

УДК 537



Малыгин В.М.

Силы магнитного взаимодействия проводников с токами: особенности формулы Ампера и третий закон Ньютона

Малыгин Вячеслав Михайлович, кандидат технических наук, начальник лаборатории отдела метрологии и измерительной техники НИИ электромеханики (ОАО НИИЭМ, г. Истра, Московская область)

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0002-6095-5568>

E-mail: vyacheslav-m-malygin@j-spacetime.com; malygin.viach@yandex.ru

Показано, что утверждение Ампера о том, что элементы тока, расположенные на одной прямой, взаимно отталкиваются, связано с тем, что полученная им формула для определения силового взаимодействия элементов проводников уединенной электрической цепи включает в себя внешнюю магнитную и внутреннюю механическую, а по существу электрическую на уровне микрополей в проводнике, составляющие.

Ключевые слова: магнитное поле; сила Ампера; электрическая цепь; постоянный ток.

Введение

У истоков современной электродинамики лежат работы ученых XIX в., среди которых можно выделить Ампера, Фарадея и Максвелла, причем в работе Ампера (которого Максвелл называл «Ньютоном электричества») результаты проведенных им экспериментов сопровождаются далеко идущими теоретическими обобщениями, являющимися первой попыткой подхода к созданию теории электричества. «Электродинамика» Ампера¹ представляет собой анализ фактов, размышления и удачные догадки ученого, стоявшего на передовых рубежах науки своего времени, относительно только создававшейся теории электричества. Научное наследие таких крупных ученых до сих пор представляет интерес, причем не только их достижения, включенные в учебники физики, но и путь к ним с успехами и заблуждениями, знание которых могут быть полезны следующим поколениям, начинающим изучение физики.

Силы, действующие на токи в магнитных полях, называют в современных курсах физики силами Ампера², и закон Ампера, позволяющий определить силы взаимодействия проводников при протекании по ним электрического тока, в настоящее время широко применяется на практике при расчетах электромагнитных моментов электрических машин (электромеханических преобразователей энергии). Которые были предложены в период с тридцатых годов девятнадцатого века (когда М. Фарадей открыл явление электромагнитной индукции) и до восьмидесятых лет девятнадцатого века (когда Н. Тесла предложил использовать в машинах вращающееся в современном понимании магнитное поле). И в дальнейшем машины эти не претерпели принципиальных изменений, как и мощные силовые трансформаторы³, где закон Ампера тоже используется при расчетах на прочность и устойчивость обмоток.

¹ Ампер А.-М. Электродинамика. М.: Изд-во АН СССР, 1954.

² Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 3. Электричество. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. С. 212.

³ Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. С. 21, 367.

Однако и теперь, судя по научно технической литературе и некоторым журнальным публикациям (примеры приведем ниже), остаются не понятыми некоторые особенности и физический смысл формулы, предложенной самим Ампером для определения силы взаимодействия двух элементов постоянного тока в электрической цепи. Поэтому выясним более детально, что же сделал Ампер и как он получил свою формулу.

Формула Ампера

На основании результатов опытов, подробно описанных и позволивших установить общий вид формулы и значения входящих в нее постоянных коэффициентов, Ампер предложил формулу¹ для определения силы взаимодействия двух элементов линейных проводников с постоянным электрическим током в них в виде

$$dF = k(I_1 I_2 ds_1 ds_2 / r^2) (\cos \varepsilon - (3/2) \cos \theta_1 \cos \theta_2), \quad (1)$$

где k – коэффициент, определяемый принятой системой единиц, I_1 и I_2 – токи в элементах проводника, ds_1 и ds_2 – длины элементов проводника (элементов тока), r – длина прямой, соединяющей середины элементов проводника, ε – угол между двумя элементами тока, θ_1 и θ_2 – углы между элементами тока и прямой r . В (1) длины прямолинейных отрезков (элементов проводников с токами) ds_1 и ds_2 должны быть много меньше длины отрезка r (расстояния между ds_1 и ds_2).

В настоящее время выражение (1) представляют в векторной форме, и его можно, вынеся за скобки $1/r^2_{12}$, чтобы приблизить к форме записи Ампера, написать в виде²

$$dF_{12} = k(I_1 I_2 / r^2_{12}) [(3/r^3_{12})(ds_1 r_{12})(ds_2 r_{12}) - (2/r_{12})(ds_1 ds_2)] \quad (2)$$

Из курсов математики известно, что скалярное произведение векторов равно произведению численных значений векторов на косинус угла между ними, например, $ds_1 r_{12} = ds_1 r_{12} \cos \theta_1$. Исходя из этого, можно перейти от (2) к (1), изменение знаков с плюс на минус условно и связано с тем, считать положительным притяжение параллельных проводников с токами одного направления или их отталкивание. Кроме того, в выражении (1) имеется сомножитель $1/2$, чего нет в (2), к чему мы вернемся позже. А пока попробуем разобраться с физическими позициями с тем, что же сделал Ампер.), к чему мы вернемся позже. А пока попробуем разобраться с физическими позициями с тем, что же сделал Ампер.

Обсуждение экспериментов Ампера

Эксперименты Ампера им подробно описаны, они доступны для повторения и никогда их результаты не оспаривались, а формулы, полученные в результате обобщения многочисленных достоверных экспериментальных фактов, «имеют главным образом то преимущество, что они остаются независимыми как от гипотез, которыми могли пользоваться авторы при отыскании этих формул, так и от гипотез, которые впоследствии могут прийти им на смену»³.

Ампер придерживался точки зрения, что силы взаимодействия элементов проводника с током направлены в пространстве так, что совпадают с прямой, соединяющей середины элементов тока, и при этом выполняется третий закон Ньютона. В «Основах теории электричества» И. Тамма сказано, что использованный Ампером математический прием разложения конечных токов на совокупность токов элементарных в известном отношении соответствует современным физическим представлениям⁴.

Что касается третьего закона Ньютона, то известно, что силы взаимодействия двух замкнутых токов удовлетворяют принципу равенства действия и противодействия, что проверено экспериментально. То же имеет место и в случае переменного электромагнитного поля, но для выполнения третьего закона Ньютона в этом случае должно обобщить понятие импульса так, чтобы обеспечить справедливость этого принципа (который должен выполняться во всех электромагнитных явлениях)⁵.

Но как конкретно показать равенство действия и противодействия при взаимодействии элементов проводников с постоянным током в одной электрической цепи – этот вопрос оставлен открытым, и мы постараемся в нем разобраться. При этом рассмотрим проблему шире с учетом того, что это область электромеханики, где нужно учитывать как магнитные силы, так и силы механические.

¹ Ампер А.-М. Указ. соч. С. 37, 425.

² Тамм И.Е. Основы теории электричества. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. С. 206.

³ Ампер А.-М. Указ. соч. С. 12.

⁴ Тамм И.Е. Указ. соч. С. 202.

⁵ Там же. С. 205.

Покажем, что действующая на элемент проводника с током сила (в работе самого Ампера), – это суммарная сила (сумма векторов) внешней (магнитной) и внутренней (механической) сил. Сделаем это на примере электрической цепи с линейными проводниками в виде сторон прямоугольника, изображенной на рис. 1.

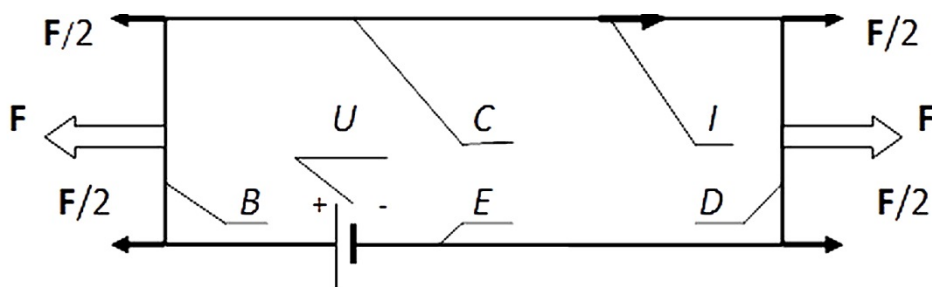


Рис. 1. Электрическая цепь постоянного тока I , с источником электродвижущей силы U , где F это результирующие силы, приложенные к противоположным сторонам B и D цепи (контура) и уравновешивающие друг друга. Подобные силы, приложенные к сторонам C и E , условно не показаны.

Цепь жесткая и проводники не могут деформироваться под действием приложенных к ним сил со стороны магнитного поля (или со стороны других элементов проводников с током на расстоянии, как считалось во времена Ампера, когда не было введено понятие поля). Впрочем, при постоянных токах введение понятия магнитного поля дает правильную физическую картину явления, но на результаты расчетов не влияет¹. Жесткость цепи может быть обеспечена также и за счет налагаемых связей из диэлектрика, практически исключающих изгиб и движение проводников.

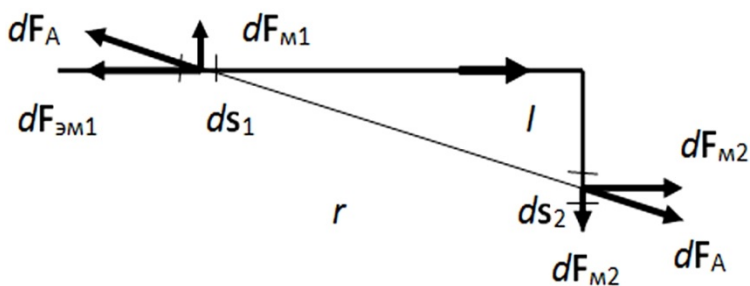


Рис. 2. Разложение силы Ампера dF_A на две составляющие в виде магнитной силы dF_M и механической силы $dF_{эм}$.

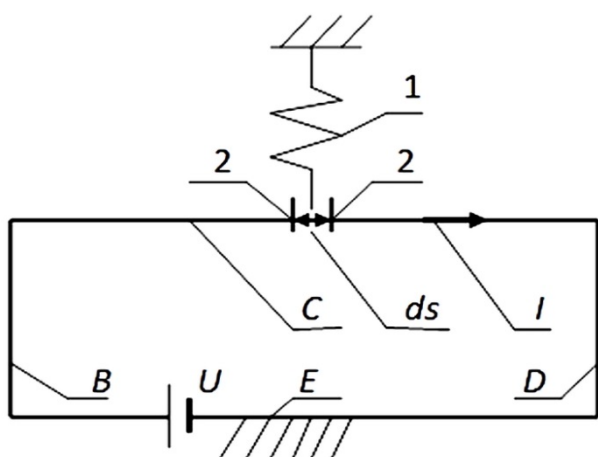


Рис. 3. Измерение магнитной составляющей силы Ампера, где 1 – динамометр, 2 – скользящие контакты.

свободные электроны), отклоняя их движение к внешней стороне проводников контура и оказывая в итоге давление на неподвижную жесткую атомную решетку проводника. Это сила внешняя маг-

Равновесие механической системы цепи рис. 1 не нарушится, если разделить пополам приложенные к сторонам B и D прямоугольника силы (равнодействующие распределенным магнитным силам) и перенести к углам, как показано на рис. 1. Тогда на любой элемент проводника C будет действовать (в современном понимании) внешняя сила со стороны магнитного поля, направленная перпендикулярно ему (на рис. 1 условно не показана), и механическая сила $F/2$ со стороны проводников B и D , растягивающая все элементы проводника C (внутренняя для проводника C сила). То же и для других проводников. Интересно, что здесь появляется упомянутый ранее множитель $(1/2)$, а результирующая сила, которую определял Ампер, показана на рис. 2, где использован известный в теоретической механике метод сечений².

Магнитную составляющую силы, направленную перпендикулярно элементу проводника, можно измерить, схема эксперимента показана на рис. 3.

Магнитные силы действуют на движущиеся направленно в проводнике под действием ЭДС заряды (здесь

¹ Там же. С. 528.

² Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. Т. 1: Статика и кинематика. М.: Наука, 1982. С. 15, 103.

нитная (действующая со стороны магнитного поля, создаваемого всеми другими элементами цепи). А вот с продольной относительно элемента проводника силой ситуация сложнее. Наибольшие споры и недоумение вызывает до сих пор¹ утверждение Ампера о том, что элементы тока, расположенные на одной прямой, взаимно отталкиваются. Максвелл о работе Ампера писал, что «метод Ампера, однако, хотя и изложен в индуктивной форме, не позволяет нам проследить процесс образования и развития идей, которыми он руководствовался»².

Работе Ампера уделил внимание и А. Пуанкаре, который отметил, что опытов, которые относились бы к взаимодействию двух незамкнутых токов, не существует, и поэтому Ампер, сам того не замечая, прибег к гипотезам, которые приводят к противоречиям, так как исчезает *единство магнитной силы* в разных ситуациях. Сравнивая работы Ампера, Гельмгольца и Максвелла Пуанкаре показал поучительность истории развития теории электричества и важность ее знания, так как она помогает понять, какие ловушки встречает ученый на своем пути и как он может надеяться их избежать³.

Но если мы учтем внутренние для проводника электрической цепи механические силы (электрические силы в атомной решетке проводника), то ситуация с объяснением экспериментов Ампера проясняется. Обратимся к экспериментальной установке Ампера, изображенной у него на рис. 8, а у нас схема этого эксперимента представлена на рис. 4.

На такой установке можно измерить силу F , действующую на сторону D и изображенную также на рис. 1. Но в отличие от ситуации на рис.1 здесь растягивающие силы в проводниках C и E отсутствуют, из-за наличия скользящих контактов механическая целостность проводников C и E нарушена (а электрический ток не прерывается). А так как это статика, то действующая на проводник D распределенная по его длине магнитная сила уравнивается встречно направленной силой со сторон динамометра 1.

Механические силы $(1/2)F$, растягивающие стороны C и E на рис. 1, не меняют значений по длине этих сторон, но зависят от геометрии цепи и значений тока. Первопричиной появления этих механических сил являются магнитные силы, приложенные к сторонам B и D , то есть магнитное взаимодействие движущихся внутри проводника электрических зарядов, в том числе удаленных от того элемента проводника, действие сил на который мы определяем. И именно к получению зависимости результирующей силы dF_D взаимодействия элементов проводников цепи с током от значений тока и геометрии цепи стремился Ампер. При этом с учетом недостаточного развития науки об электричестве в то время он «избегал упоминать о тех представлениях, которые могли у меня сложиться в отношении причины и природы сил»⁴.

Теперь же с использованием понятия магнитного поля и имеющихся знаний о природе электрического тока и внутреннем строении вещества, изложенных в курсах физики, об этом можно судить более определенно. На элемент проводника ds , рассмотренный Ампером, действует поперечная магнитная сила dF_m , создающая касательные напряжения в плоскости поперечного сечения проводника, и растягивающие этот элемент перпендикулярные плоскости поперечного сечения проводника механические силы $dF_{эм}$, создающие напряжения растяжения в проводнике. А так как рассматривалась статика, то эти силы уравниваются суммарными в плоскостях сечений касательными и нормальными напряжениями в материале проводника, что в целом и обеспечивает выполнение третьего закона Ньютона.

Внутренние силы изучает механика, где физические свойства тел в модели сплошной среды (проводники электрической цепи) задаются феноменологическими закономерностями (в твердых

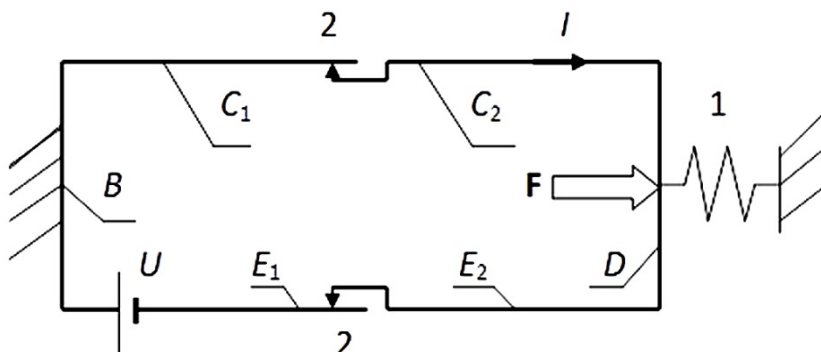


Рис. 4. Упрощенная схема эксперимента Ампера, условные обозначения те же, что и на предыдущих рисунках.

¹ Демирчян К.С., Жохова М.П. Электродинамика проводников с токами по Максвеллу // Электричество. 2005. № 7. С. 41–51; Николаев Г.В. Современная электродинамика и причины ее парадоксальности. Томск.: Твердыня, 2003. 149 с.

² Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1952. С. 382.

³ Пуанкаре А. О науке. М.: Наука, 1983. С. 138.

⁴ Ампер А.-М. Указ. соч. С. 10.

телах это закон Гука)¹ и есть понятие напряжения (механического) в точке среды. Внутренняя механическая сила (растягивающая проводник) – это, по существу, усредненная *электрическая сила* (с учетом действующих между атомами микрополей² по длине проводника). На элемент ds действуют как магнитная (поперечная) составляющая, так и механическая (продольная со стороны соседних элементов проводника) составляющая силы Ампера. Внешние же механические силы к проводникам цепи не приложены. И мы убеждаемся на рассмотренном примере в единстве физики, где границы между ее разделами является весьма условными.

Использование при расчетах формулы Ампера

Большее, чем формула (1), распространение³ получило еще одно выражение для определения силы взаимодействия двух элементов проводников с током, которое представим в виде, удобном для сравнения с (1) и (2)

$$d\mathbf{F}_{12} = k(I_1 I_2 / r_{12}^2) (ds_2 \times (ds_1 \times \mathbf{r}_{e12})), \quad (3)$$

где косым крестом обозначено векторное произведение, а \mathbf{r}_{e12} – это единичный вектор, совпадающий по направлению с вектором \mathbf{r}_{12} .

Но у Ампера это не самостоятельная формула для расчета значения dF , а одна из двух составляющих в (1), «зачаток известного закона Ампера», как сказано в послесловии к его работе. Явно это не просматривается в (1) из-за того, что для более компактной записи окончательной формулы Ампер произвел тригонометрические преобразования, введя в (1) $\cos \varepsilon$. При сравнении формул (2) и (3) с формулой (1) надо еще учесть, что Ампер использовал сферическую тригонометрию, а не векторную алгебру.

Выражение (3) – это магнитная составляющая $d\mathbf{F}_M$ силы Ампера $d\mathbf{F}_A$. Силы $d\mathbf{F}_M$ направлены перпендикулярно каждому отрезку ds_1 и ds_2 , направления их и значения не совпадают, как видно на рис. 2. Результаты расчета значения силы dF взаимодействия элементов ds_1 и ds_2 проводников цепи с током по формулам (1) и (3) не должны совпадать, что и подтвердили В.В. Кузьмин и В.С. Шпатенко⁴ на примере контура квадратной конфигурации (но не объяснили причин этого, а представили как ошибку Ампера, что свидетельствует о затруднениях с пониманием его работы).

А объяснение заключается в том, что сумма (у нас сумма двух векторов) не может быть равна одному из слагаемых, если только при некоторых условиях второе слагаемое не принимает нулевого значения. Что имеет место в частном случае, а именно при вычислении результирующей силы, действующей на элемент ds_2 второй электрической цепи со стороны всех элементов замкнутого тока I_1 первой электрической цепи, когда использование формул (1) и (3) приводит к одинаковому результату. И, естественно, не нужно проводить лишние вычисления, используя (1), а сразу обратиться к (3).

Математическое доказательство этого приведено в «Основах теории электричества» Тамма⁵, проще же можно дать объяснение с физических позиций, заключающееся в следующем. Механические силы $d\mathbf{F}_{эм}$ в первой замкнутой целостной цепи являются *внутренними для проводников этой цепи*, в статике они взаимно уравновешиваются и не действуют на элемент ds_2 второй цепи. На него со стороны всех элементов замкнутого тока I_1 действует только внешняя результирующая составляющая магнитных сил (со стороны магнитного поля).

В настоящее время с введением понятия магнитного поля⁶ силу, с которой действует магнитное поле на элемент линейного проводника с током, помещенный в это поле, определяют по формуле⁷

$$d\mathbf{F} = I(ds \times \mathbf{B}), \quad (4)$$

где \mathbf{B} – вектор магнитной индукции в точке (в макроскопическом понимании) пространства, в которой находится элемент проводника, ds – вектор, совпадающий по направлению с током и характеризующий элемент длины линейного проводника (или его обозначают в виде $d\mathbf{l}$). И это подход, признающий реальное существование полей, а выражение (4) называют законом Ампера в честь его вклада в развитие теории электромагнетизма.

¹ Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Указ. соч. С. 103.

² Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 1. Механика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. С. 94.

³ Демирчян К.С., Жохова М.П. Указ. соч.; Тамм И.Е. Указ. соч.

⁴ Кузьмин В.В., Шпатенко В.С. К выбору вариантов закона Ампера для расчета пондеромоторных сил в токоведущих контурах. // Электротехника. 2013. № 7. С. 41–44.

⁵ Тамм И.Е. Указ. соч. С. 568.

⁶ Там же. С. 199.

⁷ Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. С.160.

Однако если нужно проводить расчеты элементов проводников цепи на механическую прочность, то придется считаться и с наличием рассмотренных выше продольных механических сил в элементах проводников. Для чего, интегрируя выражение (4) по длине проводника цепи (а при необходимости по его объемным элементам), следует найти силы, действующие на участки цепи, которые показаны на рис. 1, и далее воспользоваться методами теоретической механики и сопротивления материалов для определения механических напряжений. Например, в экспериментах с получением магнитных полей с напряженностью до 40 Тесла катушки индуктивности иногда разлетались на куски, взрывались¹ под действием сил Ампера, что было эквивалентно действию гидростатического давления внутри соленоида в несколько тысяч атмосфер (наглядная и полезная при изучении отдельных случаев электродинамики аналогия). А если проводники цепи рис. 1 гибкие (без связей), то цепь примет форму окружности.

Значение магнитной индукции, созданной элементом тока, определяют в настоящее время в курсах физики по формуле, имеющей в системе единиц СИ следующий вид

$$d\mathbf{B} = (\mu_0 / 4\pi)(I / r^2)(ds \times \mathbf{r}_e), \quad (5)$$

где r – расстояние от элемента проводника с током до точки определения вектора магнитной индукции, \mathbf{r}_e – единичный вектор, проведенный от ds к точке, в которой рассчитывают магнитную индукцию. Выражение (5) названо законом Био-Савара (окончательную форму ему придал математик Лаплас) в честь этих ученых, также стоявших у истоков развития теории электромагнетизма. А интегрируя (5) по всем элементам тока, получим значение вектора \mathbf{B}

$$\mathbf{B} = (\mu_0 / 4\pi) \int (I / r^2)(ds \times \mathbf{r}_e)$$

в выражении (4) и затем перейдем к (3).

Заключение

Изучая работу Ампера, можно выяснить, что в экспериментах он имел дело с точки зрения классической теоретической механики со статикой (в проводниках и окружающем их пространстве, в диэлектрике), а с точки зрения теории электричества с частным случаем макроскопической электродинамики. Когда динамические электромагнитные процессы локализованы в пространстве, занятом проводниками с током в них, а в остальном пространстве вне проводников электрического поля нет² из-за почти идеального баланса положительных и отрицательных зарядов в проводнике. Зато вне проводников имеется не меняющееся во времени магнитное поле, это магнитостатика. Ампер был в шаге от открытия явления электромагнитной индукции (если бы не исключал при экспериментах движение проводников друг относительно друга), которая вскоре была обнаружена Фарадеем. Однако Ампер высказал смелое для того времени предположение, что магнитное поле создают не магнитные заряды, а электрические токи, в том числе молекулярные³, что затем подтвердилось. Так мы считаем и сейчас, не заходя в область квантовой механики с элементарными частицами и их спином, где в физике проходит граница наших сегодняшних знаний.

В завершение заметим, что эксперименты Ампера явились истоком некоторых последующих практических достижений электромеханики. Схема на рис. 4 по существу представляет собой до предела упрощенную схему модели известного из курсов физики и электрических машин электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением, развернутая на плоскости, где роль заторможенного якоря выполняет проводник D , и это также схема простейшего заторможенного рельсотронного линейного двигателя (ускорителя или пушки). Принцип его действия вполне объясним с использованием закона Ампера и электродинамики Максвелла, так как при движении стороны D относительно B из-за увеличения магнитного потока в контуре возникнет электродвижущая сила, направленная встречно источнику электропитания цепи U .

Интерес к почти забытым рельсотронам возник после сообщений в прессе об исследованиях возможности применения их для нужд военно-морского флота США⁴; подобные исследования ведутся

¹ Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика/ М.: Наука, 1987. С. 80.

² Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 5. Электричество и магнетизм. Пер. с англ. – М.: Едиториал УРСС, 2004. С. 26.

³ Сивухин Д.В. .Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М.:ФИЗМАТЛИТ, 2006. С. 234.

⁴ См., напр.: Office of Naval Research. "Electromagnetic Railgun Program." *Official Website of US Office of Naval Research*. ONR, US Department of the Navy, n.d. Web. <<http://www.onr.navy.mil/Science-Technology/Departments/Code-35/All-Programs/air-warfare-352/Electromagnetic-Railgun.aspx>>; Рельсотрон ВМФ США стал самым мощным оружием планеты [Электронный ресурс] // SOFTMIXER.COM. Сетевой журнал. 2010. Январь. Режим доступа: <http://www.softmixer.com/2011/01/blog->

и в России¹. Однако заметим, что для достижения удовлетворительных характеристик подобных устройств надо будет еще решить много сложных научно технических проблем.

Выводы

Формула, полученная Ампером для определения сил, возникающих в неподвижных проводниках электрической цепи постоянного тока вследствие магнитного взаимодействия элементов их токов, включает в себя сумму двух сил. Это внешняя для элемента проводника магнитная перпендикулярная к нему сила и внутренняя для проводника механическая, а по существу – дополнительная электрическая на уровне микрополей между атомами проводника цепи продольная сила.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алимов Т. В России впервые испытали пушку-«рельсотрон» [Электронный ресурс] // RG.RU Русское оружие. Интернет-портал «Российской газеты». 2016. 12 июля. Режим доступа: <https://rg.ru/2016/07/12/v-rossii-vpervye-ispytali-pushku-relsotron.html>.
2. Ампер А.-М. Электродинамика. М.: Изд-во АН СССР, 1954. 492 с.
3. В России испытан рельсотрон собственного производства [Электронный ресурс] // Взгляд. Деловая газета. 2016. 12 июля. Режим доступа: <http://www.vz.ru/news/2016/7/12/821036.html>.
4. Демирчян К.С., Жохова М.П. Электродинамика проводников с токами по Максвеллу // Электричество. 2005. № 7. С. 41–51.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. М.: Энергия, 1980. 928 с.
6. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 319 с.
7. Капица П.Л. Эксперимент. Теория. Практика. М.: Наука, 1987. 496 с.
8. Кузьмин В.В., Шпатенко В.С. К выбору вариантов закона Ампера для расчета пондеромоторных сил в токоведущих контурах // Электротехника. 2013. № 7. С. 41–44.
9. Лойцянский Л.Г., Лурье А.И. Курс теоретической механики. Т.1. Статика и кинематика. М.: Наука, 1982. 352 с.
10. Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. М.: Гостехтеориздат, 1952. 688 с.
11. Николаев Г.В. Современная электродинамика и причины ее парадоксальности. Томск.: Твердыня, 2003. 149 с.
12. Пуанкаре А. О науке. Пер. с франц. М.: Наука, 1983. 560 с.
13. Рельсотрон ВМФ США стал самым мощным оружием планеты [Электронный ресурс] // SOFTMIXER.COM. Сетевой журнал. 2010. Январь. Режим доступа: http://www.softmixer.com/2011/01/blog-post_9330.html.
14. Рельсотрон для эсминца США «Zumwalt»: Фантастическое оружие для фантастического корабля [Электронный ресурс] // Информационное агентство Newsader. 2016. 15 февр. Режим доступа: <http://newsader.com/19071-flot-rassmatrivaet-yelektromagnitnyu/>.
15. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1: Механика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 560 с.
16. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 656 с.
17. Сычев В. Разгон болванки до сверхзвуковой скорости. Что такое рельсотрон и когда он появится на вооружении [Электронный ресурс] // Meduza. 2016. 5 июня. Режим доступа: <https://meduza.io/feature/2016/06/05/razgon-bolvanki-do-sverhzhukovoy-skorosti>.
18. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М. ФИЗМАТЛИТ, 2003. 616 с.
19. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 5 Электричество и магнетизм. М.: Едиториал УРСС, 2004. 304 с.
20. Office of Naval Research. "Electromagnetic Railgun Program." *Official Website of US Office of Naval Research*. ONR, US Department of the Navy, n.d. Web. <<http://www.onr.navy.mil/Science-Technology/Departments/Code-35/All-Programs/air-warfare-352/Electromagnetic-Railgun.aspx>>.
21. "Russia's Rail-Gun Passed Its First Tests." *South Front*. N.p., 14 Jul. 2016. Web. <<https://southfront.org/russias-rail-gun-passed-its-first-tests/>>.

Цитирование по ГОСТ Р 7.0.11—2011:

Малыгин, В. М. Силы магнитного взаимодействия проводников с токами: особенности формулы Ампера и третий закон Ньютона / В.М. Малыгин // *Пространство и Время*. — 2016. — № 3—4(25—26). — С. 86—92. Стационарный сетевой адрес: 2226-7271prov_st3_4-25_26.2016.34.

post_9330.html; Рельсотрон для эсминца США «Zumwalt»: Фантастическое оружие для фантастического корабля [Электронный ресурс] // Информационное агентство Newsader. 2016. 15 февр. Режим доступа: <http://newsader.com/19071-flot-rassmatrivaet-yelektromagnitnyu/>; Сычев В. Разгон болванки до сверхзвуковой скорости. Что такое рельсотрон и когда он появится на вооружении [Электронный ресурс] // Meduza. 2016. 5 июня. Режим доступа: <https://meduza.io/feature/2016/06/05/razgon-bolvanki-do-sverhzhukovoy-skorosti> и др.

¹ Алимов Т. В России впервые испытали пушку-«рельсотрон» [Электронный ресурс] // RG.RU Русское оружие. Интернет-портал «Российской газеты». 2016. 12 июля. Режим доступа: <https://rg.ru/2016/07/12/v-rossii-vpervye-ispytali-pushku-relsotron.html>; В России испытан рельсотрон собственного производства [Электронный ресурс] // Взгляд. Деловая газета. 2016. 12 июля. Режим доступа: <http://www.vz.ru/news/2016/7/12/821036.html>; "Russia's Rail-Gun Passed Its First Tests." *South Front*. N.p., 14 Jul. 2016. Web. <<https://southfront.org/russias-rail-gun-passed-its-first-tests/>>.