

Электромагнитная индукция в проводниках обмотки, расположенной в пазах якоря электрической машины постоянного тока¹

МАЛЫГИН В.М.

Предлагается объяснение возникновения ЭДС в проводниках обмотки якоря машины постоянного тока. Для этого предложено разделить результирующее поле в пазу на составляющие, связанные с первичными и вторичными источниками поля, движущимися относительно друг друга. Действие закона электромагнитной индукции при возникновении ЭДС объясняется тем, что расположенные в пазах проводники движутся в замкнутом потоке, проходящем сквозь обмотку возбуждения, и неподвижны во вторичном магнитном поле зубцов. Этим подтверждается правильность той точки зрения, что ослабление в статике постоянного магнитного поля в области экранирования с помощью магнетика определенной формы происходит за счет взаимной компенсации действия вторичного магнитного поля этих тел (магнетика) и внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: электрическая машина постоянного тока, обмотка якоря, ЭДС, магнитное поле, электромагнитная индукция

Принцип действия, устройство и расчет параметров электрических машин постоянного тока (ЭМПТ) достаточно подробно изложены в технической литературе. В соответствии с законом электромагнитной индукции в интегральной форме электродвижущая сила (ЭДС) в замкнутом контуре возникает при изменении во времени магнитного потока Φ (потокосцепления), проходящего сквозь контур:

$$e = - d\Phi / dt. \quad (1)$$

Этот закон в ЭМПТ часто используют во второй формулировке, в интегрально дифференциальной форме (в точках пространства), что позволяет определить, в какой части контура возникает ЭДС, значение которой прямо пропорционально значениям магнитной индукции и скорости движения проводника в магнитном поле (с пересечением силовых линий) относительно источника магнитного поля:

$$e = VBL, \quad (2)$$

где V и L – скорость и длина движущегося в магнитном поле проводника; B – значение магнитной индукции (проекция вектора на ось в декартовой системе координат, перпендикулярную линейному проводнику и мгновенному направлению скорости его движения) в зоне расположения проводника. Выражение (2) в литературе иногда называют формулой Фарадея.

Например, в ЭМПТ с кольцевым якорем [1, с. 234] ЭДС в соответствии с [2] возникает в активной части проводников, движущихся (вращающихся) в магнитном поле с индукцией B между стато-

ром и гладким якорем, на котором эти проводники расположены. Проводники внутри кольцевого якоря движутся вне магнитного поля, и ЭДС в них не возникает. Подобную картину действия закона электромагнитной индукции в виде (2) мы наблюдаем и в ЭМПТ с печатным якорем, в которых магнитопровод якоря неподвижен относительно статора, а в магнитном поле с индукцией B вращается обмотка, закрепленная на полом изоляционном цилиндре – роторе [2, т. 2, с. 351].

Если же активные проводники якорной обмотки расположены в пазах магнитопровода якоря (а это практически у всех машин средней и большой мощности), то при неизменном значении магнитного потока, приходящегося на один полюс системы возбуждения (как и при гладком якорю), получим в них при движении относительно статора то же значение ЭДС согласно (1). Однако известные результаты измерений и расчетов показывают, что значения магнитной индукции в пазах, где расположены проводники, близки к нулю. Это вызывает вопросы при использовании выражения (2), так как, на первый взгляд, противоречит изложенным выше условиям возникновения ЭДС в движущемся проводнике и требует объяснения.

Попытки разрешения возникающего противоречия. В [2, т. 2, с. 281] указано, что ЭДС проводника, размещенного в пазу, можно рассчитать по формуле Фарадея (1), «если ввести в нее усредненную радиальную составляющую индукции в зазоре на оси паза, в котором расположен проводник», т.е. заменить в (2) B на B_{dc} (усредненное значение). Результат получим правильный, но, как сказано там же [2], это формальный подход. В [3, с. 144] рекомендуется в подобном случае при расчетах значений ЭДС также использовать среднее зна-

¹ В порядке обсуждения.

чение магнитной индукции в зазорах под полюсом. И это приводит на практике к правильному результату при определении значения ЭДС (доступной для измерения величины).

Действительно, воспользовавшись общим интегральным выражением (1) для определения ЭДС по скорости изменения магнитного потока (потокосцепления), проходящего сквозь контур, убеждаемся, что при вращении якоря магнитный поток сквозь контур периодически изменяется от нуля до максимальных значений, и с этой точки зрения ЭДС в контуре должна возникать. Но это приводит к усредненному значению (в зоне зубца и паза) магнитной индукции в (2) и не объясняет упомянутого противоречия при ее применении.

В [4, с. 171] предлагается для определения значения ЭДС, возникающей в проводнике, лежащем внутри паза вращающегося якоря (ротора) ЭМПТ, использовать векторный потенциал A магнитного поля. Это другой способ расчета, иногда более удобный, но не объясняющий использования выражения (2) при определении значения ЭДС в проводнике, расположенном в пазу якоря. А так как циркуляция векторного потенциала по замкнутому контуру однозначно связана с магнитным потоком, пронизывающим этот контур (согласно теореме Стокса), то в курсах электрических машин часто отдают предпочтение более наглядным понятиям магнитной индукции и магнитного потока, т.е. использованию выражений (1) или (2).

В ранних работах, например в [5, с. 205], в которой значительное внимание уделено магнитному экранированию, встречается объяснение, что силовые магнитные линии, проходящие сквозь зубец, при его движении упруго деформируются и «перескакивают» сквозь паз на другой зубец, пересекая при этом проводник в пазу. А уменьшение значений магнитной индукции в пазу компенсируется увеличением скорости пересечения проводника этими «перескакивающими» магнитными силовыми линиями или силовыми трубками.

Объяснение наглядное и на первый взгляд убедительное, но такая модель физикой отвергнута, так как с магнитным полем, с магнитными силовыми линиями нельзя связать систему координат [4, с. 171; 6, с. 546], а движение – это перемещение в пространстве одной системы координат (системы отсчета) относительно другой. И когда говорится о вращающемся (движущемся) магнитном поле, то имеется в виду вращение (движение) источника поля, в системе координат которого определяются в точках пространства значения магнитной индукции [7], а вовсе не самостоятельное, отдельное от источника движение магнитного поля (речь здесь не идет о распространении в пространстве электромагнитного излучения, которое стано-

вится независимым от движения источника). Кроме того, по поводу приведенного в [5] объяснения возникает новый вопрос: а при каких же значениях натяжения [6, с. 390] в магнитных силовых трубках начинается их «перескакивание)?

Цель данной работы заключается в том, чтобы, рассмотрев проблему под несколько иным углом зрения (что часто оказывается полезным), предложить не слишком сложную модель (по сравнению с моделью [5]), в которой не было бы упомянутого выше противоречия с курсами физики. Модель эта тоже должна представлять собой наглядное объяснение использования выражения (2) при определении значения ЭДС в проводниках обмотки, расположенных в пазах якоря.

Магнитное поле возбуждения ЭМПТ с гладким якорем. Прежде чем обратиться к зубчатому якорю, когда возникают упомянутые трудности с объяснением использования выражения (2), рассмотрим более простой вариант – равномерное магнитное поле в воздушном зазоре между статором и гладким якорем, создаваемое сосредоточенной обмоткой возбуждения. При этом здесь и далее при определении значения ЭДС подразумеваем, что ЭМПТ работает в режиме холостого хода, когда влиянием магнитного поля тока обмотки якоря можно пренебречь.

Магнитное поле в ЭМПТ достаточно хорошо исследовано. Способы опытного исследования картины магнитного поля описаны в [8, с. 117].

Аналитические решения при определении значений B в электрических машинах методами теории поля в большинстве случаев оказываются невозможными из-за сложных форм поверхностей, ограничивающих магнитопроводы и проводники с токами, и из-за нелинейных магнитных свойств ферромагнетиков. Приближенно на первом этапе расчет значений B в интересующем нас воздушном зазоре между полюсным наконечником статора (здесь и далее с гладкой поверхностью) и гладким магнитопроводом якоря ЭМПТ обычно выполняют с помощью метода расчета магнитных цепей при ряде допущений [9, с. 423].

Полученная на основании расчетов и измерений картина магнитного поля в воздушном зазоре между полюсным наконечником и гладким якорем ЭМПТ изображена согласно [3] на рис. 1.

Введение магнетика якоря между полюсами системы возбуждения ЭМПТ увеличивает магнитный поток (уменьшается сопротивление магнитной цепи). Магнетик под полюсом (рис. 1) при вращении входит в зону действия внешнего для него поля под полюсом магнита (полюсного наконечника), некоторый объем магнетика намагничивается и при дальнейшем перемещении в неизменном внешнем поле остается намагниченным. После выхода из магнитного потока между полюсными на-

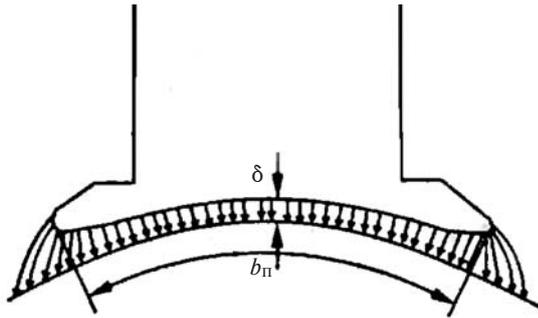


Рис. 1

конечниками этот объем магнетика размагничивается. Однако в целом намагниченная зона движущегося магнетика будет оставаться неподвижной относительно магнита, магнитный поток ЭМПТ оказывается статическим (неподвижным) по отношению к статору и динамическим (движущимся) по отношению к якорю [3, с. 20].

Примем это пока за экспериментально установленный факт и обратим внимание на то, что при движении относительно статора гладкого магнетика якоря значения магнитной индукции в воздушном зазоре, где размещены проводники обмотки якоря, не изменятся по сравнению со статическим положением. В этом случае вопросов к использованию выражения (2) не возникает, а к вопросу статичности магнитного потока при движении магнитопровода якоря вернемся после рассмотрения магнитного поля в воздушном зазоре машины с зубчатым якорем.

Магнитное поле в воздушном зазоре ЭМПТ при зубчатом якорю. Определение магнитной индукции \mathbf{B} в воздушном зазоре ЭМПТ с зубчатым якорем, особенно в пазах якоря, представляет собой гораздо более сложную задачу, чем при гладком якорю, но и она в теории электрических машин решена (в результате экспериментов и расчетов, в том числе с использованием численных методов).

Картина магнитного поля в воздушном зазоре между полюсным наконечником и зубчатым якорем ЭМПТ изображена согласно [3] на рис. 2.

На рис. 2 согласно [3] изображено магнитное поле с помощью силовых линий при зубчатом якорю (а) и показана кривая распределения радиальной проекции вектора \mathbf{B} вдоль зазора (б).

Измерения показывают, что значение магнитной индукции в глубине паза, где расположены проводники обмотки якоря, составляет 5% и менее среднего значения магнитной индукции под полюсом [4, с. 171]. Для того чтобы разобраться, какое же значение магнитной индукции в данном случае нужно использовать в (2), рассмотрим проблему под несколько иным углом зрения, чем в курсах электрических машин. Особое внимание обратим на источники поля, их различие (первичные или вторичные) и движение относительно друг друга.

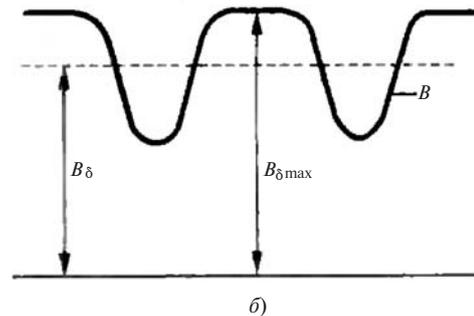
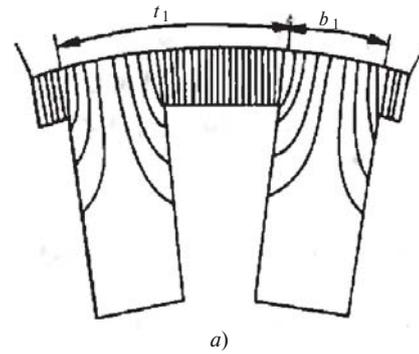


Рис. 2

Источники магнитного поля возбуждения в ЭМПТ. В электромеханике источниками постоянных (не меняющихся во времени в системе отсчета источника) магнитных полей можно считать контуры (жесткие, не деформируемые) с постоянным током. Это источники первичного магнитного поля. В ЭМПТ средней и большой мощности такими источниками являются обмотки возбуждения.

Обычно в первичном магнитном поле находятся тела (магнитопровод) из электротехнической стали (ферромагнетик), относящиеся в электротехнике к группе магнитомягких материалов [9, с. 428] (нелинейностью характеристик здесь пренебрегаем, чтобы можно было использовать принцип суперпозиции, и далее называем ее магнетиком), во внешнем поле они намагничиваются. Это вторичные источники магнитного поля, при их рассмотрении будем придерживаться принятого в электротехнике макроскопического и феноменологического (по внешним проявлениям) подхода, не вникая в сложные физические процессы внутри вещества.

Магнитное поле в веществе характеризуется несколькими физическими величинами (векторами магнитной индукции \mathbf{B} , напряженности магнитного поля \mathbf{H} и намагниченности магнетика \mathbf{J}), связанными между собой (в макроскопической точке пространства) соотношениями:

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{J}); \quad \mathbf{H} = \mathbf{B} / \mu_0,$$

где μ_0 – магнитная постоянная; μ – относительная магнитная проницаемость среды. Они дополняются интегральными уравнениями (теорема Гаусса о потоке вектора \mathbf{B} через замкнутую поверх-

ность S и теорема о циркуляции вектора \mathbf{H} по замкнутому контуру, равного суммарному току проводимости I , охватываемому контуром):

$$\oint \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0; \oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = I.$$

Намагниченный магнетик создает свое вторичное магнитное поле \mathbf{B}_M и вместе с первичным полем \mathbf{B}_0 , обусловленным токами проводимости, оба поля образуют результирующее поле [10, с. 177]:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_M. \quad (3)$$

Простейшим объяснением намагниченности магнетика является наличие определенным образом ориентированных в пространстве молекулярных токов, которые можно представить в виде макроскопических токов намагничивания. Зная распределение в пространстве токов намагничивания, можно было бы с помощью закона Био-Савара найти значение \mathbf{B}_M , а зная значение \mathbf{B}_0 , определяемое известным значением тока проводимости в катушке возбуждения, решить уравнение (3). Однако распределение токов намагничивания зависит не только от конфигурации и свойств магнетика, но и от самого искомого поля \mathbf{B} . Поэтому задача о нахождении результирующего поля \mathbf{B} (аналитический расчет его значений) в общем случае непосредственно решена быть не может [10, с. 180]. Однако разделение результирующего поля на составляющие в виде первичного и вторичных полей поможет нам разобраться с выражением (2), в чем убедимся далее.

В ЭМПТ мы имеем один источник первичного магнитного поля – обмотку возбуждения с известным значением тока в ней – и два источника вторичного поля в виде магнитопроводов статора и якоря, вместе образующих почти замкнутый магнитопровод (в виде деформированного тора) с небольшими воздушными зазорами, где рассеянием магнитного потока можно пренебречь. Эти три источника создают результирующее поле

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_{1M} + \mathbf{B}_{2M}, \quad (4)$$

где \mathbf{B}_{1M} , \mathbf{B}_{2M} – поля \mathbf{B}_M , созданные вторичными источниками в виде магнитопроводов статора и ротора. А систем отсчета две (с одной связана обмотка и магнитопровод статора, с другой магнитопровод якоря), и при работе ЭМПТ они движутся относительно друг друга.

Модель для представления картины магнитного поля в воздушном зазоре между статором и зубчатым якорем. Из курсов теоретической электротехники известно, что намагниченный магнетик в виде цилиндра (намагниченного вдоль оси) можно заменить эквивалентной катушкой (открытым соленоидом), магнитный момент которой равен магнитному моменту магнетика [8, с. 133]. При этом ток на

единицу длины катушки должен быть близок по значению к поверхностному току намагничивания однородного магнетика. Если же пренебречь несколько увеличивающейся неравномерностью поля \mathbf{B} вблизи углов, то и намагниченное тело в виде прямоугольного параллелепипеда можно заменить деформированным соленоидом прямоугольного сечения с магнитным полем \mathbf{B}_{3M} . Иными словами, можно заменить намагниченные зубцы магнитопровода якоря катушками с током, эквивалентным их току намагничивания (так как длина зубцов значительно превосходит их ширину, то рассматриваем двумерную картину поля), как показано на рис. 3, где 1 – магнитопровод статора; 2 – основная часть магнитопровода якоря; 3 – зубцы якоря. Результирующий вектор \mathbf{B} в пазу магнитопровода

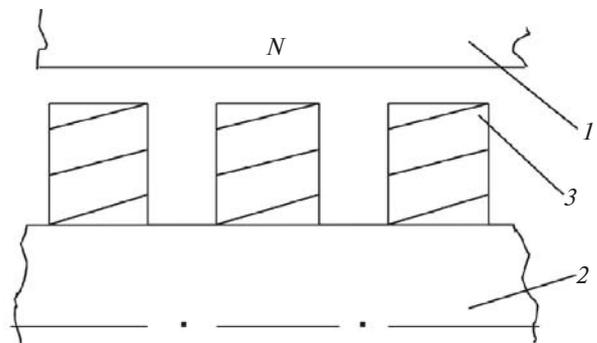


Рис. 3

при наличии зубчатого якоря:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}_{1M} + \mathbf{B}_{2M} + \mathbf{B}_{3M}. \quad (5)$$

Простота выражения (5) обманчива, решить его весьма сложно. Если в (4) хотя бы известно, что направления входящих в него векторов в пределах основного магнитного потока совпадают, то в (5) в большей части интересующей нас области вблизи зубцов об этом не скажешь. Большие затруднения при расчетах значений \mathbf{B} поле \mathbf{B}_{3M} создает даже при линейных характеристиках магнетика. Поэтому далее воспользуемся некоторыми результатами, полученными с помощью теории поля и дающими наглядную картину магнитного поля некоторых намагниченных тел. Согласно [11, т. 3, с. 163] на рис. 4 показаны результирующее магнитное поле \mathbf{B} при размещении в равномерном магнитном поле магнетика в форме эллипсоида вращения (а), собственное магнитное поле равномерно намагниченного магнетика в форме эллипсоида вращения (б) и в форме цилиндра, замененного соленоидом (в).

Обратим внимание на то, что рядом с эллипсоидом и цилиндром (справа и слева от них) результирующее поле \mathbf{B} вне магнетика ослаблено. Подобная картина наблюдается и в пространстве рядом с зубцами якоря, особенно в глубине пазов, т.е. здесь мы имеем дело с магнитным экранирова-

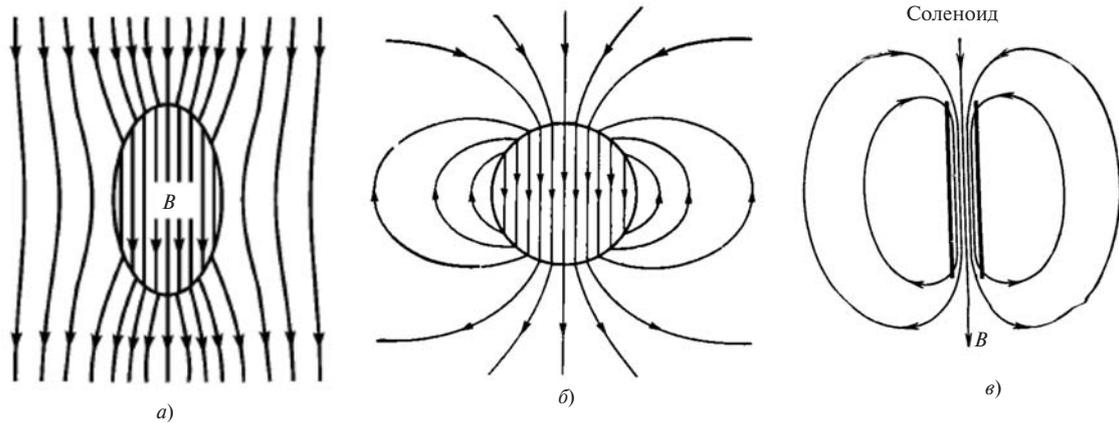


Рис. 4

нием [8, с. 119] проводников, расположенных в пазах. В ряде точек пространства вектор $B_{3,м}$ вторичного поля зубцов будет направлен противоположно векторам B_0 , $B_{1м}$ и $B_{2м}$, как показано на рис. 5.

Заметим, что в отличие от примера с гладким

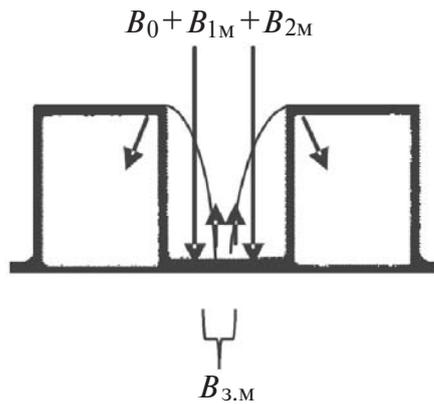


Рис. 5

якорем, здесь макроскопическое собственное поле зубцов в пределах длины полюсного наконечника будет перемещаться в пространстве вместе с ними. Это подтверждается тем, что в отличие от случая с гладким якорем измерения в тех же точках пространства вблизи вершин зубцов дают разные периодически повторяющиеся при вращении якоря значения B в системе отсчета статора (рис. 2,б) и одинаковые в тех же точках значения B в системе отсчета якоря при его вращении (не учитывая моменты смены полюсов).

Возможно, проведенное выше разделение поля на составляющие не облегчит расчеты значений B в пазу, однако оно оказывается полезным, если рассматривать движение частей магнитопровода относительно друг друга с точки зрения причин возникновения ЭДС в якорной обмотке.

ЭДС движения в проводнике, размещенном в пазу магнитопровода якоря. Известно, что если проводник неподвижен в магнитном поле (неподвижен

относительно источника поля), то ЭДС в нем не возникает. Как показано выше, поле $B_{3,м}$ намагниченных зубцов в ЭМПТ с зубчатым якорем перемещается в пространстве вместе с проводниками обмотки якоря. Проводник неподвижен в этом магнитном поле, и ЭДС движения в нем не возникает. Однако он движется в полях B_0 , $B_{1м}$ и $B_{2м}$, поэтому в (2) вместо B_{dc} можно подставить их сумму (по модулю направления векторов в пространстве на дне глубокого паза совпадают), численно равную B_{dc} , тогда

$$e = V(B_0 + B_{1м} + B_{2м})L. \tag{6}$$

Показано, что в ЭМПТ можно использовать формулу Фарадея (2), представив ее в виде (6). При этом не нужно учитывать всё результирующее значение магнитной индукции в пазу, представленное в виде суммы векторов (5), так как в результирующее магнитное поле (в системе отсчета якоря) входят и составляющие, создаваемые вторичными полями намагниченных зубцов (в поле которых проводник неподвижен). Значения поля зубцов $B_{3,м}$ в глубине паза близки по абсолютному значению сумме остальных составляющих магнитного поля в (5). В результате с учетом показанного на рис. 5 направления векторов их сумма в глубине паза мала, хотя и не равна нулю, вторичное поле магнетика не может полностью компенсировать причину своего появления – внешнее для него поле. В зубцах же, напротив, результирующее значение B больше среднего значения магнитной индукции в магнитном потоке.

О неподвижности магнитного потока в воздушном зазоре ЭМПТ при движении гладкого якоря. Рассмотрим вращение в магнитном поле, созданном первичным источником, цилиндра из магнетика, как показано на рис. 6, с нанесенными на него метками 1 и 2 в моменты времени t_1 и t_2 .

При повороте цилиндра, например на 90° , атомная решетка магнетика (твёрдого тела) также повернется, а направление магнитных силовых линий

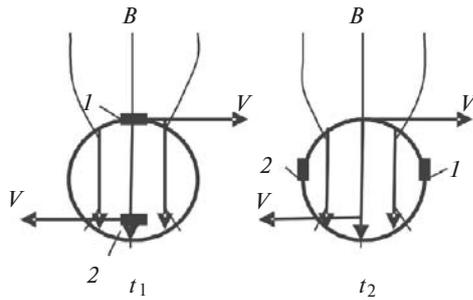


Рис. 6

не изменится. Это означает, что кольцевые молекулярные токи движутся вместе с атомной и кристаллической решеткой, но одновременно относительно нее поворачиваются плоскости орбит молекулярных токов. Замена одного такого микрополя другим в магнитных трубках, когда ситуация постоянно повторяется, не сказывается на макроскопическом результирующем поле в магнетике цилиндра — цилиндр вращается, а пронизывающий его магнитный поток результирующего поля неподвижен в системе координат первичного источника магнитного поля (вторичное поле цилиндра не вращается).

Наличие пазов искажает картину в области магнетика, приближенной к границе зубца с пазом, и поле $\mathbf{V}_{3,м}$ движется вместе с цилиндром (якорем ЭМПТ), однако детальное исследование этого явления выходит за рамки данной статьи.

Для получения более общей картины экранирования проводников в пазу рассмотрим вариант с преимущественно гладким якорем и удаленными друг от друга узкими и достаточно глубокими пазами, чтобы в месте замещения в них проводников обмотки значения результирующего поля \mathbf{V} были близки к нулю, как показано на рис. 7.

Измеряя значения магнитной индукции, заметим, что увеличение ширины зубцов не сказывается на увеличении эффекта экранирования, зависимость нелинейная. Экранирование заметно уменьшится только при существенном уменьшении ширины зубцов.

Теперь увеличим ширину пазов, как показано пунктиром на рис. 7, и заметим, что зона экранирования расположена в основном вблизи стенок пазов. Основную роль в экранировании играют области 1 и 3 магнетика зубцов (конечно, без резкой границы с областью 2 широкого зубца), распо-

ложенные вблизи границы с пазами. Эти области создают поле $\mathbf{V}_{3,м}$ в (5), в него входят магнитные трубки, замыкающиеся в воздушном зазоре, минуя область магнетика статора, поле же областей 2 участвует в создании полей $\mathbf{V}_{1,м} + \mathbf{V}_{2,м}$.

Обсуждение результатов. В статье по изложенным выше соображениям предлагается по-иному взглянуть на проблему экранирования отдельных областей пространства от воздействия постоянного магнитного поля. Традиционная точка зрения такова, что магнитные силовые линии при внесении в поле тел определенной формы (магнетика) отклоняются от первоначального положения и концентрируются в стенках экрана [5, с. 206; 8, с. 120], т.е. в нашем случае в зубцах якоря ЭМПТ. Автор придерживается другого мнения: в экранируемой области пространства векторы $\mathbf{V}_м$ вторичного магнитного поля внесенных магнетиков направлены встречно векторам \mathbf{V}_0 внешнего для них магнитного поля первичных источников и компенсируют их действие. Оба подхода в итоге приводят к одинаковому результату при определении результирующего поля \mathbf{V} , но предлагаемый подход позволяет дать простое и достаточно понятное объяснение появлению ЭДС движения в проводниках, расположенных в пазах магнитопровода якоря; представленная модель устраняет упомянутое выше противоречие в [5].

В теории электромагнитного поля метод вторичных источников применяется, но не получил широкого распространения из-за сложности математического аппарата [12]. Метод предусматривает замену намагниченного объема вещества объемными и поверхностными магнитными зарядами или токами намагничивания (хотя при этом и в относительно простых задачах — при отсутствии объемных зарядов или токов — решения при разной форме магнетиков сложны). При этом, сосредоточившись на преодолении математических трудностей, подчас оставляют в тени физическое содержание.

Использование понятия магнитных зарядов позволяет с успехом решать многие задачи, но это математическая модель, физически ее реализовать нельзя. А вот замена намагниченного зубца катушкой, намотанной на немагнитный каркас в форме зубца, при холостом ходе ЭМПТ физически возможна. И хотя значение эквивалентного тока в катушке придется определять трудоемкими числен-

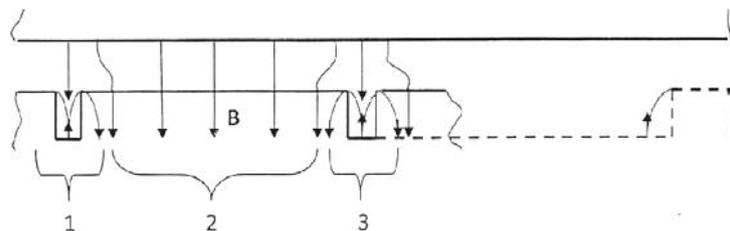


Рис. 7

ными методами (что не является целью данной статьи), это не влияет на приведенное выше объяснение возникновения ЭДС движения в проводнике, расположенном в пазу якоря ЭМПТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беспалов В.Я., Котеленец Н.Ф. Электрические машины. — М.: Издательский центр «Академия», 2006, 320 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2х томах. — М.: Изд-во МЭИ, 2006, 532 с.
3. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. — СПб: Питер, 2008, 320 с.
4. Поливанов К.М. Электродинамика движущихся тел.— М.: Энергоиздат, 1982, 192 с.
5. Миткевич В.Ф. Магнитный поток и его преобразования. — Л.: Изд-во Академии Наук СССР, 1946, 357 с.
6. Тамм И.Е. Основы теории электричества. — М.: Физматлит, 2003, 616 с.
7. Малыгин В.М. Униполярная индукция: обзор опытов с униполярными электрическими машинами и причины проти-

воречий в объяснении полученных результатов. — Электричество, 2013, № 6, с. 62–66.

8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле. — М.: Гардарики, 2003, 317 с.

9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. — М.: Высшая школа, 1995, 638 с.

10. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007, 319 с.

11. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники. В 3-х томах. — СПб: Питер, 2003, 1 т. — 445 с., 2 т. — 572 с., 3 т. — 364 с.

12. Ушаков А.Н., Ушакова Н.Ю. О развитии метода вторичных источников для расчета электромагнитного поля. — Электричество, 1998, № 9, с. 68–72.

[27.03.14]

Автор: Малыгин Вячеслав Михайлович окончил в 1966 г. Московский институт инженеров железнодорожного транспорта. В 1987 г. в Московском энергетическом институте защитил кандидатскую диссертацию «Диагностирование подшипниковых узлов высокоскоростных электрических машин». Начальник лаборатории НИИ электромеханики, г. Истра.

Elektrichestvo (Electricity), 2014, No. 11, pp. 63–69

Electromagnetic Induction in Conductors of the Winding Placed in the Armature Slots of a DC Electrical Machine

V. M. MALYGIN

An explanation why an EMF is excited in the conductors of the DC machine armature winding is proposed. To this end, it is proposed to decompose the resulting field in the slot into components connected with the primary and secondary field sources moving with respect to each other. The electromagnetic law's coming into picture when an EMF appears is attributed to the fact that the conductors placed in the slots move in a closed flux passing through the excitation winding and are immobile with respect to the secondary magnetic field of teeth. This confirms the correctness of the opinion according to which a stationary DC magnetic field is attenuated in the zone of screening by means of a suitably shaped magnetic material due to mutual compensation of the action caused by the secondary magnetic field of these bodies (magnetic) and the external magnetic field.

Key words: DC electrical machine, armature winding, EMF, magnetic field, electromagnetic induction

REFERENCES

1. Bepalov V.Ya., Kotelenets N.F. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow. Izdatel'skii tsentr «Akademija» (Publ. Center «Academy»), 2006, 320 p.
2. Ivanov-Smolenskii A.V. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). Moscow. Izd-vo Moskovskogo energeticheskogo instituta MEI (Publ. MEI), 2006, 532 p.
3. Vol'dek A.I., Popov V.V. *Elektricheskiye mashiny* (Electrical machines). St. Petersburg. Publ. «Piter», 2008, 320 p.
4. Polivanov K.M. *Elektrodinamika dvizhushchikhsya tel* (Electrodynamics of moving corpuses). Moscow. Publ. «Energoizdat», 1982, 192 p.
5. Mitkevich V.F. *Magnitnyi potok i ego preobrazovaniya* (Magnetic stream and his transformations). Leningrad. Izd-vo Akademii Nauk SSSR (Publ. of the SSSR Academy of Sciences), 1946, 357 p.
6. Tamm I.E. *Osnovy teorii elektrichestva* (Foundations of the theory of electricity). Moscow. Publ. «Fizmatlit», 2003, 616 p.

7. Malygin V.M. *Elektrichestvo (Electricity)*, 2013, No. 6, pp. 62–66.

8. Bessonov L.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektromagnitnoye pole* (Theoretical Principles of Electrical Engineering. Electromagnetic Field). Moscow. Publ. «Gardariki», 2003, 317 p.

9. Bessonov L.A. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. Elektricheskiye tsepi* (Theoretical Principles of Electrical Engineering. Electrical Circuits). Moscow. Publ. «Vysshaya Shkola», 1995, 638 p.

10. Irodov I.E. *Elektromagnetizm. Osnovnye zakony* (Electromagnetics. Principal Laws). Moscow. Publ. «BINOM», 2007, 319 p.

11. Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V., Chечурин V.L. *Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki. 3 t.* (Theoretical Principles of Electrical Engineering. 3 vols. St.Petersburg. Publ. «Piter», 2003, 1v. — 445 p., 2v. — 572 p., 3v. — 364 p.

12. Ushakov A.N., Ushakova N.Yu. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1998, No. 9, pp. 68–72.

Author: Malygin Vyacheslav Mikhailovich (Istra, Moscow oblast, Russia) — Cand. Techn. Sci., Head of the Laboratory of the Electromechanics and Research Institute (Istra, Moscow oblast).

