**Электродинамический расчёт рельсотрона**

с использованием понятий векторного потенциала, магнитного поля и силы Лоренца

а также формулы для силы действующей на движущийся заряд взятой из "Новой электродинамики" Ф.Ф.Менде

уточнённый привлечением понятий скалярного магнитного поля и силы Николаева

с последующим выводом

формулы **Взаимодействия элементов тока**

А.Ю.Дроздов

В предыдущей работе [1] было показано, что в конфигурации рельсотрона использование формул Лоренца при вычислении взаимодействия отдельных токовых элементов друг с другом не позволяет корректно вычислить место приложения сил реакции (отдача рельсотрона). Данная проблема была поднята автором на научных форумах [2] и [3].

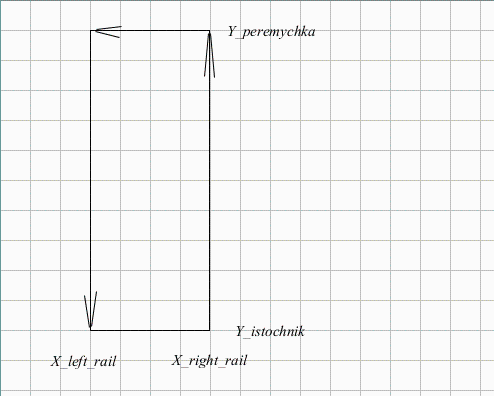
В результате ее обсуждения был сформулирован план эксперимента, который был осуществлён автором [4]. Впоследствии автором был осуществлён ещё один эксперимент с жидким металлом [5]. Результаты проведенных экспериментов по мнению автора показывают наличие продольной силы реакции приложенной к рельсам.

В связи с этим в данной работе опробована усовершенствованная методика электродинамического расчёта рельсотрона с привлечением понятия скалярного магнитного поля Николаева [7], с помощью которой место приложения сил реакции может быть вычислено. В результате обнаружено, что полученная сила взаимодействия отдельных токовых элементов удовлетворяет третьему закону Ньютона. Обобщая полученный результат была выведена общая формула взаимодействия элементов тока, которая отличается от уравнений Лоренца-Грассмана [8]. Применимость полученной формулы обоснована ссылками на рассуждения Е.И. Тамма. Кроме того данная формула была протестирована при рассчёте силы взаимодействия бесконечных параллельных проводников.

Векторный потенциал в точке , создаваемый участком тока , расположенном в точке



Теперь попробуем решить задачу вычисления отдачи рельсотрона



Зададим пределы интегрирования в соответствии с размерами рельсотрона



















Рассчитаем векторный потенциал создаваемый перемычкой, то есть снарядом, которую мы расположим вдоль оси икс, пусть ток по ней течёт справа налево, длина перевычки равна 1





Векторный потенциал, создаваемый правой рельсой





Векторный потенциал, создаваемый левой рельсой





Суммарный векторный потенциал, создаваемый правой и левой рельсой





Магнитное поле создаваемое правой и левой рельсой в области перемычки





Рассчитаем векторный потенциал создаваемый источником тока, который мы расположим вдоль оси икс, ток по ней течёт с лева на право, длина равна 1





Находим также магнитное поле создаваемое источником тока в области перемычки





Применяем формулу силы Лоренца - находим таким образом выражение для силы, с которой магнитное поле источника действует на перемычку





Интегрируем по длине перемычки





Применяем формулу силы Лоренца - находим таким образом выражение для силы, с которой магнитное поле правой рельсы действует на перемычку





Интегрируем по длине перемычки





Применяем формулу силы Лоренца - находим таким образом выражение для силы, с которой магнитное поле левой рельсы действует на перемычку





Интегрируем по длине перемычки





В результате мы видим, что сила, действующая со стороны рельс на перемычку на много больше силы, действующей со стороны источника тока на перемычку

Магнитное поле, создаваемое перемычкой в области правой рельсы и в области левой рельсы







Применяя формулу силы Лоренца - находим таким образом выражение для силы, с которой магнитное поле перемычки действует на правую рельсу и на левую рельсу















Таким образом мы видим, что применение формулы Лоренца для расчёта сил, действующих в конфигурации рельсотрона приводит к тому, что сила Лоренца, с которой магнитное поле рельсы действует на перемычку не равна по модулю и не противоположна по направлению силе, с которой магнитное поле перемычки действует на рельсу. Данный расчёт, произведенный в рамках классической электродинамики, показывает, что формула Лоренца является не достаточной для электродинамического вычисления отдачи рельсотронной пушки. Потому как в рамках классической электродинамики получается, что рельсы не должны испытывать отдачу. Однако такой вывод противоречит результатам экспериментов, например [4], [5], [7].

**Использование подхода Ф.Ф.Менде**

В работе Ф.Ф.Менде [6] приводится формула (2.6), где определены все силы, действующие на заряд, движущийся в поле векторного потенциала.



Применим эту формулу для решения задачи.

Рассмотрим третье слагаемое формулы 2.6: градиент потенциальной энергии заряда, движущегося в поле векторного потенциала, как градиент скалярного произведения векторного потенциала на вектор тока второго проводника. Вычислим градиент потенциальной энергии тока рельс и источника в поле векторного потенциала перемычки

Градиент потенциальной энергии заряда, движущегося в поле векторного потенциала, как градиент скалярного произведения векторного потенциала на вектор тока второго проводника. Вычислим градиент потенциальной энергии тока рельс и источника в поле векторного потенциала перемычки











Расчёт показал, что рельсы в поле векторного потенциала перемычки не испытывают влияние градиента потенциальной энергии тока в поле векторного потенциала, но противоположная перемычка (источник тока) испытывает. Поэтому интегрируя по длине источника тока этот градиент, получаем в интеграле две компоненты силы продольную и поперечную





Подставляем пределы интегрирования





После упрощения видим, что осталась только поперечная компонента силы.





Исследуем теперь второе слагаемое формулы Менде 2.6. Записываем выражение для конвективной производной





Вычисляя конвективную производную вектора тока второго проводника в поле векторного потенциала, создаваемого первым проводником, находим "конвективную" силу, действующую на источник тока и на рельсы в поле векторного потенциала перемычки

















Интегрируем по длине источника тока



Подставляем пределы интегрирования





Конвективную силу приложенную к источику можно считать равной нулю.

Интегрируем по длине рельс













Конвективная сила, приложенная к рельсам направлена вдоль оси x, а в рамках данного исследования эта компоненты силы нас не интересует. Попутно здесь мы можем отметить, что в рамках данной конфигурации конвективная сила, приложенная к рельсам оказалась полностью равной силе Лоренца, приложенной к рельсам.

Теперь рассчитываем силу, приложенную к верхней перемычке - снаряду.

Вычислим градиент потенциальной энергии тока верхней в поле векторного потенциала рельс и источника тока











Интегрируем





Применяя пределы интегрирования - длину перемычки, находим потенциальную компоненту силы, действующую на перемычку со стороны источника тока





Вычисляем конвективную компоненту силы, действующую на перемычку со стороны источника и рельс









Интегрируем по длине перемычки









Применяем пределы интегрирования









Таким образом мы видим, что применение формулы 2.6 из электродинамики Менде показало что конвективная сила приложенная к перемычке в поле векторного потенциала рельс численно равна силе Лоренца, приложенной к перемычке в магнитном поле, создаваемом рельсами. Потенциальная сила приложенная к перемычке в поле векторного потенциала источника тока численно равна и противоположна по направлению потенциальной силе, приложенной к источнику в поле векторного потенциала перемычки. Потенциальная сила, приложенная к рельсам в поле векторного потенциала перемычки равна нулю, а конвективная сила, приложенная к рельсам направлена перпендикулярно рельсам. То есть формула Менде 2.6 не позволяет рассчитать отдачу рельсотрона приложенную к рельсам, что указывает на неполноту этой формулы

**Учёт скалярного магнитного поля**

Попытаемся дополнить полученное решение, применив подход Геннадия Николаева.

Вычислим скалярное магнитное поле создаваемое перемычкой как дивергенцию векторного потенциала создаваемого перемычкой, взятую с обатным знаком





Визуализируем скалярное магнитное поле, создаваемое перемычкой в плоскости рельсотрона



Дивергенция векторного потенциала, создаваемая перемычкой в области правой рельсы и в области левой рельсы







Визуализируем

Дивергенция векторного потенциала, создаваемая перемычкой в области правой рельсы



Дивергенция векторного потенциала, создаваемая перемычкой в области левой рельсы



Применяя формулу силы Николаева - находим таким образом выражение для силы, с которой скалярное магнитное поле перемычки действует на ток правой рельсы и на левой рельсы







Интегрируем силу Николаева по длине рельсы











Сравниваем с силой Лоренца, с которой магнитное поле рельс действует на перемычку





Таким образом мы видим, что сила Николаева, действующая со стороны скалярного магнитного поля создаваемого током перемычки на ток рельсы равна по модулю и противоположна по направлению силе Лоренца, действующей со стороны магнитного поля создаваемого током рельсы на ток перемычки.

**Расчёт для малых элементов тока**

Мы можем уточнить этот результат расчётом не в интегральной, а в дифференциальной форме





Векторный потенциал, создаваемой бесконечно малым отрезком тока центральной части перемычки$





Магнитное поле создаваемое этим бесконечно малым отрезком тока центральной части перемычки





Бесконечно малый отрезок тока в центральной части перемычки создаёт магнитное поле в центральной точке правой и левой рельсы







Применяя формулу силы Лоренца - находим таким образом выражение для силы, с которой магнитное поле бесконечно малого отрезка тока в центральной части перемычки действует на бесконечно малый участок тока в центральной части правой рельсы и левой рельсы







Скалярное магнитное поле Николаева, создаваемое этим бесконечно малым отрезком тока центральной части перемычки





Бесконечно малый отрезок тока в центральной части перемычки создаёт скалярное магнитное поле Николаева в центральной точке правой и левой рельсы







Применяя формулу силы Николаева - находим таким образом выражение для силы, с которой скалярное магнитное поле Николаева бесконечно малого отрезка тока в центральной части перемычки действует на бесконечно малый участок тока в центральной части правой рельсы и левой рельсы







Векторный потенциал, создаваемый бесконечно малыми участками тока центральной части правой и левой рельсы





Магнитные поля создаваемые этими участками тока в центральной точке перемычки







Скалярные магнитные поля Николаева создаваемые этими участками тока в центральной точке перемычки







Применяя формулу силы Лоренца - находим таким образом выражение для силы, с которой магнитные полясоздаваемый бесконечно малыми участками тока центральной части правой и левой рельсы действует на бесконечно малый участок тока в точке центральной части перемычки









Применяя формулу силы Николаева - находим таким образом выражение для силы, с которой скалярные магнитные поля Николаева, создаваемые бесконечно малыми участками тока центральной части правой и левой рельсы действует на бесконечно малый участок тока в точке центральной части перемычки







Сравним теперь сумму сил Лоренца и Николаева

Взаимодействие перемычки и правой рельсы:

















Взаимодействие перемычки и левой рельсы:

















Таким образом мы видим, что в дифференциальной форме для расчёта сил, действующих в конфигурации рельсотрона совместное применение формул Лоренца и Николаева приводит к выполнимости третьего закона Ньютона: суммарная сила Лоренца и сила Николаева, с которой магнитное поле рельсы действует на перемычку равна по модулю и противоположна по направлению суммарной силе Лоренца и Николаева, с которой магнитное поле перемычки действует на рельсу.

**Взаимодействие элементов тока**

Радиус вектор, направленный от элемента тока , расположенном в точке к точке



Векторный потенциал в точке , создаваемый участком тока , расположенном в точке



Магнитное поле в точке , создаваемый участком тока , расположенном в точке





Скалярное магнитное поле в точке, создаваемый участком тока , расположенном в точке





Сила Лоренца, действующая на элемент тока  , расположенный в точке со стороны магнитного поля





Сила Николаева, действующая на элемент тока  , расположенный в точке со стороны скалярного магнитного поля Николаева





Суммарная сила, действующая со стороны элемента тока на элемент тока 





Приводим выражение суммарной силы к удобочитаемому векторному варианту

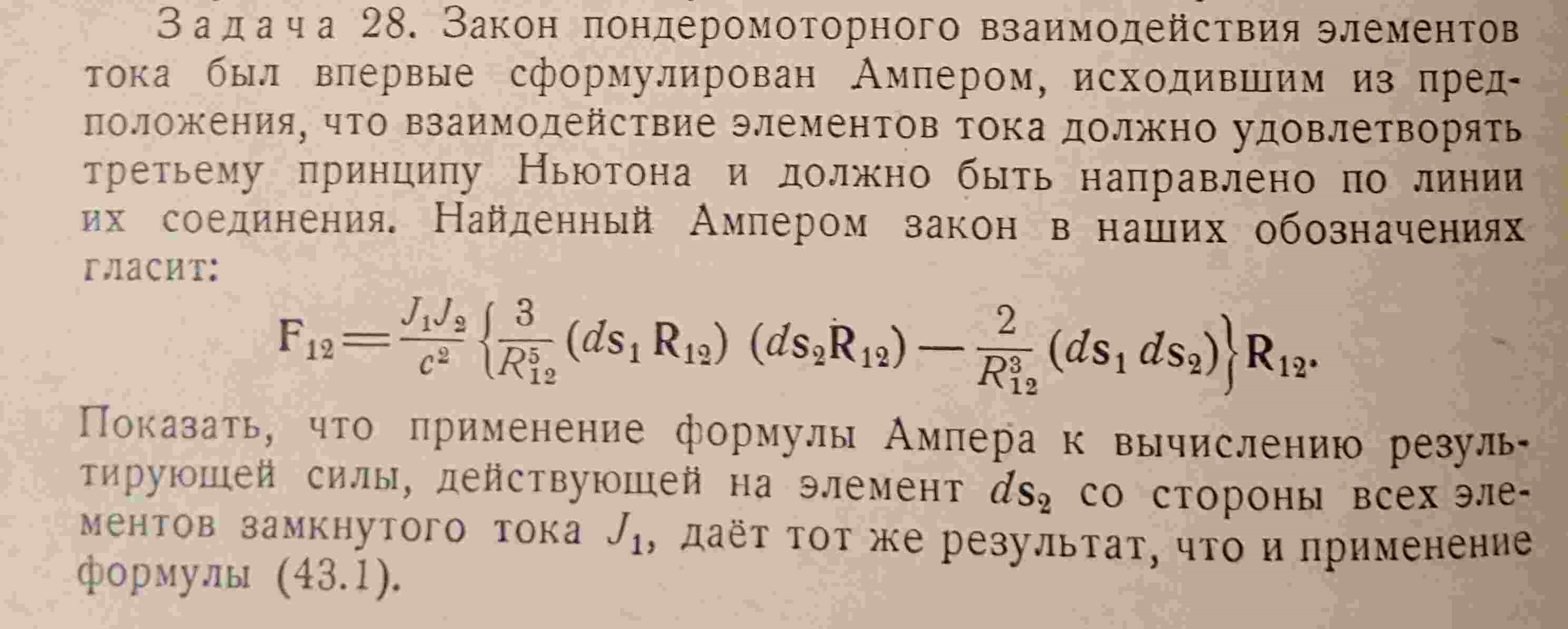




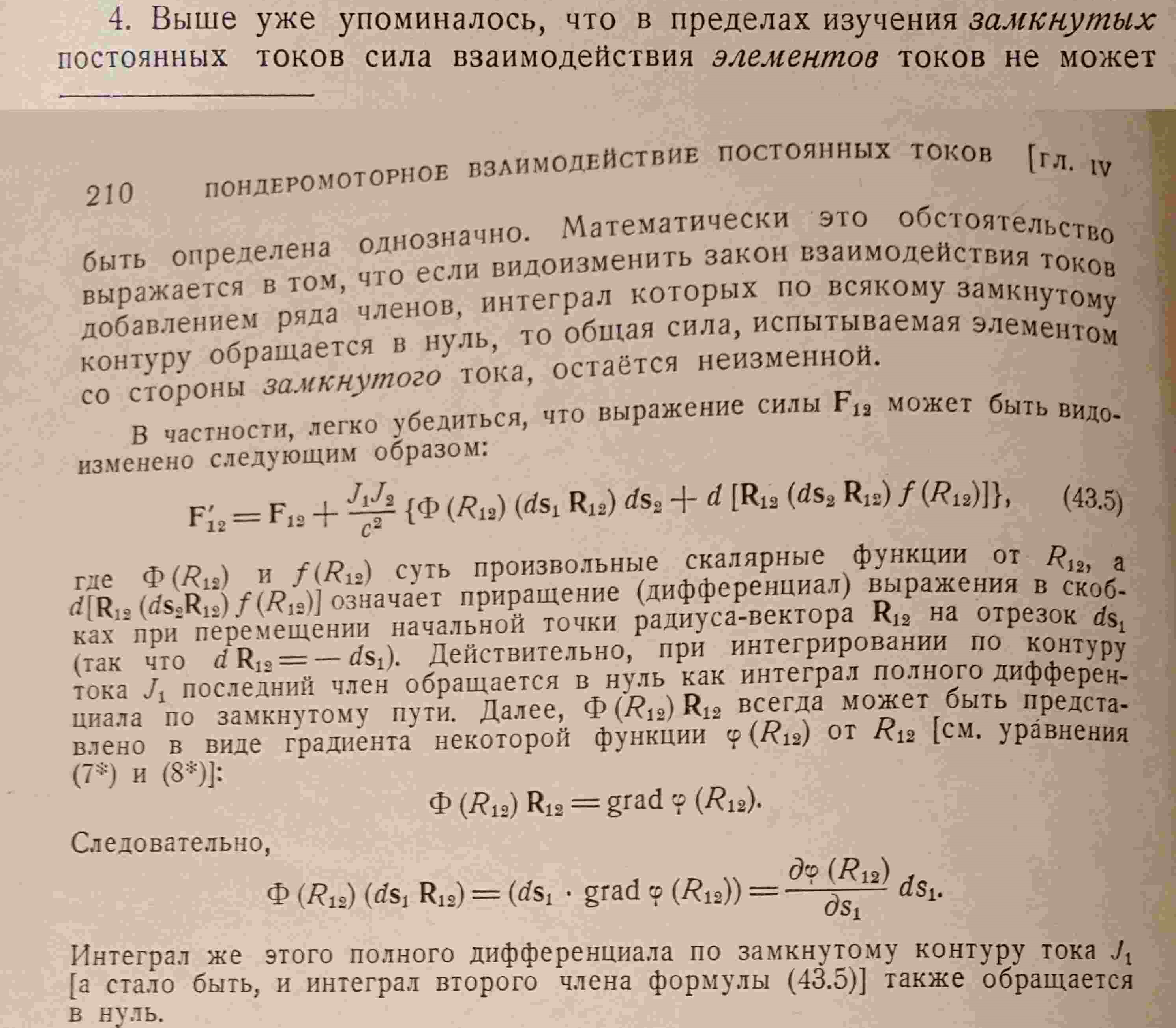
Мы видим, что полученное выражение для выражение силы взаимодействия двух токовых элементов отличается от приведенной в книге Тамма [8], формулы (43.1)  введением дополнительного слагаемого 

Кроме того полученное выражение отличается от формулы Ампера, исходившему из представления, что взаимодействие токовых элементов должно удовлетворять третьему принципу Ньютона.





Основываясь вышеприведенном рассуждении Тамма о неоднозначности определения силы взаимодействия токовых элементов,



легко показать соответствие полученной в данной работе формулы формуле (43.1) у Тамма. Действительно дивергенция векторного потенциала, согласно формуле 46.7 [Тамм, 8] *вне поверхности всех обтекаемых током проводников*равна нулю. Следовательно, интеграл по замкнутому токовому контуру для силы Николаева вне данного токового контура равен нулю.

В качестве теста полученной формулы рассчитаем силу, приходящуюся на единицу длины для случая бесконечных параллельных проводников. Для этого подставляя в формулу



выражения для радиус вектора и векторов тока, установив в ноль координату z для обоих проводов, получаем

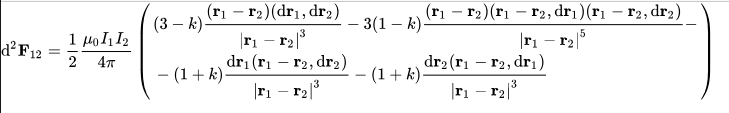




правильное значения силы взаимодействия параллельных проводников. Кстати, такое же правильное значение силы взаимодействия двух параллельных проводников приводит оригинальная формула силы Ампера





Поиск литературных источников по теме взаимодействия элементов тока привёл к упоминанию в википедии <https://ru.wikipedia.org/wiki/Закон_Ампера#cite_note-4> формулы, предложенной Максвеллом для взаимодействия элементов тока,

в которой присутствует коэффициент k, который «не может быть определен без некоторых предположений, следуемых из экспериментов, в которых активный ток образует замкнутый контур»

Если принять k = -1, получится выражение для оригинального закона Ампера. Если же k=+1, то получается формула, выведенная в данной работе на основании представлений о силе Николаева.

Резюмируя данную работу, хотелось бы отметить, что взятая за основу формула векторного потенциала подвергается ревизии, например, в работе [9]. Следовательно, полученная в данной работе формула взаимодействия двух токовых элементов может быть пересмотрена вместе с пересмотром формулы для векторного потенциала.

Литература.

1. А.Ю.Дроздов. Электродинамический расчёт рельсотрона с использованием понятий векторного потенциала, магнитного поля и силы Лоренца. 02.04.2018. <http://liquidcrystalosmos.narod.ru/railgunelectrodynamic.htm>

2. Научно-технический форум SciTecLibrary - Точные науки и дисциплины - Физика, астрономия, математические решения - Отдача в рельсотроне с позиций электродинамики <http://www.sciteclibrary.ru/cgi-bin/yabb2/YaBB.pl?num=1522662090>

3.Форум движения за возрождение отечественной науки - Главная категория - Физика, техника, технологии - Отдача в рельсотроне <http://www.forum.za-nauku.ru/index.php/topic,4756.0.html>

4.Отдача в рельсотроне приложена к рельсам 2. <https://youtu.be/bGBGk_iJtZQ>

5.Опыт Николаева номер 3 с продольным движением жидкого металла <https://youtu.be/2oVKJBspu0Ehttps://youtu.be/s3MfFzIBRHE>

6. Ф.Ф.Менде. Новая электродинамика, 2011

7.Геннадий Николаев. Непротиворечивая Электродинамика. Теория, эксперименты, парадоксы. Книга 1. 1997

8. И.Е.Тамм. Основы теории электричества. М.1957

9.А.С. Чуев. О ВЕКТОРНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ ОДИНОЧНО ДВИЖУЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА <http://www.sciteclibrary.ru/texsts/rus/stat/st3067.pdf>

02.04.2018 -19.04.2018