

## **Теория движения электромагнитного поля. 5. Униполярный генератор с вращающимся магнитом**

Л.Н. Войцехович

В работе рассмотрен униполярный генератор с вращающимся постоянным магнитом. На основе теории движения электромагнитного поля и, в частности, принципа суперпозиции схематически изложен путь расчета ЭДС в замкнутом измерительном контуре. Показано, что магнитное поле постоянного магнита не вращается совместно с магнитом, а движется поступательно вокруг оси вращения магнитного поля совместно с элементарными магнитами (электронами), входящими в состав магнита. Показано также, что благодаря этому движению ЭДС на отдельных участках контура отличается от ЭДС на аналогичных участках униполярного генератора с вращающимся в магнитном поле металлическим ротором, но, несмотря на это, суммарные ЭДС обоих генераторов равны.

### **5.1. Введение**

В работе [1] отмечалось, что вращение соленоида с током вокруг своей продольной оси не должно приводить ни к каким последствиям, так как магнитные силовые линии при таком вращении остаются неподвижными. В то же время, при вращении вокруг своей продольной оси цилиндрического постоянного магнита вблизи магнита возникает электрическое поле, которое можно непосредственно измерить датчиком электрического поля. Это же поле является причиной возникновения ЭДС в разновидности униполярного генератора с вращающимся постоянным магнитом [2]. Однако нельзя считать, что в таком униполярном генераторе вращается магнитное поле. Вспомним, что магнитное поле постоянного магнита создается магнитными моментами электронов. При вращении магнита электроны, представляющие собой своеобразные гироскопы, могут лишь поступательно двигаться вокруг оси вращения магнита. В природе не существует сил, которые могут заставить электроны и их магнитное поле вращаться быстрее или медленнее. Это достаточно очевидное утверждение. Тем не менее, причины такого положения вещей будут подробнее рассмотрены ниже.

Вращение магнитного поля стержневого постоянного магнита или магнитного диполя вокруг оси, совпадающей с направлением

магнитного момента, чрезвычайно плохо изучены в теоретическом отношении. Имеются лишь относительно немногочисленные публикации на эту тему, в частности, ранее уже упоминавшиеся нами работы [2] и [3]. Выводы этих работ о вращении магнитного поля, по нашему мнению, противоречивы и не вполне корректны в физическом отношении.

Целью настоящей работы является рассмотрение, на примере магнитного поля, процессов движения электромагнитного поля при вращении постоянного магнита, а также физических последствий такого вращения. В основу этого рассмотрения будет положен принцип движения электромагнитного поля, рассмотренный в предыдущих главах.

### 5.2. Униполярный генератор с вращающимся магнитом

Униполярный генератор с постоянным вращающимся магнитом показан на рисунке 5.1а. Цилиндрический постоянный магнит, изготовленный из проводящего материала (магнитотвердой стали), вращается вокруг своей оси, как показано на рисунке. К скользящим контактам  $K_1$  и  $K_2$ , касающимся соответственно боковой поверхности и оси цилиндра, подключен вольтметр  $V$ , образуя замкнутый электрический контур  $L$ .

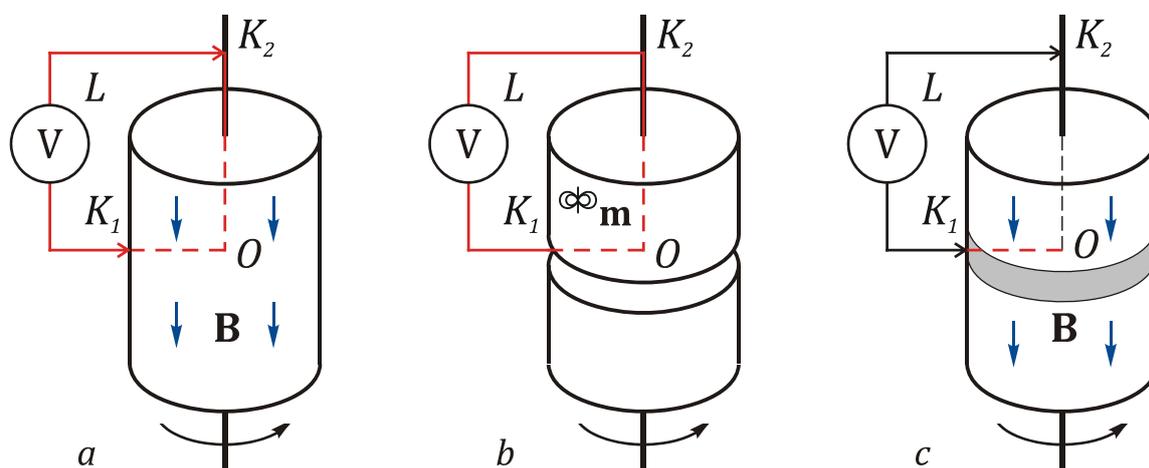


Рис. 5.1. Униполярный генератор с постоянным вращающимся магнитом

Контур  $L$  (контур  $OK_1VK_2O$ ) выделен на рисунке 5.1а красным цветом и включает в себя участки внутри проводящего магнита, обозначенные штриховой линией. Точное положение этих участков

внутри магнита, как будет показано в дальнейшем, не имеет значения, важно лишь положение контактов  $K_1$  и  $K_2$ . Внутри магнита существует магнитное поле  $\mathbf{B}$ , обозначенное голубыми стрелками, которое вызвано остаточной намагниченностью постоянного магнита. В пространстве, окружающем магнит, последний образует поле рассеяния (на рисунке 5.1а не обозначено, но подразумевается его наличие).

Вопрос заключается в том, движется ли это поле при вращении магнита, возбуждая при этом ЭДС на участке  $K_1VK_2$  контура  $L$ , или нет. Вопрос этот стоит со времен Фарадея и решается разными авторами по-разному. Так, Тамм [2] считает абсурдной саму идею о вращении поля рассеяния (см. [1], стр. 13, 14). Тамм приводит, испытывая при этом определенные затруднения, три варианта расчета ЭДС в контуре: на основе уравнения электромагнитной индукции Максвелла в форме (4.2) [4], на основе силы Лоренца и на основе преобразований Лоренца для электромагнитного поля. Во всех случаях магнитное поле считается неподвижным, и задача тем самым сводится к случаю вращения металлического диска в магнитном поле, рассмотренному в [1], где приведен первый вариант расчета. В работе [3] авторы, в противовес Тамму, считают, что при вращении соленоида вокруг своей оси вращается и магнитное поле соленоида. Истина, как это часто бывает, лежит посередине: магнитное поле магнита или соленоида не вращается, но вблизи магнита (но не соленоида) магнитное поле движется. Покажем это.

### 5.3. К расчету ЭДС в измерительном контуре

При вращении магнита вокруг оси вращения (рис. 5.1а) происходит два взаимосвязанных явления электромагнитной индукции: пересечение элементов контура  $L$  магнитным полем постоянного магнита и пересечение движущимся элементом  $OK_1$  поля магнита. Для того, чтобы правильно учесть вклад обоих явлений в суммарную ЭДС в контуре  $L$ , модифицируем схему униполярного генератора на рис. 5.1а так, как это показано на рисунках 5.1b и 5.1c, для отдельного исследования этих явлений.

На рис. 5.1b вращающийся магнит выполнен из двух частей, разделенных бесконечно узким зазором, не влияющим на конфигурацию поля постоянного магнита. Участок контура  $L$ , примыкающий к магниту в точке  $K_1$ , продлен до оси в точке  $O$ . В

данном случае наличие скользящих контактов не является принципиальным, поэтому на рисунке они не обозначены.

Выберем произвольно расположенный внутри магнита элементарный магнит  $\mathbf{m}$ , как показано на рис. 5.1b. В качестве элементарных магнитов могут быть выбраны физически бесконечно малые объемы, с формой, зависящей от используемой системы координат. Магнитные свойства этих элементарных магнитов определяются магнитными моментами электронов, ответственных за ферромагнетизм, и никак не связаны с вращением магнита. Поле элементарного магнита – это поле точечного магнитного диполя, движущееся поступательно вместе с диполем вокруг оси вращения магнита.

Для расчета напряженности электрического поля в произвольной точке контура  $L$  необходимо рассчитать величину магнитной индукции  $\mathbf{B}$  и скорости поля  $\mathbf{V}_m$ , равной скорости диполя  $\mathbf{m}$ , а затем по формуле (2.5) [1] рассчитать вклад диполя  $\mathbf{m}$  в суммарное электрическое поле в выбранной произвольной точке контура  $L$ . Взяв интеграл, в соответствии с принципом суперпозиции для движущихся полей [5], по всему объему магнита, мы получим величину напряженности электрического поля в указанной точке контура  $L$ . Это не составит большого труда, если известна формула распределения намагниченности по объему магнита. Например, намагниченность магнитов из сплавов редкоземельных элементов, для которых характерна очень большая величина коэрцитивной силы и почти прямоугольная форма петли магнитного гистерезиса, можно считать практически однородной по всему объему магнита. Рассчитанное электрическое поле в общем случае отлично от нуля и может быть измерено, предварительно убрав сам контур, с помощью датчика электрического поля (но не вольтметра со щупами).

Такой способ расчета является единственно возможным, если нас интересует именно величина напряженности электрического поля в точках контура. Проинтегрировав величину этого поля вдоль контура  $L$ , можно получить и значение ЭДС в контуре. Полученный результат решения, однако, не будет обладать общностью, так как он может меняться в зависимости от конфигурации контура и магнита и распределения намагниченности по объему магнита, во всяком случае, это справедливо для величины электрического поля в каждой точке контура.

В случае если магнит обладает строгой аксиальной симметрией относительно оси вращения, то можно получить решение в общем виде, но не следует забывать, что полученное общее решение справедливо только для частного случая аксиальной симметрии магнита. Обратим внимание на то, что контур  $L$  на рис. 5.1b остается неизменным во времени и не содержит движущихся частей. В этом случае, как отмечалось в [4], применима теорема Стокса, что позволяет при вычислении ЭДС в контуре перейти от вычисления электрического поля в каждой точке контура и его интегрирования вдоль контура к вычислению скорости изменения магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром  $L$ . Такая работа была проведена, как известно, еще в XIX веке Максвеллом и его последователями, в результате чего был сформулирован закон электромагнитной индукции в форме (4.2) [4]. Воспользуемся им.

Как видно из рис. 5.1b, при симметричной форме магнита магнитный поток через контур  $L$  равен нулю. Если деформировать контур таким образом, чтобы он не лежал в одной плоскости с магнитными силовыми линиями, то поток станет отличным от нуля, но будет постоянным во времени. В любом случае вольтметр не зафиксирует появления ЭДС в контуре, а ток в контуре будет отсутствовать. Электрическое поле, которое можно зафиксировать датчиком, если удалить металлические элементы контура, станет равным нулю при наличии металлического контура за счет перераспределения электрических зарядов в металлических элементах контура. Этот результат не зависит от конкретной формы контура как внутри магнита, так и вне его. Если же нарушить симметрию постоянного магнита, закрепив, например, на его верхнем торце асимметричную накладку из магнитомягкого материала, то равновесие полей в разных точках контура нарушится, и вольтметр зафиксирует появление в контуре переменной ЭДС.

Таким образом, в идеализированном униполярном генераторе, а именно он нас и интересует, вклад движущегося за счет вращения магнита магнитного поля в суммарную ЭДС в контуре  $L$  равен нулю.

Перейдем теперь к рассмотрению второй составляющей электромагнитной индукции в униполярном генераторе с вращающимся магнитом, возникающей при пересечении движущимся элементом  $OK_1$  поля магнита. Для этого поместим в зазор вращающегося магнита (рис. 5.1c), выполненного из двух частей, металлический немагнитный диск (на рисунке окрашен серым

цветом) и закрепим его на оси вращения, а половинки магнита, напротив, отсоединим от оси вращения. Поскольку движение магнитного поля мы уже полностью учли при расчете составляющей электромагнитной индукции, вызванной движением поля (рис. 5.1*b*), то для исключения влияния этого движения следует остановить вращение магнита, но при этом сохранить вращение металлического диска. Этот вариант модификации униполярного генератора (рис. 5.1*c*) приводит нас к схеме униполярного генератора с неподвижным полем от внешнего источника и вращающимся немагнитным диском как это имеет место в схеме генератора на рис. 2.1 [1]. Расчет ЭДС на участке  $OK_1$  контура  $L$  может быть легко выполнен с помощью выражения (4.6) [4], ЭДС в других частях контура равна нулю.

Генератор на рис. 5.1*c* может быть легко трансформирован в генераторы, изображенные на рисунках 5.1*a* и 5.1*b*. В самом деле, остановив вращение металлического диска и возобновив вращение магнита, мы придем к генератору на рис. 5.1*b*, ведь конкретная конфигурация участка  $OK_1$ , как уже отмечалось, не имеет значения. При этом ЭДС в контуре будет равна нулю. Возобновим вращение металлического диска – и в контуре появится ЭДС. Для того, чтобы окончательно перейти к генератору на рис. 5.1*a*, удалим сам металлический диск, ведь его толщина бесконечно мала, а проводимостью, по исходным условиям, обладает сам магнит.

Таким образом, оба генератора, с вращающимся во внешнем магнитном поле и с вращающимся магнитом, приводят, при прочих равных условиях, к одинаковым ЭДС в контурах, хотя на отдельных участках контуров эти ЭДС различны. К тем же результатам приводят и результаты расчета в [2], и в других многочисленных работах, несмотря на неадекватность высказанных в них исходных положений.

### **Выводы**

1. Показано, что при вращении стержневого постоянного магнита вокруг продольной оси его магнитное поле не вращается совместно с магнитом. В то же время вблизи магнита и внутри него происходит поступательное движение линий. Это движение магнитного поля вызвано поступательным движением вокруг оси вращения составляющих магнитного поля, связанных с

элементарными магнитами – электронами, входящими в состав магнита и определяющими его постоянную намагниченность.

2. Схематически показан путь расчета ЭДС в замкнутом измерительном контуре, основанный на основе теории движения электромагнитного поля и использовании принципа суперпозиции.

3. Показано, что благодаря движению магнитного поля вблизи магнита и внутри него ЭДС на отдельных участках контура отличается от ЭДС на аналогичных участках униполярного генератора с вращающимся в магнитном поле металлическим ротором. Несмотря на это, суммарные ЭДС обоих генераторов равны. Это объясняется тем, что поступательное движение линий магнитного поля вызывает во внешних и внутренних частях контура значения ЭДС, равные по величине и противоположные по знаку.

### Список литературы

1. Л.Н. Войцехович, Теория движения электромагнитного поля. 2. Принцип движения компонент электромагнитного поля, 1, (2013), с. 12.  
[www.science.by/electromagnetism/rem2rus.pdf](http://www.science.by/electromagnetism/rem2rus.pdf).
2. И.Е. Тамм, Основы теории электричества, Москва, Наука, (1966), с. 549 – 553.
3. Э.А. Меерович, Б.Э. Мейерович, Методы релятивистской электродинамики в электротехнике и электрофизике, Москва, Энергоатомиздат, (1987), с. 84 – 86.
4. Л.Н. Войцехович, Теория движения электромагнитного поля. 4. Движение электромагнитного поля и электродинамика, 1, (2013), с. 40.  
[www.science.by/electromagnetism/rem4rus.pdf](http://www.science.by/electromagnetism/rem4rus.pdf).
5. Л.Н. Войцехович, Теория движения электромагнитного поля. 3. Релятивистский принцип суперпозиции полей, 1, (2013), с. 28.  
[www.science.by/electromagnetism/rem3rus.pdf](http://www.science.by/electromagnetism/rem3rus.pdf).

*Статья опубликована на сайте журнала РЭМ  
19 мая 2013 г.*