

В.Ф. НОВИКОВ, мл. научн. сотр.
 С.В. БУРЫЛОВ, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.
 В.Э. ВОСКОБОЙНИК, канд. техн. наук
 В.А. ДЗЕНЗЕРСКИЙ, д-р техн. наук, профессор
 ИТСТ НАНУ (Украина)

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЯ

Запропоновано розрахунково-дослідний метод визначення залежності потокозчеплення котушки з блоком постійних магнітів від їх взаємного розташування. Цей метод відрізняється тим, що для розрахунку потокозчеплення достатньо виміряти індукцію магнітного поля блока магнітів у площині котушки з наступним інтегруванням. За рахунок зміни границь інтегрування потокозчеплення визначається для будь-якої котушки.

Предложен расчетно-исследовательский метод определения зависимости потокозчепления катушки с блоком постоянных магнитов от их взаимного расположения. Этот метод отличается тем, что для расчета потокозчепления достаточно измерять индукцию магнитного поля блока магнитов в плоскости катушки с последующим интегрированием. За счет изменения границ интегрирования потокозчепление определяется для любой катушки.

A method for the indirect measuring of coil interlinkage with the pack of permanent magnets is offered. The method is depended on coil dimensions and based on magnetic field induction measurement of permanent magnets pack with the following integration of the induction with changeable limits.

В нынешнем столетии полноценный рост продуктивных сил и решение возникающих транспортных проблем будут невозможными без систем магистрального наземного транспорта со скоростями движения 500...700 км/ч, которые обеспечат уравнивание времени междугородных и внутригородских перевозок [1]. Перспективными являются транспортные системы, в которых отсутствует ограничение сил тяги и торможения по сцеплению колёс с путевой структурой. В этих транспортных системах используются линейные тяговые электродвигатели. Достаточно широко применяются линейные синхронные двигатели, которые в качестве источника поля возбуждения могут иметь сверхпроводящие или постоянные магниты.

Активными элементами конструкции линейного синхронного двигателя (ЛСД) являются трёхфазная путевая обмотка, которая питается переменным током, и обмотка возбуждения постоянного тока. Трёхфазная обмотка, каждая фаза которой состоит из ряда последовательно соединенных катушек, укладывается на путевом полотне по всей длине трассы. Обмотка возбуждения ЛСД, представляющая собой ряд сверхпроводящих магнитов, размещается на транспортном средстве. Благодаря этому отпадает необходимость передачи большой мощности на движущееся транспортное средство через скользящий токосъем, а также применения ферромагнитных сердечников в конструкции двигателя.

Для экспериментального исследования тяговых характеристик ЛСД, то есть зависимости сил от смещения, токов и других параметров, создан испытательный участок, включающий в себя линейный стенд и транспортное средство [2]. При выполнении исследовательских работ на макетном участке пути в качестве источников поля возбуждения ЛСД использовались блоки высококоэрцитивных постоянных магнитов, которые имеют размеры 0,205×0,250 [3].

Обычно для расчёта взаимодействий постоянных магнитов используется метод эквивалентных катушек, который весьма трудоёмок, поскольку подразумевает определение конфигурации магнитного поля нелинейных элементов, какими являются постоянные магниты. Кроме того, при расчетах необходимо учитывать, что блоки набраны из магнитов, которые фактически отличаются друг от друга как геометрическими размерами, так и физическими характеристиками.

В [2] предложен метод определения тягового усилия ЛСД, который не требует расчета магнитного поля системы возбуждения. При этом тяговое усилие f_x определяется выражением

$$f_x = -\sum_n n \frac{\pi}{\tau} \psi_n \left[i_a \sin n \frac{\pi}{\tau} x + i_b \sin n \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2\pi}{\tau} \right) + i_c \sin n \left(\frac{\pi}{\tau} x + \frac{2\pi}{\tau} \right) \right],$$

где n – номер гармоники, ψ_n – амплитуда гармоники потокосцепления; τ – полюсное деление; x – смещение блока магнитов относительно фазы A ; $i_{a,b,c}$ – токи в соответствующих фазах.

Из выражения видно, что при известных значениях гармонических составляющих потокосцепления можно рассчитать тяговое усилие ЛСД без расчета создаваемых блоками магнитных полей. При этом гармонические коэффициенты ψ_n определяются путём разложения в ряд Фурье зависимости потокосцепления катушки путевой структуры с блоком магнитов от их взаимного положения, полученной из эксперимента прямыми измерениями.

Однако данный метод тоже имеет свои недостатки. Процесс измерений потокосцепления остаётся достаточно сложным, а результаты соответствуют только конкретной конфигурации магнита и катушки путевой структуры.

В данной работе предлагается расчётно-экспериментальный метод определения зависимости потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного положения, не привязанный к конкретным размерам катушки и соответственно облегчающий экспериментальную часть определения искомой зависимости.

Особенность метода заключается в том, что вместо измерения зависимости потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного положения производится измерение распределения индукции магнитного поля \mathbf{B} , создаваемого блоком постоянных магнитов в плоскости среднего витка катушки [4]. После измерения производится интегрирование (численное или аналитическое, если удаётся подобрать функцию распределения) индукции по площади катушки, что даёт магнитный поток и потокосцепление (рис. 1). Последовательное перемещение области интегрирования позволяет получить искомую зависимость потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного положения.

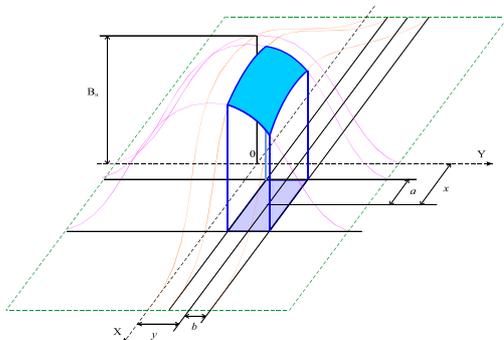


Рис. 1. Расчёт зависимости потокосцепления от смещения катушки относительно блока магнитов

В данной работе интегрирование заменено суммированием. На рис. 2 приведены зависимости потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного перемещения. Кривые для высот 20, 30 и 45 мм соответственно отражают результаты расчётов (1, 2, 3) и экспериментов (4, 5, 6). Шаг измерения индукции составил 1 см (5% от размера блока магнитов). Несмотря на неоптимальные условия хранения блоков, что привело к их частичному размагничиванию, а также грубую сетку измерения индукции, хорошее совпадение экспериментальных и расчётно-экспериментальных кривых показывает, что при помощи предлагаемого метода достаточно точно определяется потокосцепление, а, следовательно, и сила взаимодействия катушки с блоком постоянных магнитов.

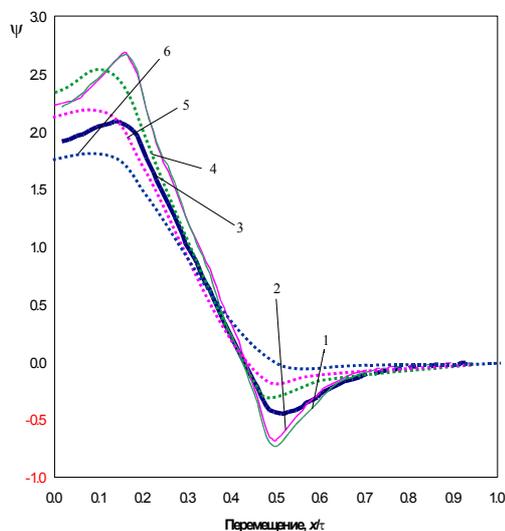


Рис. 2. Зависимости потокосцеплений от смещения блока магнитов на разных высотах

Определение такой зависимости для катушки путевой структуры другого размера или другой формы сводится к повторному интегрированию с другими пределами.

Исследование зависимости потокосцепления катушки путевой структуры с блоком постоянных магнитов от их взаимного положения проводится в два этапа. На первом этапе исследуется изменение ширины (рис. 3), а на втором – длины катушки (рис. 4).

Изменение ширины катушки проводилось с шагом 2 см в сторону уменьшения на 8 см, а в сторону увеличения – на 10 см. Результаты расчётов приведены на рис. 3. Изменения потокосцепления малы и заметны только в области малых смещений, но можно отметить следующие закономерности:

- при увеличении ширины катушки потокосцеп-

ление уменьшается, что объясняется увеличением площади с отрицательными значениями индукции;

- при уменьшении ширины катушки сначала происходит рост потокосцепления, объясняемый обрезкой отрицательных значений индукции, а впоследствии падение, вызванное обрезкой части положительных значений индукции.

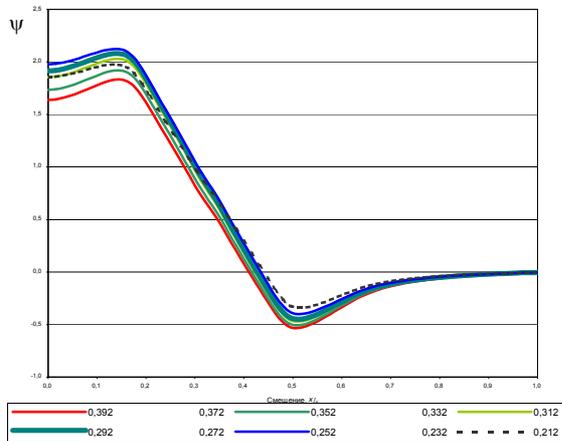


Рис. 3. Зависимости потокосцеплений от смещения блока магнитов при разной ширине катушки

Проведены исследования влияния длины катушки на зависимость потокосцепления катушки с блоком постоянных магнитов от их взаимного положения. Изменение длины катушки проводилось с шагом 2 см в сторону уменьшения на 14 см, а также в сторону увеличения на 16 см. Результаты расчётов приведены на рис. 4.

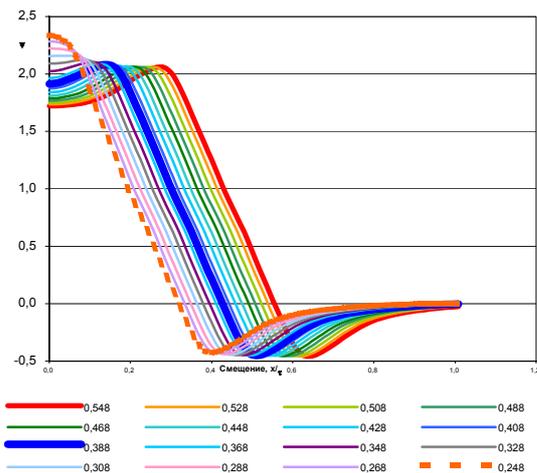


Рис. 4. Зависимости потокосцеплений от смещения блока магнитов при разной длине катушки

Изменения потокосцепления, в отличие от первого этапа, заметны не только в области малых смещений. При этом можно отметить, что с увеличением длины катушки точка перехода через 0, на-

клонная и отрицательная части кривой потокосцепления сдвигаются в область больших смещений. В области малых смещений при уменьшении длины катушки происходит выпучивание положительной части кривой потокосцепления с переходом от формы седла к форме, близкой к треугольнику.

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- предложенный метод позволяет определять потокосцепление магнита с катушкой с достаточной точностью, что подтверждается сравнением результатов расчёта с экспериментом;
- метод применим к любому электромеханическому аппарату, в котором сложно определить пространственную конфигурацию магнитного поля;
- при помощи данного метода можно определять потокосцепление постоянных магнитов с катушкой любого размера;
- изменение ширины катушки мало влияет на потокосцепление;
- при увеличении длины катушки наклонная и отрицательная части кривой потокосцепления сдвигаются в область больших смещений;
- в области малых смещений при уменьшении длины катушки происходит выпучивание кривой потокосцепления с переходом от формы седла к форме треугольника.

Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении поиска аналитических зависимостей для оптимизации размеров катушки, взаимодействующей с конкретным блоком постоянных магнитов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новіков В.Ф., Бурилов С.В., Воскобойник В.Е., Дзензерський В.О. Високошвидкісні транспортні системи з магнітним підвісом "MAGLEV" // Конструктори електро транспорту: Матеріали наукових читань з циклу: "Видатні конструктори України". Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут. Державний політехнічний музей. – К.: ЕКМО – 2003. – 82с. з іл.
2. Новиков В.Ф., Ворошилов А.С., Матин В.И. Усилия в линейном синхронном двигателе испытательного участка // Транспорт. – 2001. – Вып.9 – 184 с.
3. Новиков В.Ф., Ворошилов А.С., Зайцев А.Н., Комаров С.В. Метод измерения тягового усилия линейного синхронного электродвигателя // Транспорт. – 2002. – Вып. 10 – 126 с.
4. Новіков В., Бурилов С., Воскобойник В., Дзензерський В.. Дослідження магнітного поля блока постійних магнітів // Вісник Академії митної служби України. – 2004. – № 1 (21). – 133 с.