

УДК 621.316

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ЛІНІЙНИМ ДВИГУНОМ ДЛЯ ПАКЕТОФОРМУВАЛЬНИХ МАШИН

Л.О. Кривопляс-Володіна, кандидат технічних наук, доцент, *E-mail*: adviced26_058_02_nuft@ukr.net

О.М. Гавва, доктор технічних наук, професор, *E-mail*: gavvaoleksandr@gmail.com

С.В. Токачук, кандидат технічних наук, доцент, *E-mail*: tollserg@ukr.net

кафедра мехатроніки та пакувальної техніки

Національний університет харчових технологій вул. Володимирська 68, Київ-33, Україна, 01601

Анотація. У роботі розглянуто розрахунково-теоретичні дослідження характеристик лінійного асинхронного двигуна (ЛАД) в залежності від основних технічних та конструктивних параметрів пакетоформувальних машин. Об'єктом дослідження обрано електропривод модулів переміщення функціональних систем пакетоформувальної машини з лінійним асинхронним електродвигуном. Отримані результати розрахунково-теоретичних досліджень дають можливість уточнювати значення параметрів при проектуванні функціональних модулів переміщення з лінійним асинхронним електродвигуном. Використання у пакетоформувальній машині транспортної системи з електроприводом на базі лінійного асинхронного двигуна дає можливість спростити її кінематичну схему і підвищити показники надійності. Отримані результати можуть бути рекомендовані і для інших технологічних машин та ліній в промисловому комплексі.

Ключові слова: лінійний асинхронний двигун, конструктивні параметри, модель, раціональні значення, функціональний модуль, транспортні системи.

STUDY OF ELECTRIC DRIVE WITH LINEAR ENGINE FOR BAG-FORMING MACHINES

L. Kryvoplias-Volodina, Candidate of Technical Science, Associate Professor, *E-mail*: adviced26_058_02_nuft@ukr.net

A. Gavva, Doctor of Technical Science, Professor, *E-mail*: gavvaoleksandr@gmail.com

S. Tokarchuk, Candidate of Technical Science, Associate Professor, *E-mail*: tollserg@ukr.net

The Department of Mechatronics and Packaging Machinery

National University of food technology, Volodymyrska str. 68, Kyiv, Ukraine, 01601

Abstract. In this paper, theoretical computation study of linear induction motor characteristics are considered and performed, depending on the main technical and design parameters of bag-forming machines. The object of the study is a linear induction electric motor which is part of electric drive of bag-forming machine functional systems displacement modules.

Induction drive on the basis of the linear motor may be an alternative type of actuator and transport systems. The advantages of this system: the missing link of transmission of the tractive force, i.e. the simplification of the kinematic scheme; no rotating parts, hence improving reliability; for a more accurate speed control and positioning; use of the normal effort to unload the supporting rollers. In case of outage work on can be easily delivered to the desired location (without the clutch). A look at a new system of frequency regulation of the asynchronous engine with use of blocks of the correction and direct torque control. The control system supports the torque of the engine at a critical level, this is when the engine as a control object, is in an unstable state, and the control system they have to maintain this unstable state. As a research method we used the sequence of calculation of characteristics of a linear induction motor. The obtained results of theoretical computation study make it possible to choose parameter values for designing of functional displacement modules with linear induction motor. The use of transport system with electric drive in bag-forming machine on the basis of linear induction motor allows to simplify its kinematic scheme and to increase reliability indicators. The data obtained as a result of the studies can also be recommended for other technological machines and lines industrial complex.

Keywords: linear induction motor, design parameters, model, rational values, functional module, transport systems.

Copyright © 2015 by author and the journal "Food Science and Technology".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY). <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/fst.v11i3.614>

Введение. Формулировка проблемы

Широкое использование автоматизированного электропривода даст возможность повысить производительность труда и конкурентоспособность отечественных пакетоформирующих машин. Транспортная система внутри пакетоформирующей машины является одной из основных функциональных модулей, влияющей на её производительность. В настоящее время за счет систем управления существует возможность увеличить произво-

дительность машины в 1,5-2 раза [1,2,3], но для этого необходимо решить задачу по созданию современной транспортной системы, которая смогла бы справляться с возросшим потоком продукции. Транспортная система пакетоформирующей машины с электроприводом на базе линейного асинхронного двигателя дает возможность упростить кинематическую схему и повысить её надежность.

Литературний обзор

Электродвигатели – неперемная составляющая подъемно-транспортного и автоматизированного упаковочного оборудования: конвейеров, автоматизированных складов, штабелеров, упаковочных автоматов и другой складской техники. Обычно эти агрегаты подбирают для своего оборудования сами изготовители, но все чаще бывает так, что покупатели и владельцы машин сами могут выбирать электрические силовые агрегаты для нужд своего предприятия в зависимости, например, от специфики условий работы отдельных его участков [4]. В некоторых случаях компании комплектуют электродвигателями одного типа технику на всех своих складах и предприятиях, чтобы за счет унификации процедур и запчастей сократить расходы на техобслуживание. Иногда электродвигатели выбирают по соображениям невысокой стоимости.

В складском и подъемно-транспортном оборудовании наиболее широко применяют электродвигатели пяти типов:

- электродвигатели постоянного тока с возбуждением от постоянного магнита;
- асинхронные электродвигатели переменного тока. Их применяют в оборудовании непрерывного цикла, например, в обычных конвейерах;
- серводвигатели (сервомоторы). Они работают в машинах, которые должны совершать точные движения, перемещать и позиционировать грузы на строго определенные места: в штабелерах, автоматических складских системах и т.д.;
- линейные асинхронные двигатели. Используются в оборудовании, для которого важна прежде всего высокая скорость работы, например, в пакетформирующих машинах [5];
- мотор-ролики (или мотор-барабаны), т.е. ведущие герметичные ролики, внутри которых заключены небольшие электродвигатели и редукторы. Используются для привода конвейеров, работающих периодически.

В настоящее время машины и автоматы комплектуют асинхронными электродвигателями переменного тока, применение которых постоянно расширяется. Линейные асинхронные электродвигатели обеспечивают точность движений до 0,0335 мм на 1 м перемещения, т.е. позволяют выполнять прецизионные работы. Насколько уникальна такая способность устройств, иллюстрирует тот факт, что толщина человеческого волоса составляет около 0,09 мм, т.е. в три раза больше [6]. Скорость работы линейных асинхронных электродвигателей очень высокая – до 5 м/с, а следовательно, длительность рабочих циклов у них небольшая и производительность на высочайшем уровне. Скорость перемещения ползуна на разных отрезках в течение одного цикла можно менять, а

можно задавать пошаговое перемещение – это очень полезное качество для некоторых автоматических машин [7]. В последние годы интенсивно ведутся работы по созданию линейных двигателей, в которых бегущее магнитное поле статора непосредственно воздействует на рабочий орган механизма, совершающий поступательное или возвратно - поступательное движение. Конструкция линейного асинхронного двигателя определяется условиями его применения в конкретном рабочем механизме. По форме статора (индуктора) различают линейные двигатели плоские и цилиндрические (плоские имеют наибольшее применение); по количеству статоров – одноставторные и двухставторные, а по материалу вторичного контура (ротора) – двигатели с ферромагнитным и неферромагнитным электропроводным вторичным контуром (алюминий, медь, латунь), который выполняется в виде полосы соответствующего размера [1]. Линейные асинхронные двигатели отличаются конструктивной простотой, надёжностью, возможностью получения большого диапазона линейных скоростей и перемещений без использования сложных кинематических связей и передающих механизмов. К их достоинствам следует отнести также отсутствие электрического контакта с вторичным элементом. Эти положительные стороны ЛАД способствовали разработке и созданию большого количества линейных электроприводов различных промышленных механизмов. Удачно спроектированный линейный электродвигатель является неотъемлемой частью производственного механизма, накладывающего конкретные требования на его конструктивное исполнение. В связи с этим во многих практических случаях применение линейного электропривода требует практически новых проектных разработок всего производственного механизма. Поэтому к проектированию линейного электродвигателя следует подходить индивидуально для каждой промышленной установки с учётом её конструктивных особенностей и предъявляемых к линейному электроприводу требований. В настоящее время существует множество конструктивных разновидностей ЛАД, вызванных необходимостью разрабатывать и конструировать линейный двигатель как элемент электромеханической системы, преобразующий электрическую энергию в механическую [1-15]. Характерной особенностью плоских линейных машин является также наличие у них поперечного краевого эффекта, вызванного конечной шириной машины. Наводимые во вторичном элементе токи протекают по замкнутым кольцевидным контурам. Токи, протекающие во вторичном элементе в направлении бегущего магнитного поля или в противоположном направлении, не создают полезного усилия, направленного в сторону бегущего поля, а обуславливают только возникновение поперечных усилий. Наличие этих составляющих тока увеличивает длину линий тока, а тем самым и

сопротивление вторичного элемента, что приводит к уменьшению развиваемого усилия. Одновременно увеличивается величина электрических потерь во вторичном элементе. Исследованию поперечного краевого эффекта посвящены работы [4-7]. Одним из направлений выполненных исследований является определение рациональных областей практического применения разрабатываемых ЛАД. При промышленной частоте качественная граница между высокоскоростными и тихоходными двигателями проходит там, где полюсное деление составляет примерно 0,03 м, а синхронная скорость – 3 м/с. Большинство ЛАД промышленных установок в соответствии с требованиями технологического процесса или по условиям безопасной работы должны иметь рабочие скорости меньше 3 м/с. Это требование относится к электроприводам электротермических установок: толкателей, выталкивателей, механизмов открывания и закрывания дверей, а также отдельных механизмов гибкого автоматизированного производства (кантователей, сбрасывателей). Полюсные деления меньше 0,03 м при трехфазной обмотке и нормальной зубцово-пазовой структуре изготовить весьма трудно. Рабочие скорости движения (0,02 – 2 м/с) обеспечиваются путем снижения частоты или при работе ЛАД при больших скольжениях, (при увеличении потерь во вторичном элементе), а также путем изменения напряжения или частоты [5].

Проведенный обзор линейных электроприводов [1-15] показывает многообразие различных технических решений и предпочтительность индивидуального подхода к разработке линейных электродвигателей, т.е. двигатель должен разрабатываться для каждого конкретного промышленного механизма с учетом требований, предъявляемых к электроприводу. Только при таком решении проблемы проявляются быстродействие, минимальные массогабаритные показатели механизма, экономия материалов и электроэнергии. Важной задачей, позволяющей повысить возможность применения ЛАД в пакетформирующих машинах, является определение транспортных систем пакетформирующих модулей совместимых с ЛАД.

Целью исследования являлось усовершенствование систем внутреннего транспорта пакетформирующих машин путем применения линейного асинхронного двигателя.

Для достижения сформулированной цели поставлены следующие задачи:

1. Выполнить анализ используемых транспортных систем в пакетформирующих модулях машин для формирования укрупненных грузовых единиц.
2. Разработать компоновочную схему пакетформирующего модуля с использованием одностороннего линейного асинхронного двигателя для выполнения операций транспортирования манипулятора.

3. Обосновать выбор методики расчета характеристик линейного асинхронного двигателя (ЛАД) и на её основе выполнить анализ влияния параметров на показатели машины.

4. Выполнить расчетно-теоретические исследования характеристик ЛАД в зависимости от основных конструктивных параметров и сформулировать последовательность выбора их рациональных значений.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования являлись технико-энергетические показатели ЛАД в зависимости от технических и конструктивных параметров пакетформирующей машины.

В качестве метода исследования использовалась последовательность расчета характеристик ЛАД [8], базирующаяся на рассмотрении 3-х мерного магнитного поля в зазоре и операторы программного пакета MathCAD.

Одним из типов электропривода транспортных систем может быть асинхронный привод на базе линейного двигателя. Преимущества такой системы: отсутствие звена передачи тягового усилия, то есть упрощение кинематической схемы; отсутствие вращающихся деталей, следовательно, повышение надёжности; возможность более точного регулирования скорости и позиционирования; использование нормального усилия для разгрузки поддерживающих роликов; в случае прекращения подачи электропитания рабочий орган может быть легко доставлен в необходимое место (без муфты сцепления). Конструктивные формы исполнения ЛАД представлены в работах [8,9].

Модель соответствует двухстороннему ЛАД или одностороннему (ОЛАД) с расслоенным обратным магнитопроводом и сплошной реактивной шиной RT, состоящей из двух слоев: d_2 и d_3 (для ОЛАД $d_2/2, d_3/2$). Основные допущения, принятые при постановке задачи, в основном, являются общепринятыми для подобных задач: для сердечников индуктора $\mu_{Fe} = \infty$ и $\gamma_{Fe} = 0$, $\Delta p_{Fe} = 0$, $\delta' = \delta \cdot k\delta$, $\mu_2 = c \text{ onst}$, $\gamma_2 = \text{const}$; $\mu_3 = \text{const}$, $\gamma_3 = \text{const}$ (модель – линейная). При расчетах заданными являются ток $I_1 = \text{const}$ (или $A = \text{const}$), конструктивные параметры и физические свойства материалов. Для расчетов характеристик ОЛАД слой $d_3/2$ рассматривается как обратный массивный магнитопровод RM, при $\mu_3 = \mu_{Fe} = \text{const}$. Исходными для области зазора и реактивных шин (РШ) будут уравнения электромагнитного поля Максвелла, выраженные через векторный магнитный потенциал, решение которых выполнено методом разделения переменных; постоянные интегрирования определены из граничных условий для составляющих напряженностей электрического и магнитного полей в плоскостях $y = 0$, $y = d/2$, $y = \delta$.

Наличие массивных проводящих элементов в ЛАД (сплошные реактивные шины (РШ) и обратный магнитопровод) предопределили и методы расчета характеристик: через решение задачи о распределении электромагнитного поля в зазоре и РШ (система уравнений Максвелла). В зависимости от принятых при решении допущений, то есть степени идеализации, расчётные модели ЛАД условно делят на одномерные, двухмерные и трехмерные. Самыми точными являются трехмерные модели, в которых учитывается распределение электромагнитного поля по всем трём координатам (рис. 1). Методики расчёта характеристик, базирующиеся на этих моделях, дают наиболее достоверные результаты [10].

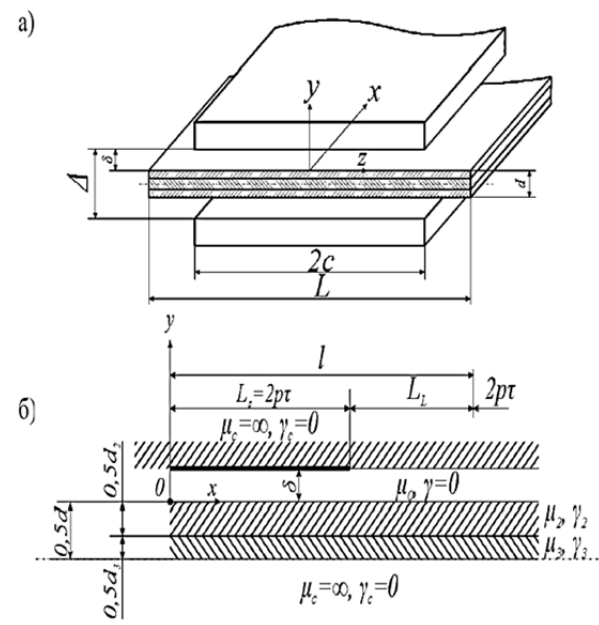


Рис. 1. Трёхмерная расчётная модель ЛАД: а) общий вид; б) вид по продольной оси.

Допущения при составлении модели:

1. Модель – линейная, то есть магнитная проницаемость стальных магнитопроводов или постоянная ($\mu_3 = \text{const}$ для сплошного ОМ) или $\mu_1 \gg \mu_0$ (для расслоенного сердечника индуктора).
2. Распределение обмотки не учитывается, рассматривается структура без пазов с бегущей синусоидальной волной линейной плотности тока. Наличие пазов учитывается с помощью коэффициента Картера, $\delta' = \delta K\delta$
3. Краевые эффекты в продольном и поперечном направлениях учтены конечностью намагничивающих сил, но не сердечников. Концевой эффект при скоростях до 3 м/с (число Рейнольдса $Ec_0 < 5$) возможно не учитывать [10,11].
4. Решение задачи в большинстве известных методик проводится при постоянстве тока в обмотке $I_1 = \text{const}$. Очевидно, что в этом случае решается так называемая внутренняя задача, характеризую-

ющая только процессы в зазоре и вторичной структуре. При этом напряжение питания будет изменяться в зависимости от скольжения s и характеристику $U(s)$ можно получить, введя в расчёт сопротивление обмотки. Также рассмотрены новые системы частотного регулирования асинхронного двигателя с использованием блоков коррекции и прямого управления моментом. Система управления поддерживает момент вращения двигателя на критическом уровне, т.е. двигатель, как объект управления, находится в неустойчивом состоянии, и система управления им должна успевать сохранять это неустойчивое состояние.

Трёхмерная расчётная модель (рис. 1) и базирующаяся на её основе методика и программа расчёта интегральных и локальных характеристик были разработаны авторами работ [10,11]. При постановке нами задачи приняты указанные выше допущения и ток обмотки, уложенной на длине $2p\tau$, сосредоточен в бесконечно тонких токовых слоях и создаёт чисто синусоидальную бегущую волну МДС:

$$F = F_m \cdot f(z) \exp j(\omega t - ax). \quad (1)$$

Амплитуда МДС связана известным [1] соотношением с линейной токовой нагрузкой,

$$F_m = \frac{I_m \tau}{\pi} = \sqrt{2} A \frac{\tau}{\pi} K_0, \quad (2)$$

где $A = \frac{m \omega l}{p \tau}$ – линейная токовая нагрузка, А,

K_0 – обмоточный коэффициент 1-й гармоники, первичное поле $f(z)$ в области лобовых частей аппроксимируется экспоненциальной функцией, j – плотность тока, А/м², τ – полюсное деление, мм., p – число пар полюсов [12].

$$f(z) = 0.83 e^{\frac{c-z}{\Delta}}. \quad (3)$$

С учетом рис. 2, представлено распределение МДС по продольной и поперечной осям.

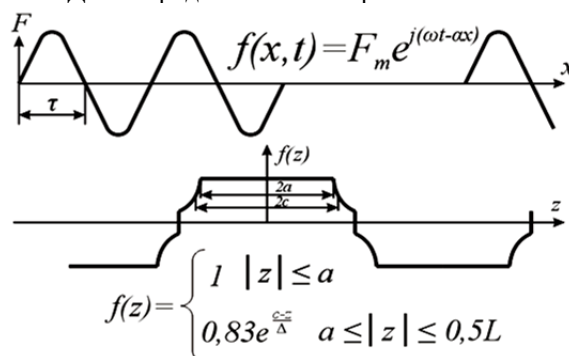


Рис.2. Распределение МДС по продольной и поперечной осям.

Начало неподвижной системы координат x, y, z в начале обмотанной части индуктора (рис. 1) магнитодвижущая сила (МДС) в виде двойного ряда Фурье:

$$F(x, z, t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} C_{n,v} e^{j\left(\frac{\pi n z}{L} + \frac{2\pi v x}{l}\right)} = \frac{8\sqrt{2}AK_0}{\pi l \alpha^2} \sum_n \sum_v y_n \cos \frac{\pi n z}{L} \frac{1}{v} K_v \exp j\left(\omega t + 2\pi v \frac{x}{l}\right), \quad (4)$$

$$y_n = \frac{1}{n \left(1 + \left(\frac{L}{\pi n \Delta}\right)^2\right)} \left[\left(\frac{1}{\pi n \Delta}\right)^2 \sin \frac{\pi n \alpha}{L} + \frac{L}{\pi n \Delta} \cos \left(\frac{\pi n \alpha}{L}\right) + 0,83 \sin \frac{\pi n}{2} \exp\left(\frac{c - 0,5L}{\Delta}\right) \right];$$

$$K_v = \frac{v \sin p\pi \left(1 + v \frac{2\tau}{l}\right)}{1 + v \frac{2\tau}{l}} \exp - j p \pi \left(1 + v \frac{2\tau}{l}\right).$$

где n, v – гармоники векторного потенциала, Δ – зазор, мм.

Исходными для областей зазора δ , РШ (слои d_2, d_3) являются уравнения электромагнитного поля [9]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{J}; & \operatorname{rot} \bar{E} &= -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t}; \\ \operatorname{div} \bar{B} &= 0; & \operatorname{div} \bar{J} &= 0; \\ \bar{J} &= \gamma \bar{E} & \bar{B} &= \mu \bar{H} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_x &= \int B_{\delta y} J_z d_x d_y d_z = \frac{1}{\mu_0} \int_x \int_z B_{\delta x} B_{\delta y} d_x d_y = \frac{1}{2\mu_0} \sum_n \sum_v \int_0^l \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} L R_{эм}^{(n,v)} (B_{\delta y}^{n,v} B_{\delta x}^{n,v}) d_z d_x |_{y=0} = \dots \\ &\dots = -\frac{64\mu_0 L A^2 K_0^2}{\pi \alpha^4} \sum_n \sum_v y_n^2 \frac{v |K_v|^2 \lambda I_m c_2}{|sh \lambda \delta + c_2 ch \lambda \delta|^2} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} F_y &= \frac{1}{2\mu_0} \oint_s (B_{\delta y}^2 - B_{\delta x}^2 - B_{\delta z}^2) ds = \frac{1}{4\mu_0} \sum_n \sum_v \int_0^l \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} L (|B_{\delta y}^{n,v}|^2 - |B_{\delta x}^{n,v}|^2 - |B_{\delta z}^{n,v}|^2) d_z d_x |_{y=0} = \dots \\ &\dots = -\frac{16\mu_0 L A^2 K_0^2}{\pi \alpha^4} \sum_n \sum_v y_n^2 \lambda^2 |K_v|^2 \frac{1 - |c_2|^2}{|sh \lambda \delta + c_2 ch \lambda \delta|^2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где λ – глубина проникновения переменного электромагнитного поля в проводящую среду, мм.

Интегрирование полученных уравнений проведено по площади активной поверхности РТ. Электромагнитная мощность $S_{эм}$ передается через активную поверхность $Y=\delta$ (на рис. 2) и зазор РТ. Активная составляющая расходуется на полезную механическую мощность $P_2=F_x v$ и потери ΔP_2 . Реактивная составляющая $Q_{эм}$ обуславливает созда-

$$S_{эм} = \int_0^L \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} L S_{эм} d_z d_x |_{y=\delta} = P_{эм} + j Q_{эм} = j \frac{32\mu_0 L A^2 K_0^2}{\pi \alpha^4} \sum_n \sum_v y_n \lambda \frac{|K_v|^2 c_2}{|sh \lambda \delta + c_2 ch \lambda \delta|^2}$$

Определив составляющие $P_{эм}, Q_{эм}$ – находим электромагнитный коэффициент полезного действия и $\cos \varphi$:

$$\eta_{эм} = \frac{P_2}{P_{эм}} = \frac{F_x v}{P_{эм}}; \quad \cos \varphi = \frac{P_{эм}}{S_{эм}}$$

Потери в обмотке индуктора $\Delta P_1 = 3I_1 \cdot r_1$ и общий КПД: $\eta_{эм} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_2}{P_{эм} + \Delta P_1} = \frac{F_x v}{P_{эм} + \Delta P_1}$.

где E – напряженность электрического поля, В/м; γ – удельная электропроводность материала, См; B – магнитная индукция, Тл. Реактивная шина состоит из двух слоев толщиной d_2 и d_3 (для ЛАД) с параметрами γ_2, μ_2 и $\gamma_3, \mu_3 = \text{const}$.

Находим движущую силу F_x , нормальную составляющую F_y , мощность $P_2 = F_x v$, электромагнитную мощность $S_{эм} = P_{эм} + j Q_{эм}$:

ние основного магнитного потока. Расчет электромагнитной мощности проведен через вектор Пойтинга [3]:

$$S_{эм} = \oint_s \bar{S} ds,$$

где ds – элемент поверхности, через которую определяется мощность. Для рис.3 это поверхность индуктора, $Y=\delta$:

Для определения общего $\cos \varphi$ необходимо учесть сопротивления рассеяния обмотки $x_{\sigma 1}, r_1$, которые рассчитываются в программе по параметрам обмотки: типу и геометрии зубцового слоя. [6]

Отсутствие опыта создания и эксплуатации промышленных транспортных систем с ОЛАД и массивным обратным магнитопроводом исключает возможность использования единого универсального критерия оценки ЛАД, как части системы, по-

этому в дальнейшем в качестве анализируемых показателей приняты основные тягово-энергетические характеристики F_x , КПД η , коэффициент мощности $\cos\varphi$.

При этом тяговое усилие косвенно, через индукцию и поток в зазоре, габариты сердечника отражает капитальные затраты, а КПД и $\cos\varphi$ – эксплуатационные расходы. Особо отметим, что при питании от преобразователя частоты коэффициент мощности на зажимах сети (или преобразователя частоты) близок к значению $(0,9 \div 0,95)$ [10] при ответственном выборе емкости конденсатора, поэтому этот показатель здесь не отражает экономичность потребления активной мощности из сети, а влияет только на потери в обмотке ЛАД.

Конструктивная схема расположения индуктора представлена на рис. 3.

Указанные характеристики являются не только функциями конструктивных параметров, но и скольжения, поэтому следует определиться с рабочим режимом, то есть с определением номинального скольжения и перегрузочной способности ЛАД.

Важно знать, как относительную величину s_n , так и частоту вторичных токов f_2 . За номинальные следует принять значения характеристик при $s_n = s_m$, когда тяговое усилие достигает наибольшего значения $F_x = F_{xm}$ при $A = const$ (или $I_1 = const$): F_{xm} , КПД η_n , $\cos\varphi_n$, $U = U_n$.

Пересчет на режим $U = const$ подтверждает $(1,5 \div 2)$ -кратную перегрузочную способность ЛАД по силе тяги. Таким образом, расчетно-теоретические исследования выполнены для следующих показателей при $A = const$: максимального скольжения s_m ; удельного тягового усилия $F_{xm} = F_{xm} S_u$; общего и электромагнитного КПД: η , $\eta_{эм}$, электромагнитного и общего коэффициента мощности $\cos\varphi$, $\cos\varphi_{эм}$ при $s = s_m$. Дополнительно, рассчитывались (для контроля) значения индукции в зазоре $B_{\delta y}$, нормального усилия F_y .

Компоновка зубцового слоя: t_1 , q , b_n , h_n и плотность тока J_1 оказывают влияние на общий КПД и $\cos\varphi$, а при выборе их значений можно ориентироваться на опыт разработки и эксплуатации вращающихся асинхронных машин [8] и промышленных ЛАД [2].

Для упрощения решения задачи важно максимально сократить число переменных, выделить независимые и зависимые, основные и второстепенные, причем некоторые из них приняты неизменными для принятого исполнения. Воздушный зазор δ и толщина d_2 РШ образуют общий немагнитный зазор $\Delta/2 = \delta + d_2/2$ (рис.2), который, по аналогии с вращающимися асинхронными машинами, должен быть минимальным. Очевидно, должно соблюдаться условие: $\delta \geq \delta_{min}$, а $\delta_{min} = (2 \div 4)$ мм в зависимости от внешних факторов. Следова-

тельно, минимально возможной должна быть и величина d_2 .

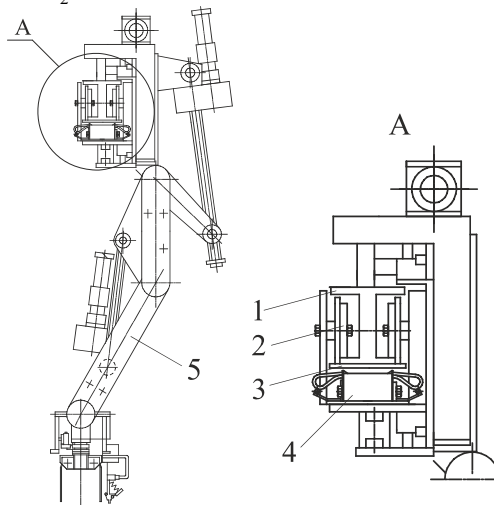


Рис.4. Компонентная схема ПФМ модуля с использованием одностороннего ЛАД, с расположением индуктора снизу. 1 – двутавр монорельсовый; 2 – поддерживающий ролик; 3 – медная или алюминиевая шина; 4 – индуктор ЛАД; 5 – манипулятор.

Однако, при конкретных значениях удельной электропроводности γ_2 , величина d_2 определяет общую электропроводность РШ, следовательно величины скольжения, потерь $\Delta P_{эм2} = s \cdot P_{эм}$ и КПД.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис.4 представлены характеристики конкретного примера по расчетам и принятым допущениям для электропривода пакетформирующей машины с грузоподъемностью платформы $m = 3000$ кг. Для двутавра 20 ширина полки $l = 150$ мм, радиус роликов $R = 90$ мм., ширина индуктора $2c = 150$ мм., минимальный воздушный зазор $\delta = 3$ мм, толщина РШ $d_2 = 2$ мм. Роль массивного обратного магнитопровода выполняет нижняя полка направляющей, удельная электропроводимость стали $\gamma_3 \approx 5 \cdot 10^6$ См/м. Расчетная скорость движения $v_p = (1 \div 2)$ м/с. Минимальная и максимальная скорости достигаются регулированием частоты. Число полюсов индуктора $2p = 4$.

Сила сопротивления движению (трение качения) зависит от вертикального усилия F_n , радиуса роликов R и коэффициента трения $K_{тр}$ и составляет $240 \div 360$ Н при равномерном движении. Скорость движения $v = v_c (1 - s)$, где $v_c = 2tf$ – скорость магнитного поля, s – скольжение. При повышенных для ЛАД скольжениях $s = (0,35 \div 0,45)$, $v_c = v_p / (1 - s) \approx 3,5$ м/с. Данные, в том числе и физические свойства материалов, вводятся в компьютерную программу и выполняется расчет характеристик в функции скольжения при $A = 30000$ А/м = const.

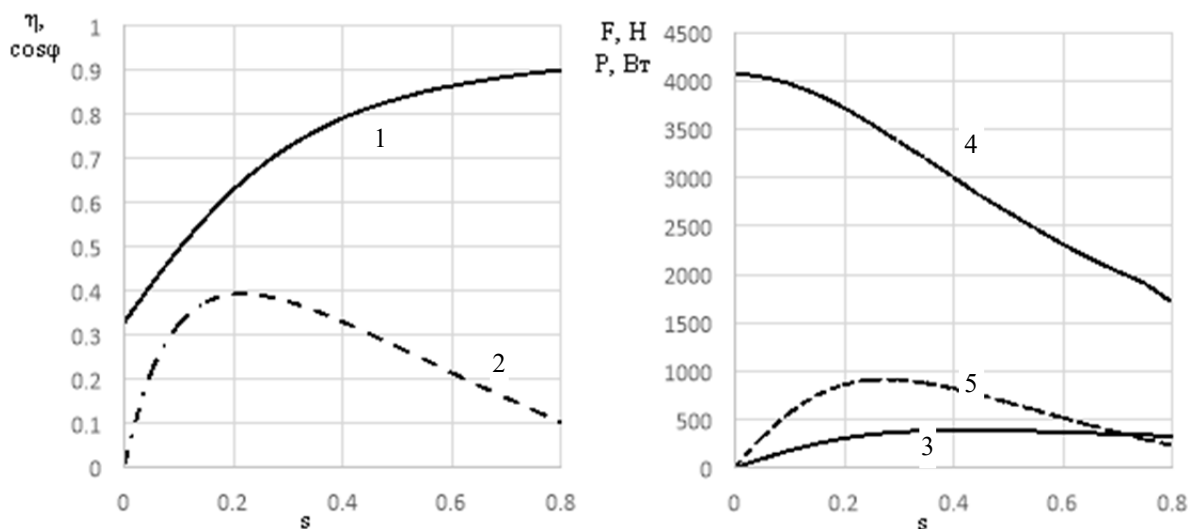


Рис.4. Зависимость тягово-энергетических показателей: 1 – $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; 2 – η – КПД; 3 – F_x – движущее усилие; 4 – F_y – нормальная составляющая усилия; 5 – P_2 – мощность.

Выводы

Таким образом, решаемая задача сводится к исследованию функций трёх независимых переменных: полюсного деления τ , воздушного зазора δ и удельной электропроводности РШ γ_2 . Остальные параметры принимаются постоянными или зависимыми. В дальнейших исследованиях планируется провести эксперимент, применительно к решаемой

задаче, и эмпирический расчет характеристик ЛАД со сравнительной характеристикой привода с асинхронным двигателем.

Использование ЛАД в приводном механизме функциональных модулей пакетформирующих машин позволяет значительно увеличить ускорение, диапазон скоростей перемещения, что, в конечном итоге, приводит к возрастанию продуктивности их работы.

Список литературы:

1. Алиев, И.И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию [Текст] / И.И. Алиев. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2002. – 255 с.
2. Епифанов, А.П. Экспериментальная установка по исследованию частотно-управляемого асинхронного электропривода [Текст] / А.П. Епифанов, А.М. Суслов // Энергосбережение, электропривод, эксплуатация электрооборудования и автоматизация технологических процессов в АПК: сб. науч. тр. – СПб., 2000. – С. 78-88.
3. Bianchi, N. Analytical field computation of a tubular permanentmagnet linear motor [Text] / Bianchi N. // IEEE Transactions on Magnetics – 2000. – Volume 36, Issue 5. – P. 3798 – 3801. DOI: [10.1109/20.908373](https://doi.org/10.1109/20.908373)
4. Fang, You-tong Single neuron network PI control of high reliability linear induction motor for Maglev [Text] / Fang You Tong, Fan cheng-zhi // Journal of Zhejiang University SCIENCE A. – 2007. – 8(3). – PP. 408-411. DOI: [10.1631/jzus.2007.A0408](https://doi.org/10.1631/jzus.2007.A0408)
5. Вунна, Шве. Линейный асинхронный двигатель быстродействующих механизмов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 : 2008: Вунна Шве. – Москва. – 199 с.
6. Levi, E. Operating principles of a novel multiphase multimotor vector controlled drive [Text] / Levi E., Jones M., Vukosavic S.N., Toliyat H.A. // IEEE Transaction on Energy Conversion. – 2004. – Volume 19, Issue 3. – P. 508 – 517. DOI: [10.1109/TEC.2004.832055](https://doi.org/10.1109/TEC.2004.832055)
7. Bianchi, S. Tubular linear permanent magnet motors: an overall comparison [Text] / S. Bianchi, D. Bolognani, F. Corte // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – Volume 39, Issue 2. – P. 466 – 475. DOI: [10.1109/TIA.2003.809444](https://doi.org/10.1109/TIA.2003.809444)
8. Епифанов, А.П. Электропривод в сельском хозяйстве [Текст] / А.П. Епифанов, А.Г. Гушинский, Л.М. Малайчук. – СПб: Лань, 2010. – 220 с.
9. Ямамура, С. Теория линейных асинхронных двигателей [Текст] / С. Ямамура. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 180 с.
10. Rinkeviciene, R. Dynamic Models of Linear Induction Drives [Text] / R. Rinkeviciene, A. Petrovas // Elektronika ir elektrotechnika. – 2005. – Nr.5 (61). – P. 23 – 27.
11. Москаленко, В.В. Системы автоматизированного управления электропривода [Текст] / В.В. Москаленко. – М.: ИНФРА-М, 2007. – 208с.
12. Электромагнитная совместимость. EURODRIVE (SEW): практика приводной техники [Текст]. – СПб, 2003. – 91 с.
13. A new approach to vector control for a linear induction motor considering end effects. Jeong-Hyoung Sung, Kwanghee Nam [Text] / Department of electrical engineering, POSTECH University. – Hyoja San-31, Pohang, Republic of Korea. – PP. 2284 – 2289. DOI: [10.1109/IAS.1999.799162](https://doi.org/10.1109/IAS.1999.799162)
14. Chevailler Samuel Comparative study and selection criteria of linear motors [Text]: dissertation doctor of science, technical - Suisse, EPFL, 2006.
15. Peresada, S. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor [Text] / S.Peresada, A. Tonielli // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. – 2000. – № 14. – PP. 177–200. DOI: [10.1002/\(SICI\)1099-1115\(200003/05\)14:2/3<177::AID-ACSS579>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1115(200003/05)14:2/3<177::AID-ACSS579>3.0.CO;2-2)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЛИНЕЙНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ ДЛЯ ПАКЕТОФОРМИРУЮЩИХ МАШИН

Л.А. Кривопляс-Володина, кандидат технических наук, доцент, *E-mail*: advised26_058_02_nuft@ukr.net

А.Н. Гава, доктор технических наук, профессор, *E-mail*: gavvaoleksandr@gmail.com

С.В. Токарчук, кандидат технических наук, доцент, *E-mail*: tollserg@ukr.net

Кафедра мехатроники и упаковочной техники

Национальный университет пищевых технологий, ул.Владимирская 68, Киев - 33, Украина, 01601

Аннотация. В работе рассмотрены и выполнены расчетно-теоретические исследования характеристик линейного асинхронного двигателя (ЛАД) в зависимости от основных технических и конструктивных параметров пакетноформирующих машин. Объектом исследования в работе является электропривод модулей перемещения функциональных систем пакетноформирующей машины с линейным асинхронным электродвигателем. Полученные результаты расчетно-теоретических исследований дают возможность выбрать значения параметров при проектировании функциональных модулей перемещения с линейным асинхронным электродвигателем. Использование в пакетноформирующей машины транспортной системы с электроприводом на базе линейного асинхронного двигателя дает возможность упростить её кинематическую схему и повысить показатели надежности. Полученные результаты могут быть рекомендованы и для других технологических машин и линий в промышленном комплексе.

Ключевые слова: линейный асинхронный двигатель, конструктивные параметры, модель, рациональные значения, функциональный модуль, транспортные системы.

References

1. Aliev II. Spravochnik po elektrotehnike i elektrooborudovaniyu. Moscow: Vysshaya shkola; 2002.
2. Epifanov AP, Suslov AM. Eksperimentalnaya ustanovka po issledovaniyu chastotno-upravlyаемого asinhronogo elektroprivoda. SPb.; 2000.
3. Bianchi N. Analytical field computation of a tubular permanentmagnet linear motor. IEEE Transactions on Magnetics. 2000; 36(5): 3798 – 3801. DOI: [10.1109/20.908373](https://doi.org/10.1109/20.908373)
4. Fang You-tong Single neuron network PI control of high reliability linear induction motor for Maglev. Journal of Zhejiang University SCIENCE A. 2007; 8(3): 408-411. DOI: [10.1631/jzus.2007.A0408](https://doi.org/10.1631/jzus.2007.A0408)
5. Vunna Shve. Lineyniy asinhronnyy dvigatel bystrodeystvuyuschih mehanizmov: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.09.01: 2008 : Vunna Shve. Moskva;199.
6. Levi E, Jones M, Vukosavic SN, Toliyat HA. Operating principles of a novel multiphase multimotor vector controlled drive. IEEE Transaction on Energy Conversion. 2004; 19(3): 508 – 517. DOI: [10.1109/TEC.2004.832055](https://doi.org/10.1109/TEC.2004.832055)
7. Bianchi S, Bolognani D. Tubular linear permanent magnet motors: an overall comparison. IEEE Transactions on Industry Applications. 2003; 39(2):466-475. DOI: [10.1109/TIA.2003.809444](https://doi.org/10.1109/TIA.2003.809444)
8. Epifanov AP, Guschinskiy AG, Malaychuk LM. Elektroprivod v selskom hozyaystve. SPb: Lan; 2010.
9. Yamamura S. Teoriya lineynyih asinhronnyih dvigateley. L.: Energoatomizdat; 1983.
10. Rinkeviciene R, Petrovas A. Dynamic Models of Linear Induction Drives Elektronika ir elektrotechnika. 2005;.5 (61): 23-27.
11. Moskalenko VV. Sistemyi avtomatizirovannogo upravleniya elektroprivoda. Moscow: INFRA-M; 2007.
12. Elektromagnitnaya sovmestimost. EURODRIVE (SEW): praktika privodnoy tehniki. SPb; 2003.
13. Jeong Hyoun Sung, Kwang Hee Nam. A new approach to vector control for a linear induction motor considering end effects. Department of electrical engineering, POSTECH University. Republic of Korea: Hyoja San-31, Pohang; 2006. DOI: [10.1109/IAS.1999.799162](https://doi.org/10.1109/IAS.1999.799162)
14. Chevailler Samuel Comparative study and selection criteria of linear motors: dissertation doctor of science, technical. Suisse, EPFL; 2006.
15. Peresada S. High-performance robust speed-flux tracking controller for induction motor. International journal of adaptive control and signal processing. 2000; 14: 177–200. DOI: [10.1002/\(SICI\)1099-1115\(200003/05\)14:2/3<177::AID-ACSS79>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1115(200003/05)14:2/3<177::AID-ACSS79>3.0.CO;2-2)

Отримано в редакцію 17.04.2017
Прийнято до друку 22.06. 2017

Received 17.04.2017
Approved 22.06. 2017