

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ, ВЫЗВАННЫХ ВИХРЕВЫМИ ТОКАМИ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ОСЕВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Ю.А. Макаричев

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Моделируется влияние вихревых токов на процессы в осевых электромагнитных подшипниках с помощью электрической схемы замещения и соответствующих векторных диаграмм. Параметры схемы рассчитываются методом конечных элементов.

Ключевые слова: *осевой электромагнитный подшипник, вихревые токи, магнитное поле, схемы замещения.*

Традиционная схема бесконтактного электромагнитного подвеса ротора вращающихся машин состоит из двух радиальных и одного двухстороннего осевого подшипников. В настоящей статье ставится задача моделирования процессов, вызванных вихревыми токами в магнитопроводах осевых электромагнитных подшипников (ОЭМП) в нестационарных режимах работы [1].

Магнитопроводы статора и диск ОЭМП, в отличие от радиального, не могут быть выполнены шихтованными. Это вызывает появление значительных вихревых токов в массиве статора и диске ротора при любых изменениях магнитного потока, вызванных осевыми колебаниями ротора или управляющими воздействиями переменных токов в катушках. Вихревые токи создают собственные магнитные потоки, направленные против изменения магнитного потока, вызвавшего появление этих токов, то есть оказывают на него демпфирующее воздействие. Величина вихревых токов и их демпфирующее действие во многом определяются скоростью изменения магнитного потока, их вызвавшего, а при гармоническом воздействии – его частотой. На высоких частотах управляющих токов демпфирующее действие вихревых токов в массивах магнитопроводов может привести к снижению величины пондеромоторной силы более чем на порядок. Поэтому для ОЭМП с нешихтованными сердечниками задача учета вихревых токов весьма актуальна.

Для решения задачи расчета магнитного поля и вихревых токов воспользуемся методом конечных элементов (МКЭ) для осесимметричной геометрической модели магнитной системы. Метод реализован в программном пакете ELCUT5.1. Геометрическая модель импортирована из рабочих чертежей электромагнита в среде AutoCad с автоматизированным генерированием расчетной сетки, содержащей в зависимости от задачи от 350 до 520 тысяч узлов. В осесимметричной постановке задачи предполагается, что геометрические и физические свойства модели постоянны для любого заданного радиуса и не зависят от угловой координаты. Для номинального и близких к нему режимов работы это допущение практически не вносит погрешностей в расчеты поля ОЭМП. Очевидно также, что при осевом смещении ротора картина поля остается осесимметричной. При радиальном смещении ротора без угловых наклонов оси картину поля с большой точностью можно считать осесимметричной, так как

немагнитные зазоры между ступицей ротора ОЭМП и внутренним диаметром статоров более чем на порядок превышают максимальное радиальное смещение.

На рис. 1 представлены трехмерная (а) и соответствующая ей двумерная осесимметричная (б) геометрические модели ОЭМП.

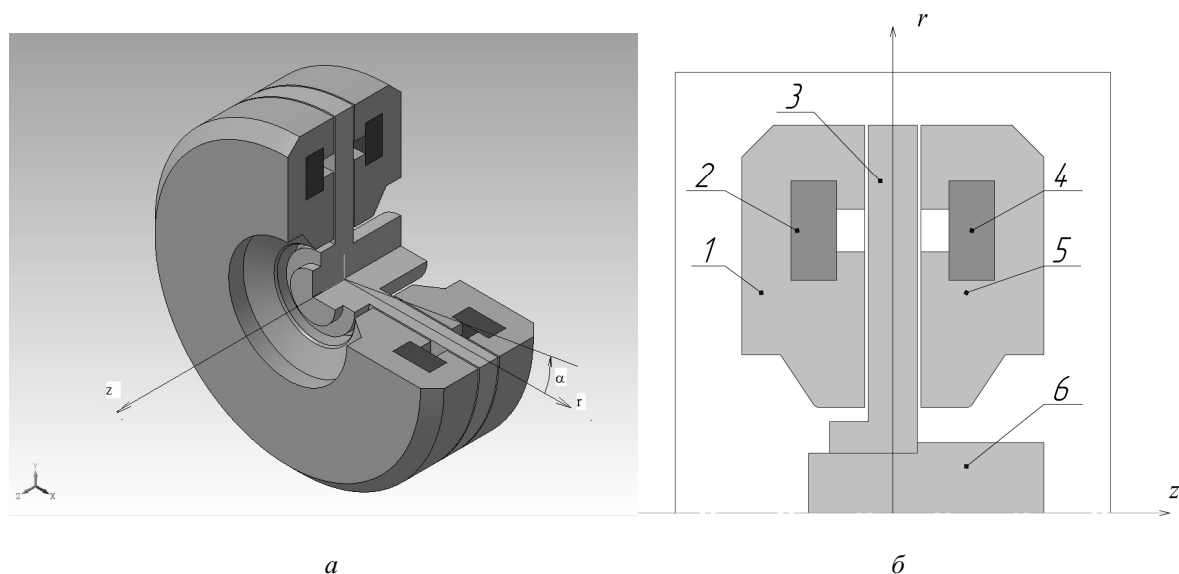


Рис. 1. Трехмерная (а) и двумерная осесимметричная (б) геометрические модели осевого электромагнитного подшипника:

1, 5 – магнитопроводы статора; 2, 4 – обмотки управления; 3 – диск ротора; 6 – вал

Результаты исследования воздействия вихревых токов в магнитопроводах ОЭМП на осевое усилие на различных частотах и определение численных значений параметров схемы замещения в этих режимах иллюстрируются (рис. 2) графиками переходных процессов на частотах 8,7; 87; 870 Гц (расчетные механические резонансные частоты объекта). На рис. 2: 1 – график полного тока обмотки управления I_w при частоте 8,7 Гц; 2, 3, 4 – графики пондеромоторной силы на указанных частотах.

Для всех графиков отношение амплитуды переменной составляющей тока к постоянной составляющей – величина неизменная:

$$k_{i\sim} = \frac{I_m}{I_d} = 0,25.$$

Одинаковая по амплитуде переменная составляющая тока на разных частотах вызывает различные значения амплитуды переменной составляющей пондеромоторной силы. Для количественного учета этого явления введен коэффициент демпфирования вихревыми токами электромагнитной силы:

$$k_d = \frac{k_{i\sim}}{k_{f\sim}},$$

где $k_f = \frac{F_{m\sim}}{F_d}$; $F_{m\sim}$ – амплитуда переменной составляющей; F_d – установившееся среднее значение пондеромоторной силы.

Как видно из табл. 1, на частоте 870 Гц сигнал на переменном токе гасится вихревыми токами более чем в 40 раз, что делает управление ОЭМП с массивными магнитопроводами на таких частотах энергетически неоправданным.

Коэффициент демпфирования вихревыми токами электромагнитного усилия

$f, \text{Гц}$	8,7	87	870
$k_0, \text{о.е.}$	2,5	6,9	41,7

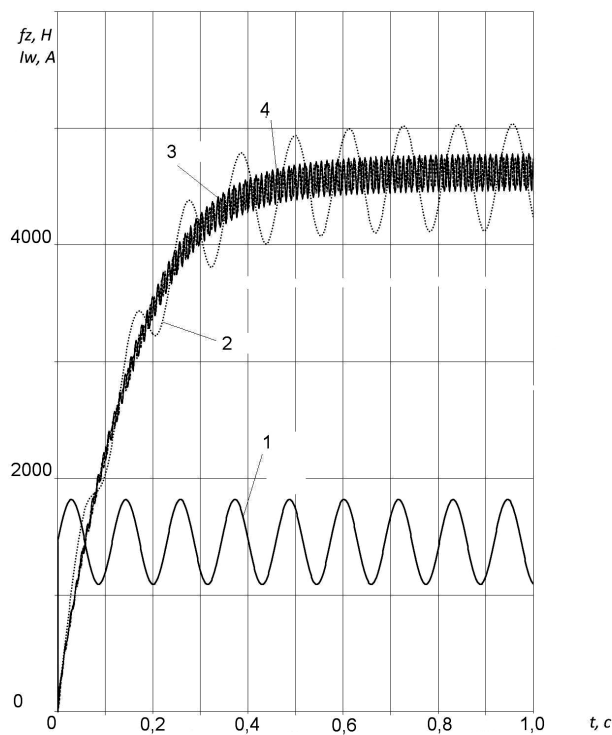


Рис. 2. Реакция ОЭМП на гармоническое управляющее воздействие, наложенное на постоянный ток и вызванные им пондеромоторные силы при различных частотах сигнала: 1 – полный ток 8,7 Гц; 2, 3, 4 – подъемная сила при частотах 8,7; 87; 870 Гц

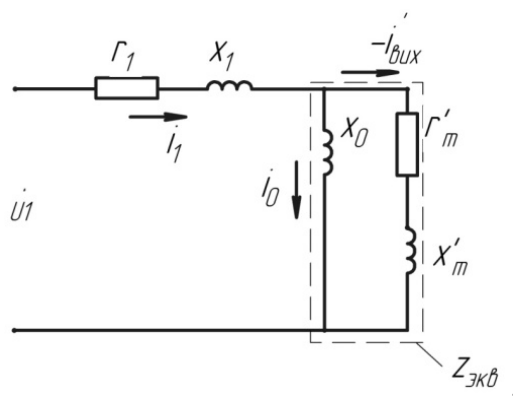


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения ОЭМП

Для моделирования процессов, вызванных вихревыми токами в магнитопроводах ОЭМП, предложена схема замещения (рис. 3), в которой r_l, x_l – составляющие импеданса обмотки управления; x_0 – индуктивное сопротивление воздушного зазора; r'_m – приведенное активное сопротивление вихревых токов (определяет магнитные потери); x'_m – приведенное индуктивное сопротивление вихревых токов (определяет их размагничивающее действие).

Для определения значений параметров схемы замещения (рис. 3) были проведены расчеты методом конечных элементов электромагнитного поля ОЭМП турбокомпрессора железнодорожного дизеля. В качестве управляющего воздействия был задан ток катушки, изменяющийся по синусоидальному закону. В модели ток задавался в виде средней плотности тока, определяемой как отношение полного тока к сечению катушки:

$$j = \frac{I_w}{S_k}.$$

Источник питания моделировался источником тока бесконечной мощности. Расчеты проводились для трех диапазонов частот:

$$f = 0,1 \dots 1,0 \text{ Гц}, f = 1,0 \dots 10 \text{ Гц}, f = 10 \dots 100 \text{ Гц}.$$

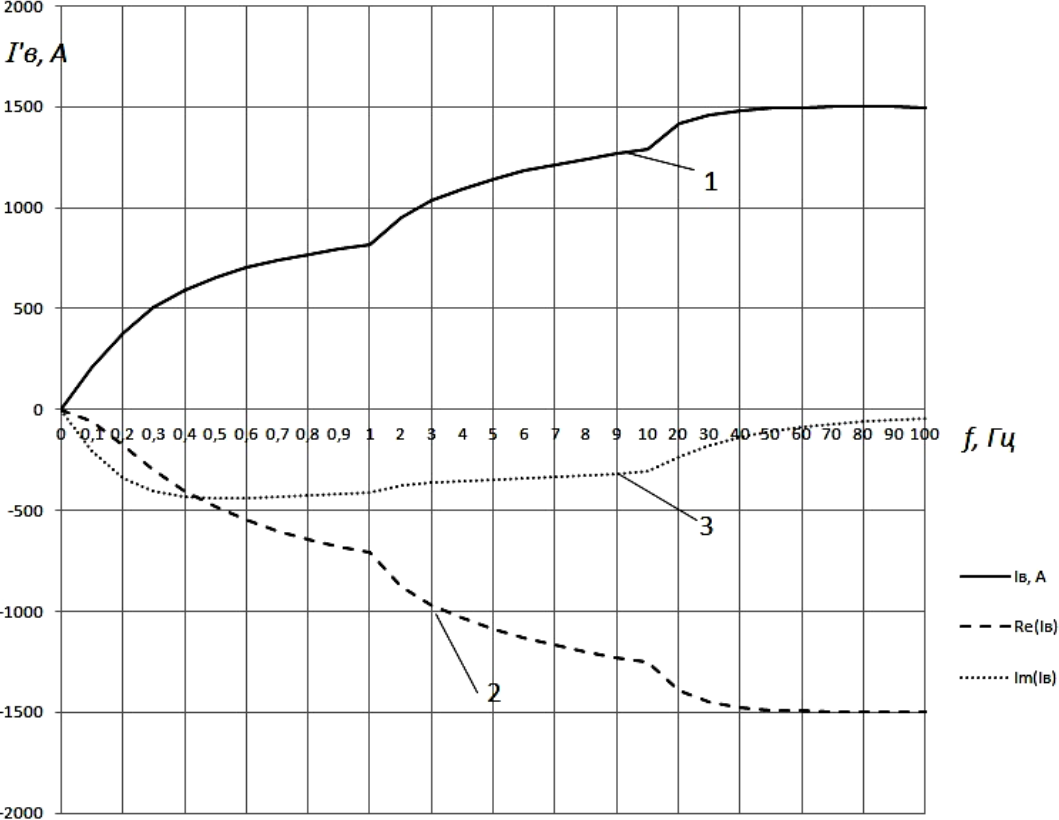


Рис. 4. Графики значений полного вихревого тока и его составляющих

В качестве расчетных величин определялись следующие параметры, представленные на графиках (рис. 4):

- I'_B – суммарный приведенный вихревой ток (кривая 1);
- $\text{Re}(I_B)$ – действительная часть суммарного вихревого тока (кривая 2);

– $\text{Im}(I_B)$ – мнимая часть суммарного вихревого тока (кривая 3) (на графиках ось абсцисс – неравномерная).

Вещественная составляющая тока определяет магнитные потери, а мнимая – размагничивающее действие вихревых токов. Последняя после роста в диапазоне частот от 0 до 0,4 Гц постепенно снижается до малозначимых величин на частотах свыше 50 Гц. Физически это объясняется тем, что на таких частотах глубина проникновения в массив переменного потока

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \mu_r g \omega}}$$

не превышает 3...5 мм (скин-эффект) и основную долю вихревого тока составляет вещественная его часть (на частоте 100 Гц практически 100 %), определяющая вихревые потери.

Векторные диаграммы токов ОЭМП в зависимости от частоты существенно меняются (рис. 5). Так, на низких частотах (0,1 Гц) приведенный вихревой ток I'_B оказывает малое влияние на полный ток электромагнита, остающийся практически индуктивным. На частоте $f = 100$ Гц действие вихревого тока настолько велико, что векторы полного тока $I_{L,100}$ и приведенного вихревого тока $I'_{B,100}$ близки по амплитуде и фазе. Оба вектора имеют подавляющую активную составляющую.

На рис. 5 приведены векторные диаграммы вихревых токов для различных частот (1, 10 и 100 Гц), иллюстрирующие характер изменения действительной и мнимой части импеданса.

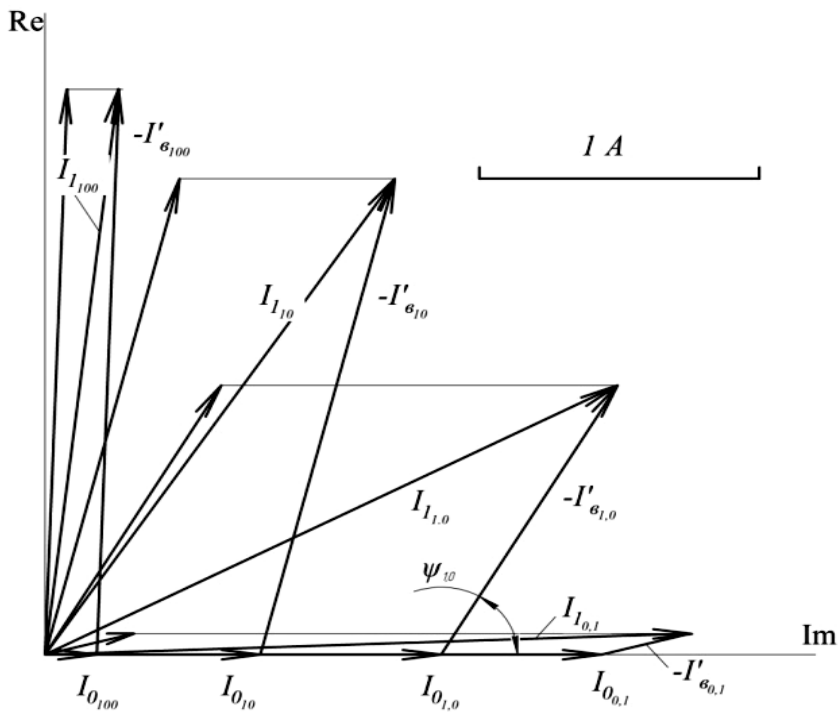


Рис. 5. Векторные диаграммы токов ОЭМП на различных частотах

Для моделирования действия вихревых токов без привлечения трудоемких численных методов расчета поля данный метод, основанный на использовании схем замещения и векторных диаграмм, требует знания соотношения x'_m/r'_m . Предложенное в [2] постоянное значение этого отношения, равное 0,6 и основанное на эмпирических данных, уточнено в ходе проведенного анализа численными методами. Установлено, что для диапазона частот от 0,1 до 100 Гц отношение x'_m/r'_m изменяется по линейному закону и имеет численные значения от 0,3 до 0,54.

Как показывают расчеты МКЭ, аппроксимация в виде экспоненты (1) частотной зависимости импеданса вихревых токов дает достоверные результаты по точности для диапазона частот 0,1...1,0 Гц:

$$z'_m = z'_{m1} \cdot e^{kf}, \tag{1}$$

где z'_{m1} – полное приведенное сопротивление вихревых токов на частоте 1 Гц; k – коэффициент аппроксимации, значения которого приведены в табл. 2.

Экспоненциальная аппроксимация дает коэффициент достоверности $R^2=0,99$ по сравнению с $R^2=0,78$ для аппроксимации степенной функцией.

Таблица 2

Коэффициент экспоненциальной аппроксимации для $f < 1$ Гц

Параметр	z'_{m1}	r'_{m1}	x'_{m1}
k	0,092	0,088	0,127

Для частот, превышающих 1 Гц, удовлетворительные результаты по точности дает степенная аппроксимация вида

$$z'_m = a \cdot z'_{m1} {}^{mf}. \tag{2}$$

Методом наименьших квадратов для всех зависимостей импеданса от частоты были определены показатели степени m и коэффициента a , дающие наименьшее отклонение аппроксимирующих функций. Результаты их расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Аппроксимирующие коэффициенты и показатели степени для частот свыше 1 Гц

f , Гц	(1...10]			(10...100]		
Параметр	z'_{m1}	r'_{m1}	x'_{m1}	z'_{m1}	r'_{m1}	x'_{m1}
a	1	1	1	4,44	4,31	4,86
m	0,61	0,60	0,65	0,43	0,42	0,46

Минимальное значение коэффициента достоверности во всем рассматриваемом диапазоне частот составило $R^2 = 0,96$.

Данные табл. 2 и 3 позволяют рассчитывать по выражениям (1) и (2) значения импедансов вихревых токов для всего рабочего диапазона частот.

Выводы

1. Вихревые токи в магнитопроводах при гармоническом сигнале управления имеют действительную и мнимую составляющие. Вещественная часть определяет

потери от вихревых токов, а мнимая – размагничивающее действие вихревых токов на возмущение, их вызвавшее. Мнимая часть после роста в диапазоне частот от 0 до 0,4 Гц постепенно снижается до малозначимых величин на частотах свыше 50 Гц. Действительная часть растет с ростом частоты.

2. Влияние вихревых токов на процессы в ОМЭП предложено оценивать с помощью электрической схемы замещения и соответствующих векторных диаграмм. Активные и индуктивные параметры схемы рассчитываются МКЭ или определяются экспериментально для одной частоты (как правило, 1 Гц), а для других частот экстраполируются степенной или экспоненциальной функциями, коэффициенты и показатели которых рассчитаны в настоящей работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаричев Ю.А., Стариков А.В. Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.
2. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. – СПб: Политехника, 2003. – 206 с.

Статья поступила в редакцию 25 января 2013 г.

METHOD OF MODELING THE PROCESSES CAUSED BY THE EDDY CURRENTS IN THE NON-STATIONARY REGIMES OF THE AXIAL MAGNETIC BEARINGS

Yu.A. Makarichev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The effect of eddy currents on the processes in the axial magnetic bearings is simulated with the help of the electrical equivalent circuit and the corresponding vector diagrams. The parameters of the scheme are calculated by the method of finite elements.

Keywords: *the axial electromagnetic bearing, vortical currents, a magnetic field, equivalent circuits.*