

Моделирование электромеханических тяговых характеристик линейного асинхронного двигателя с фазным бегуном

В статье представлен коаксиально-линейный асинхронный двигатель с фазным вторичным элементом (КЛАД-Ф-ВЭ), который находит широкое применение в современном автоматизированном электроприводе в сельскохозяйственном производстве (измельчители и дробилки кормов, соломосилосорезки и др.) Предложен стенд для испытания КЛАД-Ф-ВЭ и определения электромеханических тяговых характеристик в заторможенном режиме. Разработана математическая модель КЛАД-Ф-ВЭ в виде схемы замещения с учетом влияния “краевого эффекта” на тяговые характеристики. Получено математическое выражение электромагнитного тягового усилия, развиваемого КЛАД-Ф-ВЭ на основании разработанной схемы замещения двигателя в заторможенном режиме. В результате теоретических и экспериментальных данных, представленных в данной работе, получены электромеханические тяговые характеристики.

линейный асинхронный двигатель (ЛАД), электромеханические тяговые характеристики, фазный бегун, магнитная индукция

Введение. Линейные асинхронные двигатели, за счет особенностей своей конструкции, характеристик и относительной простоты и дешевизны, нашли широкое использование в исполнительных механизмах сельскохозяйственного производства (соломосилосорезки РСС-6,0 с электродвигателем Л02-52-4, измельчители кормов с электродвигателем А02-71-4, дробилки кормов КДУ-2 с электродвигателем А02-72-4 и др.) и проч., которые нуждаются в линейном перемещении с необходимой величиной и законом изменения тягового усилия. Электроприводы, в состав которых входят линейные электродвигатели (ЛЭД), в состоянии, на основе достижений электроники и микропроцессорной техники, решать задачи автоматизации производственных процессов в сельском хозяйстве. Электрификация промышленности, транспорта, сельского хозяйства и быта населения, обуславливает необходимость применения разнообразного электрического оборудования. Одним из основных видов этого оборудования являются линейные асинхронные двигатели.

Анализ результатов исследований позволил прийти к выводам, что существующие математические модели линейных асинхронных двигателей не позволяют адекватно описывать процессы в них из-за невозможности устранить влияние краевого эффекта, который возникает вследствие конструктивных особенностей двигателей данного типа. Поэтому направление исследований следует считать актуальным.

Анализируя существующие виды линейных асинхронных двигателей [1,2,3,4,5], надо отметить, что практически не исследованы коаксиально-линейные асинхронные электродвигатели с фазным вторичным элементом (бегуном) (КЛАД-Ф-ВЭ). Из-за конструктивных особенностей линейного асинхронного двигателя магнитная система ЛАД имеет разрыв на краях магнитопровода статора, который вызывает несимметрию токов во вторичном контуре (бегуне) [8]. Это явление назвали "краевым эффектом"

[1,2,3,4,6]. "Краевой эффект" отрицательно действует на энергетические параметры ЛАД [9]. Экспериментальные исследования ЛАД в двигательном режиме показали низкий коэффициент полезного действия, не превышающий 50% [2,3,8].

Было предложено ряд методов по ослаблению влияния "краевого эффекта" на энергетические параметры ЛАД, например: увеличение числа пар полюсов, воздушного зазора между индуктором статора и вторичным элементом, сопротивления во вторичном контуре двигателя, а также применение компенсационных обмоток [1,3,4,7]. На практике эти методы по устранению влияния "краевого эффекта" на энергетические параметры ЛАД не были реализованы в полной мере из-за сложности технического решения при построении стендов для испытания ЛАД и самих двигателей [2,3].

Предложенные методики и стенды для испытания ЛАД недостаточно эффективны. Например, стенды в дисковом исполнении вторичного элемента ЛАД со сплошным токовым слоем вносят погрешность при определении параметров электромеханических характеристик из-за неравномерного распределения тангенциальных и радиальных усилий по радиусу вращающегося диска ВЭ [2,3,4]. Стенды для испытания ЛАД [8] с кусочно-линейным бегом, замкнутым в бесконечную цепь, электрический контур которого выполнен в виде короткозамкнутой "лестничной клетки", также имеют недостатки. Испытания ЛАД на данном стенде показали, что полученные электромеханические тяговые характеристики имеют провал в зоне скольжения $s=0.5$. Это явление также обусловлено конструктивными особенностями магнитопроводов статора и бегуна, а именно разрывом как в первичном, так и во вторичном контуре магнитной цепи, которая явно влияет на несимметрию токов в бегуне [7,8,9].

В работе [10] были предложены модели и методы косвенного определения электромеханических тяговых и рабочих характеристик ЛАД. Построение электромеханических тяговых и рабочих характеристик ЛАД осуществлялось по результатам статических испытаний путем помещения ВЭ в индуктор двигателя с различными сопротивлениями вторичного контура. За основу данной математической модели была принята эквивалентная схема замещения ЛАД, на основе которой было получено выражение электромеханической тяговой характеристики $F=f(V)$:

$$F_i = \frac{mI^2 21 (R_{эмi} + R_{KF_i})}{2\tau f_H} \quad (1)$$

Однако эта математическая модель и предложенный стенд для испытания ЛАД [10] не дали полной картины физического процесса работы двигателя при получении электромеханических тяговых характеристик ЛАД и его энергетических параметров, так как не было возможности при определении параметров электромеханических характеристик ЛАД устранить несимметрию токов во вторичном контуре, т.е. влияние "краевого эффекта".

Таким образом, с целью улучшения методики расчета электромеханических характеристик и энергетических параметров ЛАД следует провести исследования по усовершенствованию математической модели, учитывающей влияние "краевого эффекта" на электромеханические характеристики (а также ослабление влияния его на энергетические параметры двигателя) и по усовершенствованию стенда для испытания линейного асинхронного электродвигателя.

Теоретические и экспериментальные исследования. Для усовершенствования математической модели работы ЛАД и методики испытания двигателя в качестве объекта испытания предлагается коаксиально-линейный асинхронный двигатель с фазным бегом [11], конструктивные особенности которого позволяют изменять

сопротивление во вторичном контуре в широком диапазоне и регулировать фазные токи в нем.

На рис.1 представлена физическая модель коаксиально-линейного асинхронного электродвигателя (КЛАД-Ф-ВЭ), который состоит из статора (индуктора) 1 и вторичного элемента (бегуна) 4, а на рис.2 схематично изображен коаксиально-линейный асинхронный электродвигатель с фазным вторичным элементом (бегуном). Индуктор состоит из: магнитопровода статора 2, выполненного из электротехнической стали; трехфазной обмотки 3, выполненной в виде катушек и уложенной в пазовую полость индуктора, а также клеммной колодки статора 4. Бегун (вторичный элемент) состоит из: магнитопровода 5, выполненного из стали в виде цилиндрического стержня 6; трехфазной обмотки 7, изготовленной в виде катушек и помещенных в пазовую полость, а также клеммной колодки (бегуна) 8. Конструктивные и электромеханические параметры КЛАД-Ф-ВЭ представлены в табл. 1.

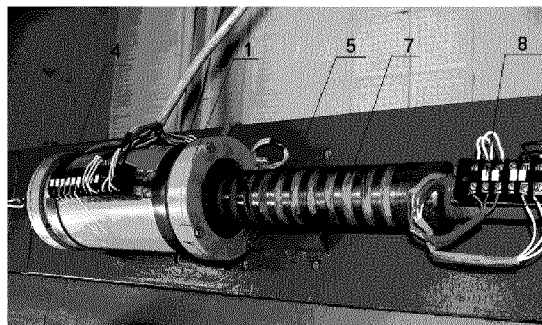


Рисунок 1 - Коаксиально-линейный асинхронный электродвигатель с фазным вторичным элементом (бегуном)

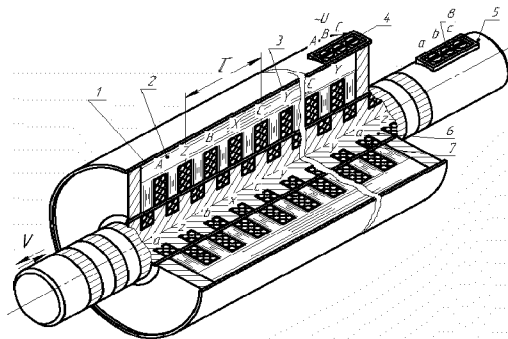


Рисунок.2 - Схематическое изображение коаксиально-линейного асинхронного электродвигателя с фазным вторичным элементом (бегуном).

Таблица 1 - Конструктивные и электромеханические параметры КЛАД Ф-ВЭ

№	Наименование параметров	Обозначение	Значение	Ед. измерения
1.	Номинальная мощность	P_2	1.5	КВт
2.	Подведенное напряжение	U_{ϕ}	127	В
3.	Частота сети	f	50	Гц
4.	Пусковой ток	$I_{п}$	10	А
5.	Электромагнитное тяговое усилие	$F_{эм}$	300	Н
6.	Масса статора	m_1	19.2	Кг
7.	Масса бегуна	m_2	13.6	Кг

Продовження таблиці 1

8.	Немагнитний зазор	δ	2.5	Мм
9.	Полюсное деление	τ	0,063	М
10.	Количество витков в фазе статорной обмотки	W_1	80	ВИТКОВ
11.	Количество витков в фазной части обмотки бегуна	W_2	200	ВИТКОВ
12.	Сечение проводника в статорной обмотке	$\Delta S_{ст}$	1.12	мм ²
13.	Сечение проводника в фазной обмотке бегуна	$\Delta S_{фч}$	0.69	мм ²

Коаксиально-линейный асинхронный электродвигатель работает следующим образом. При подаче переменного тока на обмотку статора 3 возникает магнитный поток, который своими магнитными силовыми линиями пересекает обмотки вторичного элемента (бегуна) 5, создавая при этом в контуре индукционный ток, а следовательно, и магнитный поток. В результате потокосцепления двух магнитных потоков статора и бегуна создается электромагнитное тяговое усилие F , которое воздействует на бегун со скоростью V_1 . Скорость перемещения бегуна V при этом отстает на скольжение s :

$$V = V_1(1-s), \quad (2)$$

где $V = 2\tau f$ - скорость бегущего магнитного поля статора, м/с;

τ - полюсное деление, м;

f - частота питания сети, Гц;

s - скольжение.

В работе [8] предложена математическая модель, которая учитывает несимметрию токов во вторичном контуре при непрерывном перемещении бегуна. Эта математическая модель представлена в виде схемы замещения линейного асинхронного электродвигателя на рис.3.

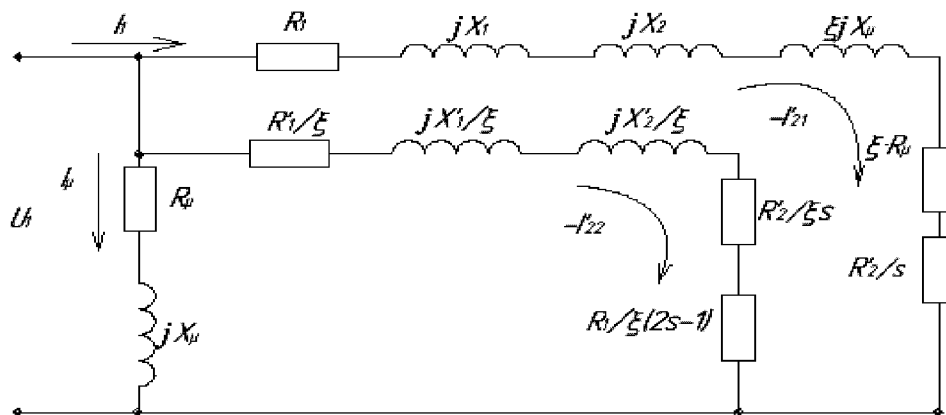


Рисунок 3 - Схема замещения линейного асинхронного электродвигателя

На основании схемы замещения (рис.3) было предложено математическое выражение электромагнитного тягового усилия, развиваемого ЛАД :

$$F_{em} = \frac{m_1 U_1^2 R_2' / s}{V_1 ((R_1 + R_2' / s + \xi R_\mu)^2 + (X_1 + X_2' + \xi X_\mu)^2)} + \xi \frac{m_1 U_1^2 (R_2' / s + R_1 / (2s - 1))}{V_1 ((R_1 + R_2' / s + R_1 / (2s - 1))^2 + (X_1 + X_2')^2)}, \quad (3)$$

где m_1 - число фаз;

U_1 - подводимое напряжение, В;

R_1 - активное сопротивление обмотки индуктора (статора), Ом;

R_2' - приведенное сопротивление вторичного контура (бегуна);

X_1 - индуктивное сопротивление индуктора (статора), Ом;

X_2' - приведенное сопротивление вторичного контура, Ом;

X_μ - индуктивное сопротивление намагничивающего контура, Ом;

R_μ - активное сопротивление намагничивающего контура, Ом;

ξ - коэффициент несимметрии вторичного контура $\xi = f/2p$;

где p - число пар полюсов.

Данное выражение (3) описывает математическую модель электромеханической тяговой характеристики работы ЛАД при работе машины в двигательном режиме, т.е. при непрерывном перемещении бегуна $F=f(s)$. Такая модель недостаточно эффективна при определении параметров электромеханических тяговых характеристик экспериментальным путем из-за сложности изготовления стенда, как это отмечалось в работах [3,4,8,10]. Если конструктивные особенности КЛАД-Ф-ВЭ (см.рис.1,2) позволяют подключать дополнительные сопротивления и регулировать добавочное сопротивление в широких диапазонах, то в этом двигателе используется методика [10] по снятию электромеханических характеристик косвенным путем, то есть в заторможенном режиме. Предлагается математическая модель, которая представлена в виде схемы замещения линейного асинхронного электродвигателя с фазным вторичным элементом (бегуном) в заторможенном режиме (рис.4).

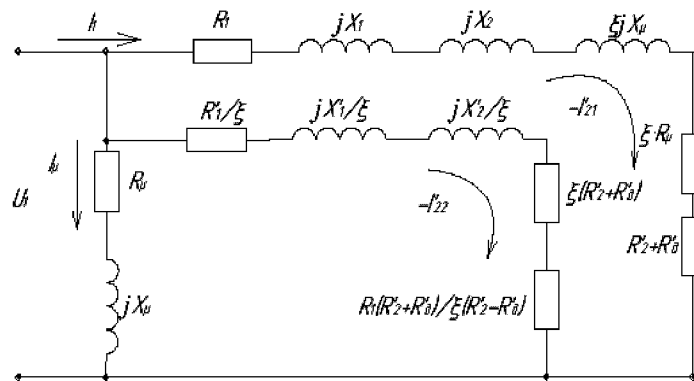


Рисунок 4 - Эквивалентная схема замещения линейного асинхронного электродвигателя в заторможенном режиме

Здесь выражение $\frac{R_2'}{R_2' + R_0'}$ отражает величину скольжения s , а R_0' -

приведенное добавочное сопротивление, включенное во вторичный контур бегуна, Ом. Тогда выражение электромагнитной тяговой характеристики коаксиально-линейного асинхронного электродвигателя с фазным вторичным элементом (бегуном) примет вид:

$$F = \frac{m_1 U_1^2 R_2' + R_\partial'}{V_1 \left(R_1 + R_2' + R_\partial' + \xi R_\mu \right)^2 + \left(X_1 + X_2' + \xi X_\mu \right)^2} + \frac{m_1 U_1^2 \left(R_2' + R_\partial' + \frac{R_1 (R_2' + R_\partial')}{(R_2' - R_\partial')} \right)}{\xi V_1 \left(R_1 + R_2' + R_\partial' + \frac{R_1 (R_2' + R_\partial')}{(R_2' - R_\partial')} \right)^2 + \left(X_1 + X_2' \right)^2} \quad (4)$$

Схема замещения на основании вышеизложенного примет следующий вид (рис. 5).

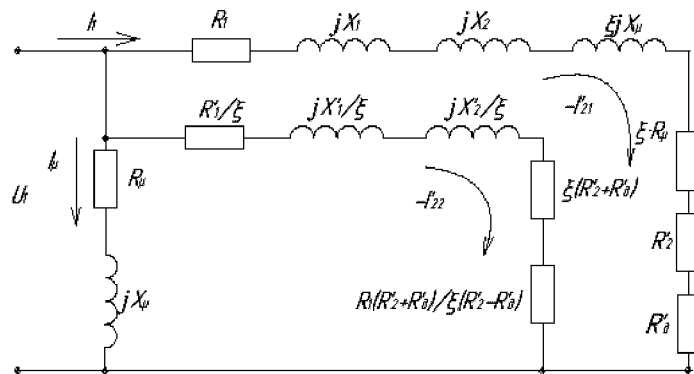


Рисунок 5 - Эквивалентная схема замещения КЛАД-Ф-ВЭ

График зависимости электро-механической тяговой характеристики коаксиально-линейного асинхронного двигателя $s=f(F_{эм}^*)$ представлен на рис.6 в относительных единицах. Здесь $F_{эм}^* = F_{эм}/F_H$.

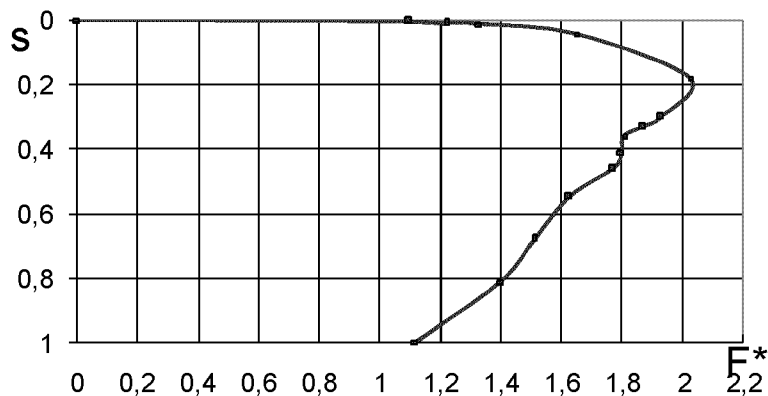


Рисунок 6 - Электро-механические тяговые характеристики $s=f(F_{эм}^*)$ ЛАД

Методика экспериментальных исследований. Стенд для испытания коаксиально-линейного асинхронного двигателя с фазным вторичным элементом для определения параметров электро-механических тяговых характеристик представлен на рис.7.

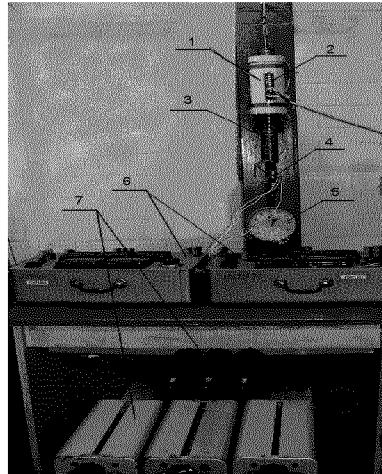


Рисунок 7 - Стенд для испытания коаксиально-линейного асинхронного электродвигателя с фазным вторичным элементом (бегуном)

На рис.8 изображена блок-схема электрическая испытательного стенда для контроля параметра электромеханических тяговых характеристик коаксиально-линейного асинхронного электродвигателя с фазным вторичным элементом (бегуном). Стенд и блок-схема электрическая для испытания КЛАД Ф-ВЭ (рис.7, 8) включает: коаксиально-линейный асинхронный двигатель с фазным вторичным элементом 1; автотрансформатор (АТр); комплект измерительных приборов К-51(б); статор КЛАД-Ф-ВЭ, на котором закреплена клеммная колодка (ABC) 2; бегун ВЭ 3, на котором закреплена клеммная колодка (abc) 4, а также автоматические выключатели SQ1, SQ2, SQ3; динамометр для контроля усилия, развиваемого двигателем F, кгс 5; дополнительное сопротивление $R_{д1} \dots R_{ди}$ Ом 7; противовес m , кг. С целью получения электромеханических тяговых характеристик двигателя $V=f(F)$, $s=f(F^*)$ изменяем сопротивление во вторичном контуре (бегуна) за счет включения дополнительного сопротивления $R_{д1}$, $R_{ди}$, при этом фиксируем показания приборов и заносим их данные в таблицу 2. Корректировка несимметрии токов во вторичном контуре осуществлялась за счет изменения сопротивления в фазах (бегуна).

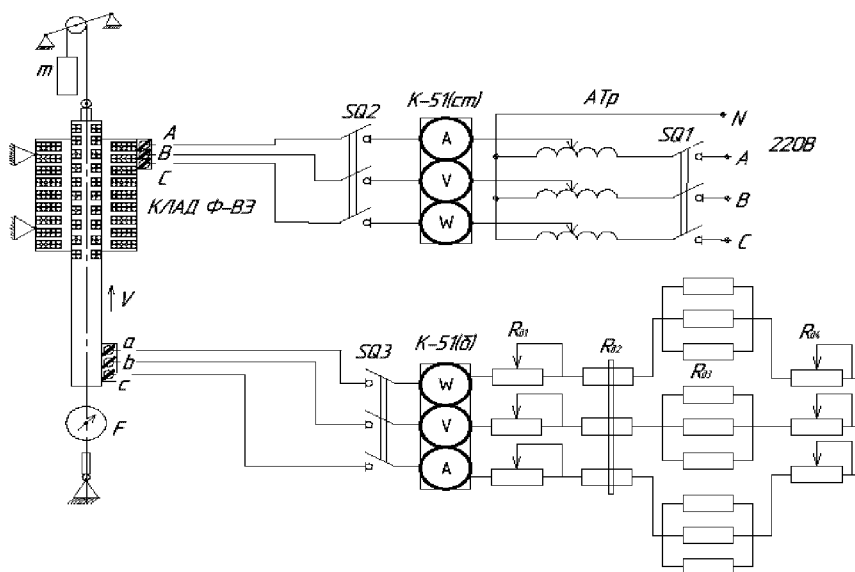


Рисунок 8 - Блок-схема электрическая стенда для испытания коаксиально-линейного асинхронного электродвигателя с фазным вторичным элементом (бегуном)

Таблица 2 – Экспериментальные данные КЛАД-Ф-ВЭ

№ п/п	Электрические параметры вторичного контура (бегуна)				Электрические параметры статора			Показания динамометра
	$R_{д}, \text{Ом}$	$U_{ф}, \text{В}$	$I_{ф}, \text{А}$	$P_{ф}, \text{Вт}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$F, \text{кгс}$
1	6,30	6,00	5,20	30,00	212	15,50	3000	11,00
2	7,10	11,40	5,00	56,00	212	15,20	3200	14,00
3	9,90	19,40	4,60	89,00	214	14,70	3200	15,00
4	11,70	27,00	4,30	112,00	214	13,70	3200	16,00
5	13,50	35,00	4,00	140,00	216	13,50	3200	17,50
6	15,30	39,50	3,60	145,00	214	13,00	3100	18,00
7	17,10	44,00	3,50	150,00	214	12,50	3100	18,00
8	18,90	47,50	3,30	155,00	214	12,50	3000	18,50
9	20,70	52,50	3,10	162,50	214	12,00	3000	18,50
10	33,20	71,50	2,40	167,50	216	11,75	2800	19,00
11	773,20	95,00	2,20	150,00	216	10,75	2400	16,00
12	1 513,20	110,00	0,21	20,00	216	9,25	2100	13,00
13	2 253,20	110,50	0,14	15,00	216	9,00	2100	12,00
14	2 993,20	111,00	0,07	8,00	218	9,00	2000	11,00

Для построения электромеханической тяговой характеристики $V=f(F)$, $s=f(F^*)$ используем экспериментальные данные КЛАД-Ф-ВЭ (табл.2). Выражение, определяющее электромагнитное тяговое усилие, вычисляется по формуле $F=F_{дин} \cdot g, \text{Н}$, где $F_{дин}$ - показания динамометра, кгс; g - ускорение свободного падения, м/с^2 ; $s=R_2'/(R_2+R_0)$ - скольжение; $V=V_1(1-s)$ - скорость перемещения бегуна, м/с ; $V_1=2\tau f$ м/с - скорость бегущего магнитного поля статора КЛАД-Ф-ВЭ, τ - полюсное деление, м ; f - частота сети, Гц. Расчетные параметры электромеханических тяговых характеристик занесены в табл. 3.

Таблица 3 - Расчетные данные параметров электромеханической характеристики

s	1.00	0.87	0.63	0.53	0.46	0.41	0.36	0.33	0.30	0.18	0.043	0.004	0.0027	0.0021
$V, \text{м/с}$	0	0.01	0.08	0.21	0.46	0.86	1.45	2.27	3.40	4.86	5.92	5.97	6.00	6.01
$F, \text{Н}$	110	140	150	160	175	180	180	185	185	190	160	130	120	110

На основании полученных экспериментальных данных КЛАД-Ф-ВЭ, электромеханические тяговые характеристики зависимости $V=f(F)$ предоставлены на рис.9.

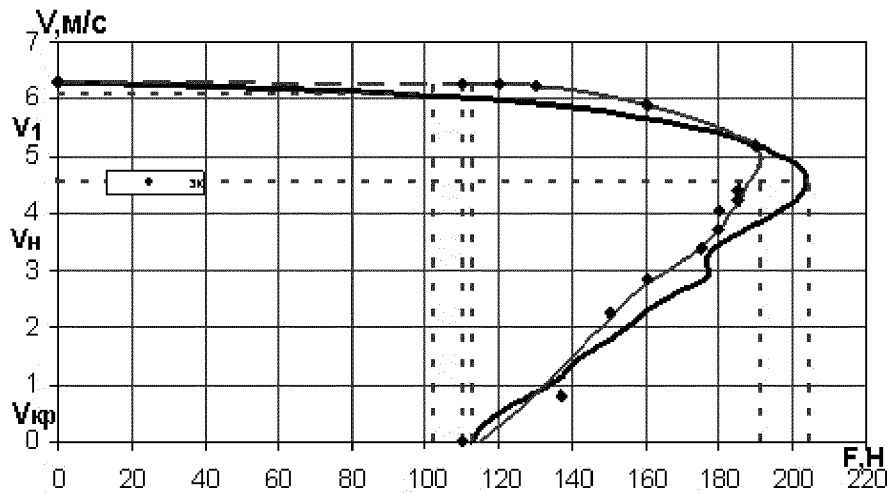


Рисунок 9 - Электромеханическая тяговая характеристика $V=f(F)$ КЛАД-Ф-ВЭ

Здесь $F_{п}$ - пусковое тяговое усилие, развиваемое двигателем, Н; F_{max} - максимальное тяговое усилие, Н; $F_{(с)н}$ - номинальное тяговое усилие, Н; V_1 - скорость бегущего магнитного поля, м/с; $V_{н}$ - номинальная скорость двигателя, м/с; $V_{кр}$ - критическая скорость двигателя, м/с. В относительных единицах электромеханическая тяговая характеристика $s=f(F^*)$ представлена на рис.10. Здесь $s=R_2'/(R_2'+R_0')$ - скольжение; $F^*=F_{эм}/F_{(с)н}$ - тяговое усилие в относительных единицах.

Среднее значение сходимости параметров электромеханической тяговой характеристики $F_{ср}^*$ в относительных единицах определяется из выражения (5) и табл. 4.

$$F_{ср}^* = \frac{\sum_i F_{0i}^*}{i} \quad (5)$$

Здесь $F_{0i}^* = ((F_{тi} - F_{эi}) / F_{тi}) * 100 \%$ - сходимость параметров электромеханической тяговой характеристики в относительных единицах в i -той точке. На основании теоретических и экспериментальных исследований КЛАД-Ф-ВЭ, (см. табл.4 и рис. 9,10) сходимость составляет 4,28 %.

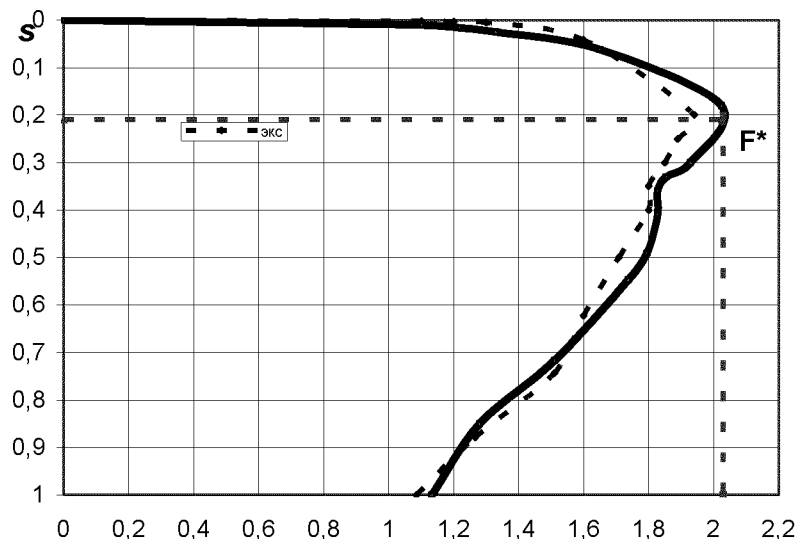


Рисунок 10 - Электромеханическая тяговая характеристика $s=f(F^*)$ КЛАД-Ф-ВЭ в относительных единицах

Таблица 4 - Теоретические и экспериментальные параметры электромеханической тяговой характеристики КЛАД-Ф-ВЭ.

$F_э, Н$	110	136,8	150	160	175	180	180	185	185	190	160	130	0
$F_т, Н$	112,8	134,2	160	177,4	181	189	190	201	203	189	165	128	0
$V_{i}, м/с$	0	0,8	2,25	2,85	3,4	3,7	4,08	4,2	4,4	5,1	5,9	6,23	6,3
F_{0i}^*	2.48	1.93	6.25	9.80	3.31	4.76	5.26	7.96	8.86	0.52	3.03	1.56	0

Выводы. Впервые разработан коаксиально-линейный асинхронный двигатель с фазным вторичным элементом (КЛАД-Ф-ВЭ). Разработан стенд для испытания КЛАД-Ф-ВЭ и определения электромеханических тяговых характеристик в заторможенном режиме. Разработана математическая модель КЛАД-Ф-ВЭ в виде схемы замещения с учетом влияния “краевого эффекта” на тяговые характеристики, т.е. на симметрию

токов вторичного контура двигателя. Получено математическое выражение электромагнитного тягового усилия, развиваемого КЛАД-Ф-ВЭ на основании разработанной схемы замещения двигателя в заторможенном режиме. В результате теоретических и экспериментальных данных, представленных в данной работе, получены электромеханические тяговые характеристики, сходимость которых составляет 4,28 %.

Список литературы

1. Лейтвейт Е.Р., Насар С.А. Электрические машины с поступательным движением, 1970. Т.58 №4.– С.18-30.
2. Ижеля Г.М., Ребров С.А., Шаповаленко А.Г. Линейные асинхронные двигатели. К.: Техника, 1975. - 136с.
3. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей: Пер. с англ.: - Л.: Энергоатомиздат. Ленинград отделение, 1983. -180с. ил.
4. Веселовский О.Н. и др. Линейные асинхронные двигатели О.М. Веселовский, А.Ю. Коняев, Ф.Н. Сарапулов.- М.: Энергоатомиздат, 1991. -256с.: ил.
5. Шинкаренко В.Ф., Основи теорії еволюції електромеханічних систем. – К.: Наукова думка. 2002. - 288с.: ил.
6. Вилтис А.Я., Дриц М.С., Концевой эффект в линейных асинхронных двигателях. Задачи и методы решения. – Рига: Зинатис., 1981. -208с.
7. Голенков Г.М., Несиметрія режимів роботи лінійних асинхронних двигунів. /Наука і техніка в міському господарстві. Вип.24.-К.; Будівельник, 1973.- С. 13-18.
8. Голенков Г.М., Разработка и исследование линейного асинхронного электродвигателя для привода строительных машин. Автореферат на соискателя ученой степени кандидата технических наук. Институт электродинамики АН УССР. Киев, 1984.-21с.
9. Костенко М. П., Пиотровский А.М., Электрические машины. Ч.2, – Машины переменного тока. Учебник для студентов высших тех. учеб. заведений. Вид. 3-е перераб. Л."Энергия", 1978. - 648с.
10. Попков В.С., Титаренко В.П., Федоров А.П., Шинкаренко В.Ф. Методы косвенного определения рабочих характеристик линейных асинхронных двигателей по результатам статических испытаний. /Научно-технический реферативный сборник. Электротехническая промышленность Электрические машины. –М.: 1981. – Выпуск 10(128) – С.1-3.
11. Патент на корисну модель №23757 Богаенко Е.М., Богаенко М.В., Веремієнко А.В., Голенков Г.М., Попков В.С., Україна Оpubліковано від 11.06.2007р. Бюл.№8. Електродвигун зворотньо-поступового руху.

А. Веремієнко

Моделювання електромеханічних тягових характеристик лінійного асинхронного двигуна з фазним бігуном

У статті представлений коаксіально-лінійний асинхронний двигун з фазним вторинним елементом (КЛАД-Ф-ВЕ), який знаходить широке вживання в сучасному автоматизованому електроприводі в сільськогосподарському виробництві (подрібнення і дробарки кормів, соломосилосорізки і ін.) Запропонований стенд для випробування КЛАД-Ф-ВЕ і визначення електромеханічних тягових характеристик в загальмованому режимі. Розроблена математична модель КЛАД-Ф-ВЕ у вигляді схеми заміщення з врахуванням впливу "краєвого ефекту" на тягові характеристики. Отримано математичне вираження електромагнітного тягового зусилля, КЛАД-Ф-ВЕ, що розвивається, на підставі розробленої схеми заміщення двигуна в загальмованому режимі. В результаті теоретичних і експериментальних даних, представлених в даній роботі, отримані електромеханічні тягові характеристики

А. Veremeenko

Design of electro mechanics hauling descriptions of linear asynchronous engine with a phase runner

In the article presented coaxially-linear asynchronous engine with the phase second element (KLAD-F-VE) which finds wide application in modern automated електроприводі in an agricultural production (grindings down and crushers of forages, and other) a stand is Offered for the test of KLAD-F-VE and determinations of electromechanics hauling descriptions in the put on the brakes mode. The mathematical model of KLAD-F-VE

is developed as a chart of substitution taking into account influencing of “regional effect” on hauling descriptions. Mathematical expression of electromagnetic hauling effort is got, developed KLAD-F-VE on the basis of the developed chart of substituting for an engine in the put on the brakes mode. As a result of theoretical and experimental information, presented in this work, electromechanics hauling descriptions are got

Получено 22.10.12