

ИССЛЕДОВАНИЯ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С МОДУЛЬНОЙ ОБМОТКОЙ

Бондаренко В.И.

1. В [1, 2] описан электропривод, включающий линейный многофазный асинхронный двигатель со статором, содержащим магнитопровод с пазами, в которых расположены катушки фазных обмоток с подвижной частью и понижающий трансформатор с сердечником и обмотками. Замена трех однофазных трансформаторов одним трехфазным и замена плоского однофазного элемента объёмным, трехэлементным модулем позволяет получить более компактную конструкцию обмоток и дополнительные полезные характеристики электропривода [3, 4].

Цель работы – экспериментальное обоснование возможности использования эквивалентной схемы замещения нормального АД для анализа основных технико-экономических характеристик линейного двигателя с модульной обмоткой.

2. Ограничения. Предполагается, что бегущее поле двигателя описывается одной основной гармоникой

$$B = B_m \cos\left(\omega t - \frac{\pi z}{\tau}\right), \quad (1)$$

где B – мгновенное значение индукции поля; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота тока; τ – полюсное деление, B_m – амплитуда; t – текущее время.

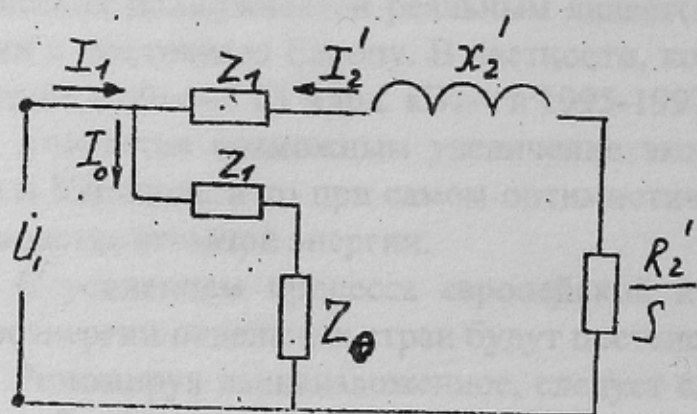


Рисунок 1 – Схема замещения

Другими словами, предполагается, что число полюсов статора достаточно велико, чтобы можно было пренебречь концевыми эффектами, пульсирующими и обратно бегущими полями. Кроме того предполагается, что $U_1 \approx E_1$. Т.к. E_1 отличается от U_1 на несколько процентов, то такое приближение не вносит существенной ошибки. Принятые допущения позволяют при анализе использовать схему замещения нормального асинхронного двигателя, например, показанную на рис. 1 схему с вынесенным намагничивающим конту-

ром, комплексное сопротивление которого $z_0 = R_0 + jx_0$, а комплексные сопротивления обмотки статора и приведенной к ней обмотки модуля и бегуна соответственно равны $z_1 = R_1 + jx_1$; $z_2' = R_2' + jx_2'$. Ток в намагничивающем контуре равен сумме токов первичного и приведенного вторичного контуров $I_0 = I_1 + I_2'$. Тогда:

$$I_0 = U / (Z_1 + Z_0); \quad I_2' = U / (Z_1 + Z_2') \quad (2)$$

3. Математическая модель. Формулу электромагнитной силы линейного двигателя с учетом принятых допущений получим после подстановки в уравнение электромагнитного момента нормального асинхронного двигателя $\omega = v_1 / r = 2\tau f_1 / r$; $M_d = F_d r$ (где $r \rightarrow \infty$ – радиус расточки кругового статора); V – линейная скорость поля:

$$F_{эм} = \frac{mpU_1 R_2' / s}{2\tau f_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(x_1 + x_2' \right)^2 \right]}, \quad (3)$$

где m – число фаз; s – скольжение; U_1 – фазное напряжение.

4. Уравнение движения бегуна запишем в виде

$$F_d = F_c + m \frac{dv}{dt}. \quad (4)$$

В простейшем подъемнике, когда двигатель расположен вертикально, сила сопротивления $F_c = mg$, равная суммарному весу бегуна и подвешенного к нему груза. Обозначим ускорение бегуна $dv/dt = a$, а отношение $g/a = \xi_3$, где g – ускорение земного тяготения. Тогда отношение силы тяги двигателя к силе сопротивления:

$$\lambda = \frac{F_d}{F_c}. \quad (5)$$

При нулевых начальных условиях ($t=0$; $v=0$) время переходного процесса t_n вычисляется по формуле, полученной интегрированием (5):

$$t_n = \frac{mv}{F_d - F_c} = \frac{mv}{ma - mg}. \quad (6)$$

5. Модульная обмотка – это однослойная, сосредоточенная, глубокопазная, с полным шагом, обмотка, имеющая один паз на полюс и фазу ($q=1$). Чтобы получить минимальное число пар полюсов ($p=1$), одноэлементная обмотка

должна иметь два элемента на фазу. Число пазов m – фазового статора определяется соотношением: $z=2pmq$. Следовательно, статор с одной парой полюсов должен иметь шесть пазов.

На рис. 2 показан а – нормальный; б – транспонированный плоский элемент модульной обмотки двигателя с осевым бегущим полем и цилиндрическим статором. Электропроводная шина 1 имеет сквозное окно 2, через которое проходит стержень трансформатора, и сквозное окно 3, в котором расположен вторичный контур – ферромагнитный бегун 7 с короткозамкнутой обмоткой. Окна 2 и 3 соединены между собой прямым 4 или винтовым пазом 5', благодаря которому индуктируемый ток 6 рис.2-б транспонируется; 8 – ферромагнитная шайба цилиндрического статора, 9 – ребра охлаждения.

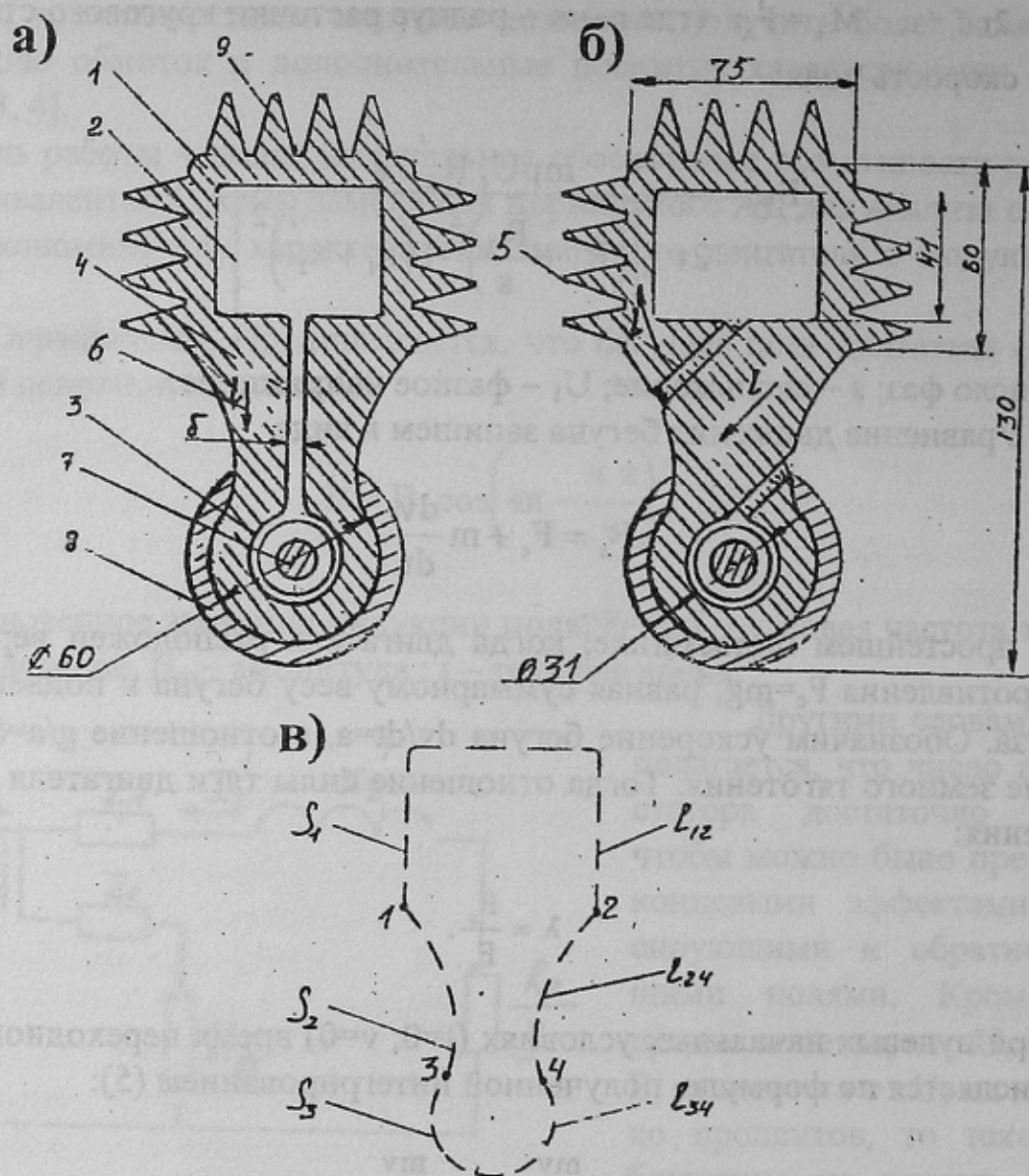


Рисунок 2 – Элементы модульной обмотки двигателя

Разъемные сердечники трех однофазных трансформаторов, были изготовлены из листовой электротехнической стали (толщиной 0,3 мм, шириной 40 мм, сечение магнитопровода $4 \times 3 = 12 \text{ см}^2$, длина магнитопровода по средней магнитной линии $l_c \cong 40 \text{ мм}$. Число витков первичной обмотки трансформатора $W=400$, провод медный, сечением 2 мм^2 , коэффициент трансформации $K=W_1/W_2 = 400/1=400$. Внешние размеры трансформатора с обмоткой: $h=220 \text{ мм}$; $b=70 \text{ мм}$; $r=130 \text{ мм}$.

Модульный элемент – алюминиевая полоса $5 \times 70 \times 130 \text{ мм}^3$, окна бегуна $2r=31 \text{ мм}$, диаметр ферромагнитного тела бегуна – 25 мм. Толщина алюминиевой обмотки 2 мм, воздушный зазор $\sim 1 \text{ мм}$.

Расчетное сопротивление модуля (см. рис.2-в)

$$R_M \cong X_M = R_{12} + 2R_{23} + R_{34} = \rho \left(\frac{l_{12}}{s_{12}} + 2 \frac{l_{23}}{s_{23}} + \frac{l_{34}}{s_{34}} \right) \approx 0,8 \times 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Коэффициент передачи напряжения $K_M = \frac{R_{34}}{R_M} \cong 0,8$ ЭДС, индуктированная в трансформаторной части модуля $E_{12} \cong 0,5 \text{ В}$. Напряжение между точками 3 и 4 модуля $U_{34} = K_M E_{12} = 0,4 \text{ В}$.

Ток модуля: $I_M = E_{12}/Z_M = 1,4 \text{ кА}$; где $Z_M = \sqrt{2} R_M = 0,35 \times 10^{-6} \text{ Ом}$.

Полное сопротивление всех модулей на фазу

$$Z_{M\Phi} = Z_M/n = \frac{0,35}{6} 10^{-3} = 0,06 \times 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление бегуна и модуля на фазу $Z_{БМ} = 6,8 \times 10^5 \text{ Ом}$.

6. Экспериментальные исследования. Линейный асинхронный двигатель располагался вертикально на подъем груза и возбуждался от трехфазного регулятора напряжения. Выполнялись три опыта: опыт холостого хода 1 (бегун удален из статора) $U=30 \text{ В}$, $I=7,8 \text{ А}$, $P=105 \text{ Вт}$, $E_2=0,02 \text{ В}$; опыт холостого хода 2 (бегун с разомкнутой обмоткой) $U=30 \text{ В}$, $I=2,75 \text{ А}$, $P=56 \text{ Вт}$ и опыт короткого замыкания (скорость бегуна $V_2=0$) $U=30 \text{ В}$, $I=4,5 \text{ А}$, $P=107 \text{ Вт}$. Исследовалось распределение индукции поля в воздушном зазоре статора. В режиме $F_g = F_c$, бегун "плавал" в магнитном поле статора. Для измерения скорости бегуна использовался электронный секундомер с разрешающей способностью 10^{-3} с . В цепь секундомера были включены конечные выключатели, управляемые положением бегуна. Секундомер измерял время t , в течение которого бегун проходил путь $l_6 = 12 \text{ см}$. Средняя скорость и ускорение бегуна в режиме $t \gg t_n$ вычислялось по формуле:

$$v = l_0/t ; \quad a = v^2/2l_0. \quad (7)$$

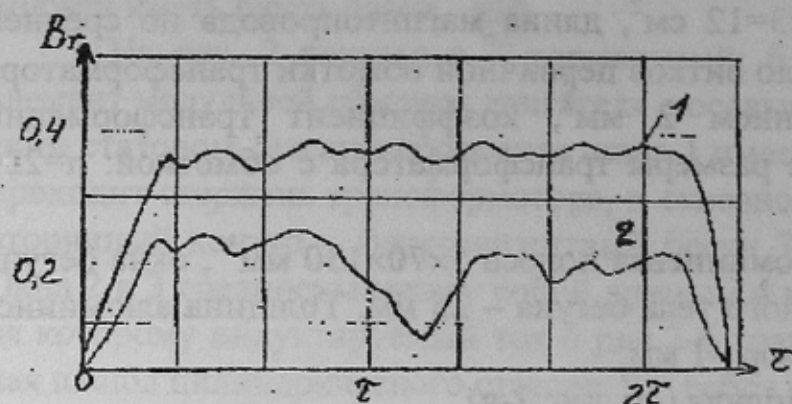


Рисунок 3 – Распределение индукции магнитного поля в воздушном зазоре

На рис.3 показана функция распределения индукции магнитного поля в воздушном зазоре статора для двух схем включения модуля одной фазы: нормальное включение модулей (А, В, С) – кривая 1 и включение модулей с транспонированной средней фазой (А, В, С) – кривая 2. Из графиков следует, что транспонирование фазы позволяет улучшить качество бегущего поля, т.е.

получить более равномерное распределение поля, что повышает эффективность работы двигателя.

Таблица 1 – Экспериментальные параметры эквивалентной схемы замещения двигателя с модульной обмоткой

Z_{X1}	R_{X1}	X_{X1}	Z_0	R_0	X_0	Z_k	R_k
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
10,9	3,97	10,15	7,09	2,24	6,75	14,85	12,6

Окончание табл.1.

X_k'	R_2'	X_2'	R_1	X_1	F
Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Н
8,02	10,8	4,59	1,73	3,43	53

Таблица 2 – Зависимость электромагнитной силы от скольжения

S	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Fэм(S),кг	0	1,06	2,12	3,18	4,24	5,2

Таблица 3 – Динамические характеристики линейного асинхронного двигателя. Фазное напряжение 30 В, ход бегуна (база) 120 мм

F_c	t	V	S	t_{Π}	F_d	ΔF	m	a
кг	с	м/с	-	с	кг	кг	кгс ² /М	м/с ²
4,2	∞	0	1,0	∞	4,2	0	0,43	0
3,3	0,30	0,40	0,92	0,17	4,1	0,8	0,34	2,4
2,3	0,18	0,67	0,87	0,10	4,0	1,7	0,24	7,1
1,6	0,19	0,92	0,81	0,06	3,9	2,3	0,163	14,7

Действующее значение индукции поля вычислялось по формуле:

$$B = U_k / 4,44 W_k f S_k,$$

где U_k – эдс, индуцированная полем в измерительной катушке $W_k = 50$; f – частота тока; S_k – средняя площадь катушки.

Некоторые результаты экспериментальных исследований линейного

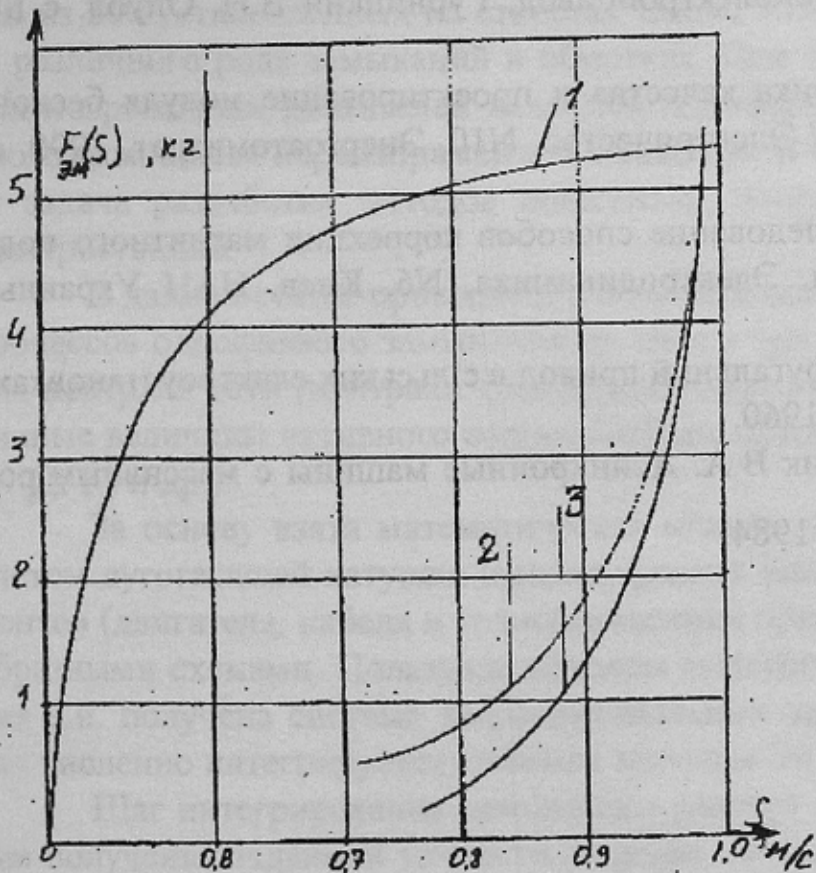


Рисунок 4 – Характеристики линейного двигателя с модульной обмоткой

двигателя с модульной обмоткой приведены на рис.4. Кривая 1 изображает зависимость электромагнитной силы от скольжения. Кривая 2 представляет зависимость тягового усилия двигателя от скольжения $1 \geq S \geq 0,75$; при фазном напряжении на входе 50 В. Для сопоставления результатов опытов показана тяговая характеристика линейного асинхронного двигателя с катушечной обмоткой, взятая из [5] и приведенная к напряжению 50 В (кривая 3).

Двигатель с модульной обмоткой обладает рядом преимуществ: технологичностью, высокой надежностью, долговечно-

стью, компактностью, высокой механической и тепловой прочностью. Его стоимость практически определяется стоимостью согласующего с сетью понижающего трансформатора, а удельная мощность в импульсе может превышать 100 кг силы на кг веса. Механическая характеристика $F(S)$ модульного двигателя несколько "лучше" аналогичного двигателя с катушечной обмоткой, что объясняется меньшим коэффициентом рассеяния поля модульной обмотки, ее высоким коэффициентом заполнения, компактностью.

Заключение

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования схемы замещения нормального АД для анализа линейного трансформаторного двигателя с модульной обмоткой.

2. Некоторые результаты работы могут быть использованы при проектировании линейных модульных двигателей для технологических систем с жидкометаллическим контуром.

Список литературы

1. Акцепторная заявка Великобритании N 1329205, КЛ МО – 2к 41 02, 19737
2. АС N639098 (СССР). Электропривод, Гурницкий В.Н. Оpubл. с БИ N47, 1978.
3. Пивоваров Л.В. Оценка качества и проектирование модуля бесконтактной трехфазной обмотки. / Электричество, N10, Энергоатомиздат, 1990, с. 19-26.
4. Пивоваров Л.В. Исследование способов коррекции магнитного поля линейного индуктора. / Техн. Электродинамика, N6, Киев, НАН Украины, 1994, с. 10-14.
5. Квачев Г.С. Магнітофугальний привод в сільських електроустановках. – Київ: Видавництво УАСГН, 1960.
6. Лищенко А.И., Лесник В.А. Асинхронные машины с массивным ротором. – Киев: Наукова думка, 1984.

Линейный индуктор с модульной обмоткой. Технические характеристики, высокая надежность, компактность.

Рисунок 4 – Характеристика линейного двигателя с модульной обмоткой