В/см.}$$

Ясно, что таких напряженностей сторонние силы в источниках не создают. Единственным способом уменьшить полученную теоретическую напряженность сторонних сил – это увеличить количество зарядов на полюсах. Вследствие емкостного характера избыточных зарядов увеличить их число можно только увеличением напряжения или емкости. Совершенно очевидно, что емкостные заряды на полюсах связаны силовыми линиями друг с другом и не создают полей внутри металла. Емкость полюсов ничем не отличается от дополнительного конденсатора, подключенного к полюсам. Кроме того, наличие избыточных зарядов внутри металла приведет к нарушению силовых связей между атомами и к разрушению металла.

Экспериментальные и теоретические исследования по к.р.п. однозначно показали, что электрический ток в металлах, направленное движение электронов происходит при отсутствии электрического поля в металле и даже против поля заряженных электродов. Аналогичные результаты показывает новая модель работы гальванического элемента [13, 14].

Анализ токопрохождения в цепях переменного тока на основе практических сведений также указывает на отсутствие зарядов на полюсах и, соответственно, отсутствие электрических полей, движущих заряды. Вопрос о природе силы, движущей свободные электроны в металле, остается и для случая переменного тока.

Физическая модель

На основе представлений классической физики, рассмотрим вероятный физический механизм протекания тока без использования гипотезы о силах электрических полей зарядов полюсов.

Из практики ясно, что электродвижущая сила действует на небольшом участке замкнутого контура электрической цепи. В цепях с контактной разностью потенциалов и с гальваническими источниками тока движущей силой являются силы сродства на границе электродов источника (с учетом промежуточных межфазных границ). В цепях переменного тока движущая сила магнитного поля действует на электроны в обмотках генератора. Вся цепь по контуру электростатически нейтральна. При этом перемещение электронов на участке действия сторонней силы приводит в движение электроны проводимости по всему контуру.

При отсутствии избыточных зарядов полюсов и их электростатического поля в индукционных источниках остается еще вихревое, электрокинетическое поле (по Максвеллу), возбуждаемое изменением магнитного поля (9). Отметим, что поле с напряженностью \mathbf{E} , фигурирующее в первом (8) и во втором (7) уравнениях Максвелла, является вихревым и силовое действие на электроны может оказывать только посредством генерации переменного магнитного поля. В рассматриваемых примерах электрокинетическое поле в формировании тока не участвует.

Единственным вариантом формирования тока остается движение электронов проводимости под действием кулоновского взаимодействия их друг с другом при особо жестком потенциале взаимодействия на расстоянии постоянной решетки между электронами. В таком варианте электронная подсистема металла должна представлять собой аналог несжимаемой и нерастягиваемой жидкости. Гидродинамическую модель несжимаемой жидкости использовал Ампер для описания тока при введении понятий

электрического тока и напряжения. Такими же моделями пользовались Ом, Фарадей и Максвелл.

Жесткие потенциалы взаимодействия могут быть обусловлены двумя физическими состояниями электронов. Во-первых, распределением парного потенциала «электрон-электрон» свободных электронов. Для такого случая он должен быть дальнедействующим и одновременно жестким, то есть резко спадающим, но на расстоянии атомного радиуса, на котором проявляется механическая прочность материалов. Все известные жесткие потенциалы имеют малые радиусы, обычно менее $0,1 - 0,5 \text{ \AA}$. Из электростатики и теории взаимодействий атомных частиц известно, что потенциал взаимодействия электронов друг с другом кулоновский, не экранированный, дальнедействующий, мягкий на расстояниях постоянной решетки ($2-3 \text{ \AA}$) и может быть жестким и особо жестким, но только на малых расстояниях (менее $0,1 \text{ \AA}$). Как видно, потенциал электрон-электрон таким условиям не удовлетворяет.

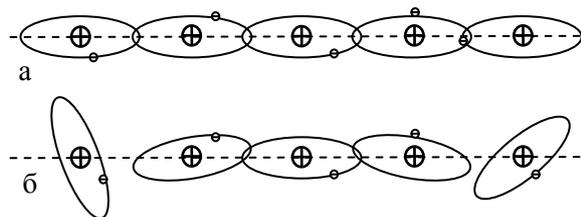


Рис. 4. Цепочка атомов:

а – с пересекающимися эллиптическим орбитами; б – с эллиптическими орбитами при вращательном движении электронов

Другой причиной может быть жесткость связи электрона на своей орбите вокруг атома. В таком варианте короткодействующая жесткость потенциала электрона распространяется с участием атома на размер орбиты. Жесткость металла при механических воздействиях проявляется именно на размерах постоянной решетки. Это позволяет предполагать наличие жесткого потенциала взаимодействия «...атом-электрон-атом...» внутри кристалла именно на расстоянии постоянной решетки. Такой потенциал проявляется через валентные электроны, находящиеся на орбитах.

Электронная подсистема (проводимости) может быть несжимаемой и в то же время подвижной, если валентные электроны атомов (электроны проводимости) будут находиться на своих орбитах вокруг атомов и при приложении направленной силы могут переходить от атома к атому (рис. 4, а). При этом электроны жестко связаны с атомными остовами. Энергия связи валентных электронов составляет в среднем $4 - 5 \text{ эВ}$, а энергия температурного возбуждения $E = 3/2 kT = 0,034 \text{ эВ}$. В таких условиях естественное состояние электрона – связанность с атомом на собственной электронной, валентной орбите. Дискретность энергии связи электрона на орбите, видимо, сопровождается жесткой связью электрона с атомом, то есть жестким потенциалом взаимодействия и на растяжение, и на сжатие. Это, собственно, и есть основной признак квантованности энергии и геометрии орбиты. При пространственном пересечении орбит валентных электронов соседних атомов электроны могут беспрепятственно переходить из атома в атом (рис. 4, а). Для перехода электрона в другой атом нужно еще одно условие – уход имеющегося там электрона в третий атом; то есть должны сложиться условия согласованных движений электронов. Эллиптичность орбит и вращательное движение атомов могут создавать условия периодического пересечения и рассогласования орбит (рис. 4, б). При не пересекающихся орбитах для перевода электрона в другой атом потребуется преодоление некоторого потенциального барьера. При большом рассогласовании (барьере) электрон не может переходить в соседний атом даже при большой приложенной направленной силе.

Основой предлагаемой модели является выражение свободы валентных электронов в возможности перемещения всей электронной подсистемы по контуру силами, действующими на электроны на отдельном участке контура. Жесткость в передаче силы по всему контуру обеспечивается жесткой связью валентного электрона с атомом, атомов друг с другом и несравнимо большей скоростью вращения электрона по орбите в сравнении со средней дрейфовой скоростью направленного движения электрона. Это обеспечивает

многократные сближения электронов соседних атомов и малое расстояние взаимодействия.

Частоту переходов электронов от атома к атому можно оценить по величине дрейфовой скорости электронов. Скорость дрейфа при токе $I = 10$ А, концентрации электронов $n = 1 \cdot 10^{23}$ 1/см³, $S = 1$ мм² равна

$$v_{др} = I / (e \cdot n \cdot S) = 10 / (1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{23} \cdot 10^{-2}) = 6,6 \cdot 10^{-2} \text{ см/с.} \quad (19)$$

При равномерном движении электрон преодолевает расстояние, равное диаметру атома ($a_0 = 3 \text{ \AA}$) за время $t = a_0 / v_{др} = 3 \cdot 10^{-8} / 6,6 \cdot 10^{-2} = 0,5 \cdot 10^{-6}$ с.

За это время электрон совершает 10^6 оборотов вокруг атома. То есть при протекании тока (предельно допустимого ≈ 10 А/мм²) электроны, вращаясь вокруг атомов, переходят от атома к атому в среднем через 10^6 оборотов вокруг ядра. Такой режим движения можно отнести к слабым возмущениям состояния твердого тела. Кристаллическая решетка претерпевает слабые возмущения в виде редких переходов от атома к атому. При этом при отражениях электронов кинетическая энергия, а точнее импульс силы, передается атому, который увеличивает кинетическую энергию, что ведет к нагреву решетки.

Жесткая зарядовая связь подтверждается механическими свойствами кристаллов. Из физики твердого тела известно, что механическая прочность кристаллического тела обусловлена силами притяжения электронов с ионами решетки (модуль упругости на растяжение) и силами отталкивания электронов друг с другом и ионов друг с другом (модуль упругости на сжатие). Величины модулей растяжения – сжатия, приведенные на одну пару зарядов, определяют изменения потенциалов взаимодействия «растяжения – сжатия» в окрестностях минимума универсальной кривой потенциала взаимодействия.

На величину тока в электрической цепи оказывают влияние катушки индуктивности и конденсаторы как накопители электрической энергии. Конденсаторы накапливают заряды. При снятии сторонней силы кулоновская сила накопленных зарядов приводит их к нейтрализации. Передача силы осуществляется таким же образом, как и в случае действия сторонней силы.

Катушка индуктивности при токопрохождении накапливает энергию в виде магнитного поля. При снятии сторонней силы магнитное поле поддерживает имеющуюся величину тока за счет своей энергии, которая иссякает, и ток падает до нуля. Фактически катушка после отключения внешнего источника энергии является источником тока. Энергия магнитного поля преобразуется в энергию движения заряженных частиц. Для расчета электрических цепей удобно представить катушку в виде источника эдс, которую называют эдс самоиндукции. Направление включения эдс самоиндукции относительно тока зависит от вида коммутации и обусловлено электромагнитной инерцией – инерцией взаимосвязи тока и его магнитного поля. При уменьшении коммутируемого тока эдс самоиндукции направлена по току. Ток от эдс самоиндукции суммируется с коммутируемым током и восполняет убыль коммутируемого тока в меру имеющейся энергии магнитного поля. При увеличении коммутируемого тока эдс самоиндукции направлена против тока. При этом ток от эдс самоиндукции вычитается от коммутируемого тока, снижая коммутируемый ток в пределе до исходной величины, но в меру накопленной энергии магнитного поля катушкой.

Инерционность тока при коммутации проявляется зарядкой электрической емкости места разрыва (контакта) коммутирующего элемента C_k до напряжения $U_{конт} = q / C_{конт}$, где q – количество заряда, перемещенного в емкость C_k энергией магнитного поля катушки. Очевидно, что соединением дополнительной параллельной емкости $C_{доп}$ напряжение зарядки можно уменьшить. Отсутствие тока в катушке в начальный момент после включения и неизменность тока при повышении напряжения на катушке объясняются инерционностью накопления магнитной энергии вокруг тока. При этом энергия питающего внешнего источника расходуется на создание магнитного поля вокруг проводника катушки и на постепенное повышение тока. При выключении тока или уменьшении напряжения внешнего источника энергия магнитного поля будет расходоваться на поддержание тока на

имеющемся уровне. Таким образом, теоретическим понятием эдс самоиндукции описываются инерционные процессы прямой взаимосвязи магнитного поля с электрическими зарядами.

Из приведенных выше уравнений Максвелла и закона электромагнитной индукции следует, что эдс самоиндукции в виде разделенных избыточных зарядов, создающих электрическое поле, реально не существует. Изменения напряжения на концах катушки есть следствие неизменности тока в катушке в момент коммутации и изменения сопротивления цепи. Напряжение на концах катушки представляет собой падение напряжения в цепи, создаваемое током катушки. Эдс самоиндукции как теоретической моделью описывается явление электромагнитной инерции, проявляющееся при изменениях электрического тока. Эта модель упрощает расчеты переходных процессов в цепях, но не может быть основой для описания физических процессов в электрических цепях. Фактически при повышении (включении) тока в индуктивности происходит инерционное формирование магнитного поля катушки с одновременным инерционным повышением тока, а при уменьшении (выключении) тока – обратный процесс.

В работах по нейтрализации ионов на поверхности металлов, окислов и пленочных систем методами спектроскопии обратно рассеянных ионов низких энергий, вторично-ионной масс-спектроскопии, спектроскопии атомов отдачи было показано, что валентные электроны в металлах и полупроводниках преимущественно находятся на своих орбитах вокруг атомов. В окислах и ионных кристаллах валентные электроны локализованы на электроотрицательных атомах. В любом случае электроны связаны с атомами, и свободных от атомов электронов нет. Кулоновская сила воздействия передается по орбитальным электронам, жестко связанным с атомами со скоростью распространения электромагнитных процессов, и распределяется равномерно по всем направлениям. Ограничителями силы электронной подсистемы являются поверхность электрода, межатомные границы, межфазные границы. В области действия сторонней силы на электроны действие в одну сторону повышенное, а в другую сторону – ослабленное. Поэтому электронная система по всему контуру оказывается жестким передатчиком сторонней силы по всему контуру.

Выводы

Экспериментальные и теоретические исследования по контактной разности потенциалов, по природе гальванического электричества и по генерации переменного тока показали следующее:

- на разомкнутых полюсах источников электрической энергии постоянного и переменного тока избыточные заряды имеют емкостную природу и не участвуют в формировании электрического тока;
- направленное движение электронов во внешней цепи источника электрической энергии (электрический ток) происходит при электрически нейтральных полюсах источника, при отсутствии электрического поля в металле и даже против поля заряженных электродов;
- предполагается, что движение электронов по всему контуру электрической цепи происходит под действием сторонней (электродвижущей) силы на электроны в области источника и передачи этой силы по жесткой орбитальной подсистеме электронов проводимости по всему контуру.

Литература

1. Калантаров П.Л., Нейман Р.Л. Теоретические основы электротехники. – М.: Гостехиздат, 1952. – 464 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. – М.: Высшая школа, 1973. – 749 с.
3. Круг К.А. Основы электротехники. Т. I. Физические основы электротехники. – М. – Л.: ГОНТИ НКТП Ред. Энергет. Литер., 1938. – 291 с.
4. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1966.
5. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. Пер. с англ. под ред. А.А.Гусева. Учебное руководство. – М.: Наука, 1978. – 791 с.
6. Голин Г.М., Филонович С.Р. Классики физической науки. – М.: Высшая школа, 1989. – 576 с. (Ампер А.М. Труд, представленный Королевской Академии наук 8 октября 1820 г.)
7. Царев Б.М. Контактная разность потенциалов и ее влияние на работу электровакуумных приборов. – М. – Л.: ГИТТЛ, 1949. – 171 с.
8. Матосов М.В. Физика работы выхода электрона. – М.: МАИ, 1989. – 176 с.
9. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука. 1966. – 564 с.
10. Волков С.С., Николин С.В. Физические и аппаратные особенности измерения контактной разности потенциалов методом задерживающего потенциала / В сб.: Электроника. Межвуз. сборник трудов. – Рязань: РГРТУ, 2006. – 131 с. – С. 56-63.
11. 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.
12. Волков С.С., Николин С.В., Патрин А.Н., Шевченко Н.П. Электрическая емкость контактирующих материалов // Вестник РГРТУ. – 2009. – № 3. – Вып. 29. – С. 78-85.
13. Волков С.С., Аристархова А.А., Гумелев В.Ю., Дмитриевский Ю.Е., Китаева Т.И., Николин С.В., Тимашев М.Ю., Толстогузов А.Б., Трухин В.В. Исследование состава и энергетических процессов на поверхности электродов свинцово-кислотного аккумулятора // Известия РАН. Сер. физическая. – 2010. – Т.74. – № 2. – С. 385-392.
14. Волков С.С., Аристархова А.А., Дмитриевский Ю.Е., Китаева Т.И., Николин С.В., Тимашев М.Ю., Толстогузов А.Б., Трухин В.В., Шевченко Н.П. Ионно-нейтрализационная модель работы гальванического элемента // Известия РАН. Сер. физическая. – 2010. – Т.74. – № 2. – С.393-399.
15. Делахей П. Двойной слой и кинетика электродных процессов / Пер. с англ. под ред. акад. А.Н. Фрумкина. – М.: Мир, 1967. – 351 с.
16. Лавров В.М. Теория электромагнитного поля и основы распространения радиоволн. – М.: Изд. "Связь", 1964. – 368 с.