

УДК 621.313.332

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ В МАССИВЕ ДВУХСЛОЙНОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Мартынов В.Н., Олейников А.М., Беляева Л.Л.

Представлен один из путей определения распределения токов в массиве двухслойного ротора асинхронного двигателя при включении его на постоянное или синусоидальное напряжение.

Известно, что наибольший эффект применения асинхронных электродвигателей с двухслойным ротором (АДДР) по сравнению с асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором (АДКР) наблюдается в электроприводах динамического режима работы при частых пусках, реверсах, торможениях и т.п. [1]. Основное значение для таких режимов имеют переходные процессы. В связи с этим приобретает практический интерес исследование электромагнитных переходных процессов в массиве двухслойного ротора (ДР).

Экспериментальное исследование электромагнитных переходных процессов в ДР представляет большие трудности. Такие эксперименты требуют частичного разрушения ротора, сложных конструктивных, измерительных приспособлений. Поэтому целесообразно воспользоваться математическим моделированием для изучения явления вытеснения тока и его влияния на характер переходных процессов в массиве ДР.

Для составления модели ДР воспользуемся интегральным уравнением относительно изображения плотности тока ДР, полученным в [2]



Рисунок 1 – Расчетная схема двухслойного ротора

$$\delta(p, h) + \nu p \int_0^h \delta(p, \xi) \left[\int_h^H dh \right] d\xi + \nu p \int_h^H \delta(p, \xi) \left[\int_\xi^H dh \right] d\xi = \frac{U(p)}{\rho l}, \quad (1)$$

где $U(p)$ – изображение напряжения; H, l – соответственно толщина и длина массивного цилиндра ДР; $\nu = \mu/\rho$ – отношение абсолютной магнитной проницаемости к удельному сопротивлению материала ДР; $\delta(p, h)$ – изображение плотности тока элемента массивного цилиндра.

Приближенное решение системы n линейных алгебраических уравнений с n неизвестными [3] равносильно тому, что массивный цилиндр ДР по высоте разбивается на n частей (рисунок 1), каждая такая часть ДР прини-

мается за отдельный проводник, индуктивно связанный с другими ($n-1$) проводниками. Все n -проводники включены параллельно. В результате получим систему уравнений для токов сложной электрической цепи, состоящей из n контуров. Математически это соответствует разбиению пределов интегрирования определенных интегралов на ряд участков.

Для примера на рисунке 1 массивный цилиндр ДР разбит на четыре участка. Ток первого участка, ограниченного ординатами $(0, h_1)$, равен

$$i = b \int_0^{h_1} \delta(h) dh. \quad (2)$$

Он также равен произведению средней плотности тока этого участка на его сечение. Средняя плотность тока на участке равна действительной плотности тока, соответствующей ординате $h'_1 (0 < h'_1 < h_1)$, т.е. внутри участка всегда найдется такая ордината h'_1 , плотность тока которой равна средней плотности тока на участке. Тогда

$$i = \delta(h'_1) b \int_0^{h_1} dh. \quad (3)$$

Далее при приближенном решении уравнения (1) будем определять плотности токов, соответствующие ординатам h'_i . Ордината (h), переменная и непрерывная в уравнении (1), принимает при символе (δ) фиксированное значение. Эти же фиксированные значения h'_i принимает нижний предел внутренних интегралов. Уравнение (1) умножим на $\rho l b$, разделим на b и представим в виде:

$$\delta(p, h) \rho l + \rho \mu l b \int_0^h \delta(p, \xi) \left[\int_h^H \frac{dh}{b} \right] d\xi + \rho \mu l b \int_h^H \delta(p, \xi) \left[\int_\xi^H \frac{dh}{b} \right] d\xi = U(p). \quad (4)$$

Первый член уравнения (4) для первого участка ДР представим в виде $\delta(p, h) \rho l \approx r_1 i_1$.

Внутренние интегралы разбиваем на участки, ограниченные центрами токов h'_i (рисунок 1). Для любого такого участка справедливо

$$\delta(h'_i) \int_{h'_i}^{h'_{i+1}} b dh = \int_{h'_i}^{h'_{i+1}} \delta(h'_i) b dh = i_{i+1}; \quad (5)$$

$$\mu l \int_{h'_i}^{h'_{i+1}} \frac{dh}{b} = L_i, \quad (6)$$

где L_i – индуктивности, создаваемые потоками, замыкающимися по высоте $h'_{i+1} - h'_i$; h'_i – высота центра на i -ом участке.

Внешние интегралы разбиваются на участки, совпадающие с участками, на которые разбит ДР (рисунок 2). С учетом (5) и (6) второй член уравнения (4) для первого участка ДР представим в виде:

$$p \iint lb \int_0^h \delta(p, \xi) \left[\int_{h'_i}^H \frac{dh}{b} \right] d\xi = p i_1 [L_1 + L_2 + L_3 + L_4].$$

Для второго, третьего и четвертого участков он имеет вид:

$$p(i_1 + i_2)(L_2 + L_3 + L_4);$$

$$p(i_1 + i_2 + i_3)(L_3 + L_4);$$

$$p(i_1 + i_2 + i_3 + i_4)L_4.$$

Третий член уравнения (4) отличается от второго пределами интегрирования и тем, что внутренний интеграл зависит от переменной интегрирования внешнего интеграла. Для четвертого участка он равен нулю, а для первого, второго и третьего участков имеет вид:

$$p i_2 (L_2 + L_3 + L_4) + p i_3 (L_3 + L_4) + p i_4 L_4;$$

$$p i_3 (L_3 + L_4) + p i_4 L_4;$$

$$p i_4 L_4.$$

Для выделенных четырех участков система уравнений относительно изображений токов имеет вид:

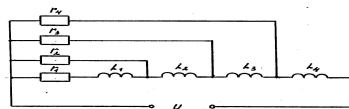


Рисунок 2 – Принципиальная схема двухслойного ротора

$$\begin{aligned}
r_1 i_1 + p[L_1 i_1 + L_2(i_1 + i_2) + L_3(i_1 + i_2 + i_3) + L_4(i_1 + i_2 + i_3 + i_4)] &= U(p); \\
r_2 i_2 + p[L_2(i_1 + i_2) + L_3(i_1 + i_2 + i_3) + L_4(i_1 + i_2 + i_3 + i_4)] &= U(p); \\
r_3 i_3 + p[L_3(i_1 + i_2 + i_3) + L_4(i_1 + i_2 + i_3 + i_4)] &= U(p); \\
r_4 i_4 + pL_4(i_1 + i_2 + i_3 + i_4) &= U(p).
\end{aligned} \tag{7}$$

Аналогичная система уравнений получается при делении ДР на любое число участков. Можно составить такую электрическую схему с n -контурами, система уравнений ЭДС которой будет совпадать с системой уравнений (7). Для четырех участков такой схемой будет схема, изображенная на рисунке 3. Решение будет заключаться в том, чтобы для такой схемы определить токи как в переходных, так и в установившихся режимах. Это можно осуществить путем аналитического решения системы уравнений (7) моделированием этой системы уравнений на АВМ или измерением токов в схеме рисунка 2 при конкретных значениях R и L .

Для АВМ типа МН-7М после преобразований система уравнений (7) принимает вид

$$\begin{aligned} pi_1 &= k_1 i_2 - k_1 i_1; \\ pi_2 &= k_1 i_3 + k_1 i_1 - k_2 i_2; \\ pi_3 &= k_1 i_4 + k_1 i_2 - k_2 i_3; \\ pi_4 &= k_4 u + k_1 i_3 - k_3 i_4, \end{aligned} \quad (8)$$

Для примера на рисунке 4 приведены результаты решения системы уравнений (8) на МН-7М для различных значений магнитной проницаемости ДР при включении на постоянное по знаку напряжение.

Из осциллограмм видно, что в начальный период переходного процесса происходит быстрое нарастание тока, затем скорость нарастания

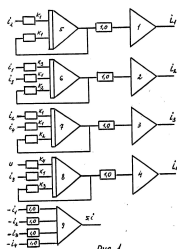


Рисунок 3 – Аналоговая схема участков двухслойного ротора

массивного цилиндра и его толщины H . При этом полагаем, что постоянное по знаку напряжение прикладывается к ротору при включении двигателя в сеть с малым скольжением, а синусоидальное – при пуске или реверсе двигателя.

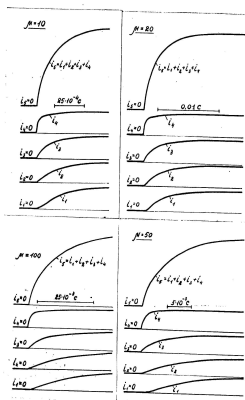


Рисунок 4 – Осциллограммы решения уравнений (8)

тока уменьшается. Постоянная времени нарастания тока в конце переходного процесса примерно на порядок ниже постоянной времени начального периода переходного процесса. Скорость нарастания тока отдельных участков сечения ДР неодинакова. В верхнем участке ток быстро достигает установившегося значения, а в нижних участках явно видно замедление процесса нарастания тока.

С помощью полученной модели можно произвести оценку распределения токов в массиве ДР при его включении на постоянное по знаку или синусоидальное напряжение, для различных значений магнитной проницаемости материала