

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Голенков Г.М., к.т.н., доцент

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

Украина .03037. Киев, пр. Воздухоплавания 31, КНУСА. кафедра “Электротехники и электропривода”

тел. (044) 241-55-65

*Досліджені питання, пов'язані з негативним впливом "крайового ефекту" на енергетичні параметри лінійного асинхронного електродвигуна (ЛАД), та шляхи їх покращення. Розраховано математичний вираз залежності тягового зусилля від електричних і конструктивних параметрів двигуна.*

*Исследованы вопросы, связанные с отрицательным влиянием “краевого эффекта” на энергетические параметры линейного асинхронного электродвигателя (ЛАД), и пути их улучшения. Дано математическое выражение зависимости тягового усилия от электрических и конструктивных параметров двигателя.*

Для изучения процессов, протекающих во вторичном элементе (ВЭ) линейного асинхронного электродвигателя (ЛАД), был использован метод симметричных составляющих. Из анализа [1, 2, 3] известно, что во ВЭ из-за краевого эффекта (КЭ) возникает многофазная несимметричная система токов. Исследования [3] показали, что на активном участке ВЭ число стержней короткозамкнутой (к. з.) обмотки должно быть кратно трём, что облегчает расчёт ЛАД. В этом случае данную несимметричную систему токов можно разложить на симметричные составляющие: прямую и обратную последовательности.

Чтобы получить аналитические выражения тяговых и рабочих характеристик ЛАД, сделаны следующие допущения: индуктор ЛАД изготовлен с конечным числом пар полюсов, а ВЭ может быть секционным или сплошным. Секция ВЭ имеет форму параллелепипеда, собранного из листов электротехнической стали с пазами, которые выполнены на плоскостях активной части. В эти пазы уложена к. з. обмотка, имеющая вид многофазной обмотки без общего нуля, число пар полюсов которой равно числу пар полюсов бегущего магнитного поля индуктора. Число фаз соответствует числу стержней ВЭ и кратно трём. Лобовые соединения между звеньями отсутствуют. Для испытания ЛАД был разработан стенд, представляющий собой раму с блоком и ведущим цевочным колесом, через которые переброшен ленточный куочно-линейный ВЭ. Ведущее колесо с помощью вала и муфты соединено с нагрузочной машиной постоянного тока. Питание ЛАД осуществлялось от тиристорного преобразователя частоты.

Стенд позволяет проводить экспериментальные исследования ЛАД в длительном режиме. Исследования электромагнитных процессов, протекающих во ВЭ ЛАД, состоящем из звеньев с к. з. обмоткой, показали, что в исследуемом контуре возникает многофазная несимметричная система токов [3]. Данная система токов во ВЭ возникает из-за того, что токи в крайних стержнях звена, а также в стержнях, находящихся в краевых зонах воздействия бегущего магнитного поля индуктора, равны току, протекающему по лобовой части к. з. Обмотки и направлены в противоположную сторону по отношению к току соответствующей фазы. Все остальные токи в фазах к.з. обмотки равны по модулю между собой и составляют трехфазную симметричную систему токов в многофазном контуре ВЭ.

Несимметричную систему токов во ВЭ можно разложить на симметричные составляющие токов прямой и обратной последовательности. Степень несимметрии фазных токов ВЭ ЛАД оценивается отношением модулей токов симметричных составляющих обратной и прямой последовательности, т.е. коэффициентом несимметрии  $\xi$ , что соответствует обратной величине числу пар полюсов  $-p$ :

$$\xi = \frac{1}{2p}. \quad (1)$$

Распределение магнитного потока в зависимости от действия симметричной системы токов вторичного контура прямой последовательности ЛАД аналогично распределению основного магнитного потока асинхронных машин с вращающимся ротором (АД).

Следовательно, схема замещения ЛАД для данного вида последовательности идентична схеме замещения обычного АД. Частота токов ВЭ соответствует:  $f_{2,1} = sf_1$ , где  $s$  - скольжение;  $f_1$  - частота питающей сети, Гц.

Схема распределения магнитных потоков в зависимости от воздействия симметричных токов ВЭ обратной последовательности подобна распределению магнитных потоков АД, питание которого осуществляется со стороны ротора с фазной обмоткой током с частотой  $f_{2,2} = (2s - 1) f_1$ .

Таким образом, ЛАД можно представить в виде двух соединенных ЛАД общим ВЭ, один из которых питается со стороны статорной обмотки, другой – со стороны обмотки ВЭ.

Для вывода математических выражений, описывающих характеристики электромагнитного тягового усилия и рабочих характеристик ЛАД, схемы замещения прямой и обратной последовательности представлены в виде каскадно-соединенных электрических цепей, а затем с учетом коэффициента несимметрии преобразованы таким образом, чтобы намагничивающий контур был подключен к сети.

Эквивалентная схема замещения ЛАД (рис.1) имеет следующие параметры:  $U_1$  - подводимое напряжение, В;  $I_1$  - ток индуктора, А;  $I_\mu$  - ток контура намагничивания, А;  $\Gamma_{2,1}$ ,  $\Gamma_{2,2}$  - приведенные рабочие токи ВЭ прямой и обратной последовательности, А;  $R_1$ ,  $X_1$  - активное и индуктивное сопротивления обмотки статора, Ом;  $R'_2$ ,  $X'_2$  - приведенные активное и индуктивное сопротивления обмоток ВЭ, Ом;  $R_\mu$ ,  $X_\mu$  -

активное и индуктивное сопротивления намагничивающего контура, Ом;  $s = (V_1 - V)/V_1$  – скольжение, где  $V_1 = 2\tau f_1$  – скорость бегущего магнитного поля статора, м/с;  $\tau$  – полюсное деление, м;  $V$  – скорость вторичного элемента (бегуна), м/с.

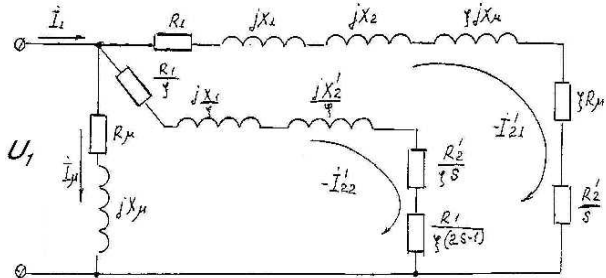


Рис.1. Эквивалентная схема замещения ЛАД

Эквивалентная схема замещения (см. рис.1) имеет три явно выраженных контура: с током намагничивания

$$I_\mu = U_1 / Z_\mu, \quad (2)$$

где  $Z_\mu = R_\mu + jX_\mu$  – полное сопротивление контура намагничивания, Ом;

с рабочим током прямой последовательности:

$$I_{21} = U_1 / Z_{21}, \quad (3)$$

где  $Z_{21} = R_1 + R_1'/s + R_\mu + j(X_1 + X_2' + X_\mu)$  – полное сопротивление рабочей ветви для симметричных токов прямой последовательности, Ом;

с рабочим током обратной последовательности:

$$I_{22} = U_1 / Z_{22}, \quad (4)$$

где  $Z_{22} = R_1 + R_2'/s + R_1/(2s-1) + j(X_1 + X_2')$  – полное сопротивление рабочей ветви для симметричных токов обратной последовательности, Ом.

Тогда активная мощность, потребляемая ЛАД с учетом выражений (3) и (4), будет соответствовать:

$$P_{э\text{кв}} = (-I_{21})^2 \frac{R_2'}{s} + (-I_{22})^2 \left( \frac{R_2'}{s} + \frac{R_1}{2s-1} \right). \quad (5)$$

Электромагнитное тяговое усилие, развиваемое ЛАД с учетом выражения (5), описывается уравнением:

$$F_{э\text{кв}} = \frac{m_1 U_1^2 R_2' / s}{V_1 |Z_{21}|^2} + \xi \frac{m_1 U_1^2 ((R_2' / s + R_1 / (2s-1)))}{V_1 |Z_{22}|^2}, \quad (6)$$

где  $|Z_{21}|^2 = (R_1 + R_2'/s + \xi R_\mu)^2 + (X_1 + X_2' + \xi X_\mu)^2$  – квадрат модуля полного сопротивления рабочей ветви для симметричных токов прямой последовательности;  $|Z_{22}|^2 = (R_1 + R_2'/s + R_1/(2s-1))^2 + (X_1 + X_2')^2$  – квадрат модуля полного сопротивления рабочей ветви для симметричных токов обратной последовательности;  $m_1$  – число фаз обмотки статора.

Первое слагаемое выражения (5) – это тяговая характеристика ЛАД для симметричной системы токов прямой последовательности, а второе – обратной. Из анализа тяговой характеристики ЛАД следует, что ей присущи "провалы" в области скольжения  $s = 0,5$  (рис. 2), которые отрицательно сказываются на энергетических параметрах ЛАД, снижая  $\cos\phi$  и КПД.

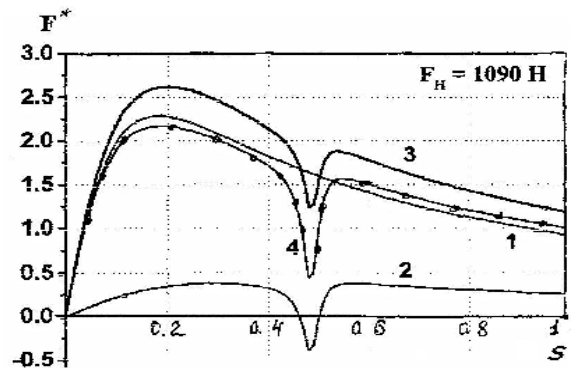


Рис.2. Семейство тяговых характеристик ЛАД

Теоретические исследования были подтверждены экспериментально. Использовались два ЛАД со следующими энергетическими и конструктивными параметрами: номинальное напряжение  $U_1 = 380$  В; частота  $f_1 = 50$  Гц; номинальная мощность  $P_n = 3,1$  кВт;  $\cos\phi = 0,6$ ; КПД = 0,65; номинальное тяговое усилие  $F_n = 1090$  Н; длина магнитопровода – 1,0 м; ширина магнитопровода – 0,12 м; полюсное деление – 0,045 м; обмотка трёхфазная однослойная; число пар полюсов – 10; число пазов в магнитопроводе – 60. Магнитопровод индуктора выполнен из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, секции ВЭ длиной 0,2 м, шириной 0,04 м и высотой 0,12 м изготовлены из набранных в пакет листов электротехнической стали. На активной части секций ВЭ сделаны пазы, залитые алюминиевым сплавом. Полученная секция ВЭ представляет собой к. з. обмотку, имеющую 18 стержней коротко замкнутых между собой. Немагнитный зазор между индуктором и ВЭ составляет 2 мм.

На рис. 2 представлено семейство тяговых характеристик ЛАД.  $F^* = F/F_n$  – тяговое усилие развиваемое ЛАД в относительных единицах. 1 – характеристика тягового усилия развиваемого ЛАД для симметричных токов прямой последовательности; 2 – для обратной последовательности; 3 – расчетная характеристика; 4 – экспериментальная тяговая характеристика ЛАД.

Теоретические и экспериментальные исследования данного ЛАД показали, что токи ВЭ являются явно несимметричными за счёт конструктивных особенностей двигателя; так несимметрия токов отрицательно действует на энергетические параметры: КПД составляет до 30%, коэффициент мощности – до 0,45, а линейная скорость ВЭ снижается до 50% синхронной скорости бегущего магнитного поля статора.

Следовательно, для улучшения энергетических параметров ЛАД целесообразно исключить разрывы как электрической, так и магнитной цепей ВЭ, а также увеличить число пар полюсов статора.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Насар С. А., Болдса И. Линейные тяговые электрические машины / Под ред. А. С. Курбасова. - М.: Транспорт, 1981. -176с.
- [2] Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей / Пер. С англ. - Л.: Энергоатомиздат. Ленинград, отделение, 1983. - 180с.
- [3] Голенков Г. М. Несиметрія режимів роботи лінійних асинхронних двигунів // Наука і техніка в міському господарстві. Вип. 24. - Київ: Будівельник, 1973. - С. 13- 18.

Поступила 05.09.2003