

УДК 674.053:621.934/936

## РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ

Алексеев А.Е., Петухов С.В., Кришьянис М.В.

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»,  
Архангельск, e-mail: a.alekseev@narfu.ru, s.petukhov@narfu.ru, m.krishjyanis@narfu.ru

Деревообрабатывающие станки преимущественно оснащаются рабочими органами с поступательным либо с возвратно-поступательным движением, осуществляемым гидравлическим приводом. Но у подобного типа привода присутствует целый ряд минусов. Исследования показывают, что с целью позиционирования рабочих органов деревообрабатывающих станков лучше использовать замкнутые поршневые электрогидравлические следящие исполнительные механизмы, имеющие на выходном звене достаточные мощность и усилие. Кроме того, это конструктивно надежнее и несколько проще. Подобные устройства имеют назначение быстро и точно позиционировать исполнительный механизм либо предмет обработки в шаговом либо свободном режимах, предоставляя возможность торможения приспособления либо обрабатываемого материала без инерции. Значительный интерес на практике представляет исследование возможности использования линейного электропривода с целью перемещения в обрезных станках пильного суппорта. В данной работе приводятся результаты проведенных исследований динамических режимов цилиндрического линейного асинхронного двигателя, которые были получены на основе Matlab Simulink с применением системы дифференциальных уравнений Парка – Горева. Итоги моделирования цилиндрического линейного асинхронного двигателя под нагрузкой даны в графическом отображении: изменения потокоцеплений при его запуске, график зависимости тягового усилия от времени и скорости от времени, изменения перемещения вторичного элемента. Линейный асинхронный двигатель дает возможность решить насущные вопросы торможения вторичного элемента и его точного расположения, следствием чего будет повышение надежности в работе станка и увеличение показателей качества обработки пиломатериалов.

**Ключевые слова:** цилиндрический линейный асинхронный двигатель, динамические характеристики

## CALCULATION AND THEORETICAL STUDIES OF THE CHARACTERISTICS OF A CYLINDRICAL LINEAR INDUCTION MOTOR WITH REGARD TO ELECTROMAGNETIC PROCESSES

Alekseev A.E., Petukhov S.V., Krishyanis M.V.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic)  
Federal University named after M.V. Lomonosov», Arkhangelsk,  
e-mail: a.alekseev@narfu.ru, s.petukhov@narfu.ru, m.krishjyanis@narfu.ru

Most woodworking machines have working bodies with forward or reciprocating motion, which is carried out by means of a hydraulic drive. However, the hydraulic drive has a number of drawbacks. Studies have shown that for the positioning of the working bodies of woodworking machines it is advisable to use closed piston electrohydraulic servo mechanisms that have sufficient force and power at the output link, and are also simpler in design and reliable. Most of these devices must provide accurate and fast positioning of the object of processing or actuator in step or free mode, the possibility of inertial braking of the processed material or device, and others. Of significant practical interest is the study of the possibility of using a linear electric drive to move the saw carriage in edging machines. The paper presents the results of studies of dynamic modes of a cylindrical linear induction motor, obtained on the basis of Matlab Simulink using the Park-Gorev differential equation system. The results of modeling a cylindrical linear asynchronous motor under load are presented in the form of graphs: changes in flux linkages during the process of its start, dependencies of tractive effort on time and speed on time, changes in the movement of the secondary element. Linear asynchronous motor provides solutions to the problems of braking the secondary element and its precise increase in the reliability of the machine and the quality of the processing of sawn timber.

**Keywords:** cylindrical linear induction motor, dynamic characteristics

В технологическом процессе изготовления пиломатериалов, имеющих стандартные размеры, присутствует достаточно большое количество отдельных операций по местному перемещению исполнительных механизмов либо предметов обработки. Данные операции необходимы в целях функционального обеспечения согласованности работы всего оборудования, а также для оптимальной его загрузки в пределах номинальной пропускной способности. Они обеспечивают сла-

женность и ритмичность функционирования оборудования, задействованного в производственном процессе. Подобные устройства преимущественно призваны обеспечивать быстрое и максимально точное позиционирование исполнительного механизма либо предмета обработки в шаговом или свободном режиме. Кроме того, они должны позволять возможность затормаживать приспособления на оборудовании либо же сам обрабатываемый материал без инерции.

Общеизвестно [1], что деревообрабатывающие станки в большинстве имеют рабочие органы с поступательным либо возвратно-поступательным движением, осуществляемым гидравлическим приводом. Но у такого типа привода имеется целый ряд минусов, отрицательно влияющих на технологический процесс [2]. В результате исследований [3] было выявлено, что для позиционирования рабочих органов деревообрабатывающих станков оптимально использовать поршневые замкнутые электрогидравлические следящие исполнительные механизмы (ЭГСМ), имеющие на выходном звене достаточные мощность и усилие, которые, кроме того, конструктивно проще и имеют более высокую степень надежности.

Исследование возможности использования линейного электропривода с целью перемещения в обрезных станках пильного суппорта [3] сегодня, когда активно развивается деревообрабатывающее и лесопильное оборудование, представляет значительный практический интерес.

Цель исследования: проанализировать реальные возможности применения линейного асинхронного электродвигателя для привода перемещения пильного суппорта обрезного станка Ц2Д-5А с математическим моделированием режимов работы данного двигателя.

Увеличение степени надежности механизма, который осуществляет перемещение пильного суппорта, путем использования линейного привода возможно за счет того, что между механизмами подачи и главного движения исключаются дополнительные промежуточные звенья. Использование линейного электропривода в значительной степени упрощает конструкцию станка, при этом намного увеличивая эффективность обрезки пиломатериалов.

#### Материалы и методы исследования

Проводя оценку согласованности электромеханических показателей линейного двигателя привода перемещения и характеристик исполнительного механизма в процессе обрезки пиломатериалов, необходимо принимать во внимание и силовые, и технологические параметры передвижения механизма перемещения узла резания. Чтобы выбрать линейный асинхронный двигатель привода перемещения пильного суппорта обрезного станка, мы руководствовались такими факторами: масса суппорта, время его перемещения на необходимую ширину обрезанной доски, а также локальные условия монтажа. Проанализировав данные факторы, мы предварительно произвели

требуемые инженерные расчеты согласно представленным в [3, 4] методикам.

В электроприводе пильного суппорта линейный двигатель функционирует в таких режимах: разгон с ускорением, заданным оператором, установившееся движение, торможение с определенным ускорением, установившееся движение, торможение с ускорением, заданным оператором, позиционирование со значением усилия, заданным оператором. Когда станок функционирует в циклическом режиме, в этом случае в обязательном порядке имеются участки разгона, где наличествует повышенное скольжение и во вторичном элементе есть потери. По этой причине повышение эксплуатационных показателей линейного электропривода на основе ЦЛАД – это весьма актуальная на сегодня задача. В процессе применения линейных асинхронных двигателей основным препятствием выступает обеспечение допустимых (оптимальных) показателей при запитывании станка от стандартной электросети с промышленной частотой 50 Гц. При правильном применении ЦЛАД максимальная скорость движения не должна быть более 0,2–0,5 м/с, при этом тяговое усилие должно составлять 180–200 Н. При таких условиях толщина зубцов и катушек должна составлять до 3–5 мм. В линейном двигателе синхронная скорость имеет непосредственную зависимость от двух величин:  $f$  – частоты тока и  $\tau$  – величины полюсного деления. Последнее же имеет зависимость от числа пазов на полюс и фазу и ширины зубцового деления. Если изготовить индуктор, имеющий число пазов на полюс и фазу  $q = 2$  и выше, на частоте 50 Гц у скорости бегущего магнитного поля ЦЛАД, будет присутствовать достаточно большое значение. В этом случае двигатель по причине ограниченной длины хода функционировать будет с довольно большими значениями скольжения, то есть у него будет весьма низкий КПД, а кроме того, тяжелый тепловой режим. Чтобы при скольжениях  $s < 0,3$  обеспечить оптимальный рабочий режим, нужно выполнять ЦЛАД, имеющий полюсное деление  $\tau < 20$  мм. Однако помимо технологических издержек уменьшение полюсного деления может значительно ухудшить коэффициент мощности двигателя по причине возрастающего намагничивающего тока. Подобные ЦЛАД для обеспечения оптимальных показателей должны иметь воздушный зазор в пределах 0,15–0,2 мм. Если же данную величину зазора увеличить до приемлемых с технологической точки зрения значений 0,4–0,6 мм, то рост намагничивающего тока может стать при-

чиной довольно сильного снижения тягового усилия, а равно и коэффициента мощности и КПД.

В процессе исследований динамических режимов работы ЛАД используют модели разного типа [4–6], имеющие различия в уровне допущений, а значит, и отличающиеся сложностью вычислений.

При исследовании динамических режимов ЛАД в этой работе применялся метод, который основан на использовании системы дифференциальных уравнений Парка – Горева [7, 8]. Для записи уравнений была взята система координат ОХУ, которая перемещается в пространстве со скоростью бегущего магнитного поля. При проведении расчетов в рамках данного метода используются параметры схемы замещения, которые предварительно были определены в расчетах по инженерным методикам. Данный способ, помимо этого, дает возможность проследить, как взаимосвязаны между собой электромагнитные и электромеханические процессы и параметры двигателя.

Уравнения Парка – Горева, записанные в системе координат ОХУ, имеют следующий вид:

$$\frac{d\Psi_{x1}}{dt} = U_{x1} - \frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R_1 X_r}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x1} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R_1 X_m}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \Psi_{y1}, \quad (1)$$

$$\frac{d\Psi_{y1}}{dt} = U_{y1} - \frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R_1 X_r}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{y1} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R_1 X_m}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{y2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \Psi_{x1}, \quad (2)$$

$$\frac{d\Psi_{x2}}{dt} = -\frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R'_2 X_s}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R'_2 X_m}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x1} + \frac{\pi}{\tau} (v_0 - v) \Psi_{y2}, \quad (3)$$

$$\frac{d\Psi_{y2}}{dt} = -\frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R'_2 X_s}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{y2} + \frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R'_2 X_m}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{y1} + \frac{\pi}{\tau} (v_0 - v) \Psi_{x2}, \quad (4)$$

$$F = \frac{3 \pi \omega_0}{2 \tau} \frac{X_m}{X_s X_r - X_m^2} (\Psi_{x2} \Psi_{y1} - \Psi_{x1} \Psi_{y2}), \quad (5)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F - F_c}{m}, \quad (6)$$

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad (7)$$

где  $U_{x1}, U_{x2}$  – напряжение индуктора по осям ОХ и ОУ,

$\tau$  – полное деление обмотки ЛАД,

$X_s = X_1 + X_m; X_r = X_2 + X_m$  – сопротивления, вводимые в модель,

$R_1$  – активное сопротивление обмотки индуктора, Ом,

$R'_2$  – активное приведенное сопротивление вторичного элемента, Ом,

$X_1$  – индуктивное сопротивление индуктора, Ом,

$X_2$  – приведенное индуктивное сопротивление вторичного элемента, Ом,

$X_m$  – реактивное сопротивление намагничивания, которое определяется главным магнитным полем, Ом,

$v_0$  – скорость бегущего электромагнитного поля (синхронная скорость ЛАД);

$\Psi_{x1}, \Psi_{y1}, \Psi_{x2}, \Psi_{y2}$  – потокосцепления по осям ОХ и ОУ, соответственно индуктора и вторичного элемента.

$\omega_0$  – угловая частота питающей сети.

Составляющие токов по осям ОХ и ОУ определяются из потокосцеплений на основании следующих выражений [7, 8]:

$$i_{x1} = \frac{X_r}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x1} - \frac{X_m}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x2}, \quad (8)$$

$$i_{y1} = \frac{X_r}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{y1} - \frac{X_m}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{y2}, \quad (9)$$

$$i_{x2} = \frac{X_s}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x2} - \frac{X_m}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x1}, \quad (10)$$

$$i_{y1} = \frac{X_s}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{y2} - \frac{X_m}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{y1}. \quad (11)$$

В дальнейшем выражения, которые были получены для токов, будут братья при проведении оценки характеристик ЛАД с учетом тепловых процессов.

С целью решения системы дифференциальных уравнений мы применяли в работе программный продукт Matlab Simulink. В структурной схеме математической модели использовались такие обозначения:

$$A = \frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R_1 X_r}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x1};$$

$$B = \frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R_1 X_m}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x2};$$

$$C = \frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R'_2 X_s}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x2};$$

$$D = \frac{\pi}{\tau} v_0 \frac{R'_2 X_m}{X_s X_r - X_m^2} \Psi_{x1};$$

$$E = \frac{3 \pi \omega_0}{2 \tau} \frac{X_m}{X_s X_r - X_m^2}.$$

Блоки «Goto» и «From» в представленной модели означают соответственно «вход» и «выход» одного и того же сигнала. Настроечные окна показывают числовые

значения и параметры блоков. После того как будут введены все данные, запускается моделирование, при этом указываются начальное и конечное время, шаг и остальные параметры.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Результаты моделирования ЦЛАД под нагрузкой представлены в виде графиков (рис. 1–4).

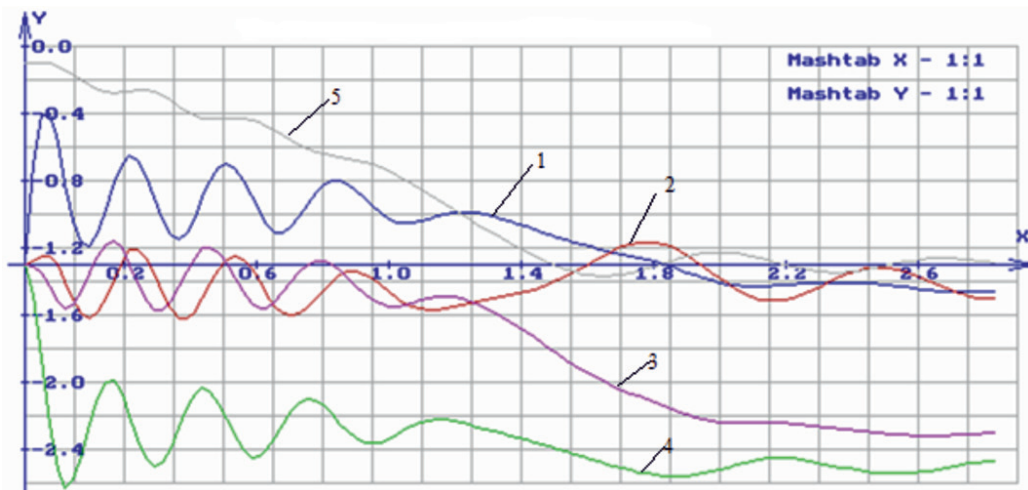


График 1 –  $\Psi_{x1} = f(t)$ ; график 2 –  $\Psi_{x2} = f(t)$ ; график 3 –  $\Psi_{y1} = f(t)$ ; график 4 –  $\Psi_{y2} = f(t)$ ; график 5 –  $s = f(t)$

Рис. 1. Изменения потокосцеплений во время процесса пуска ЦЛАД

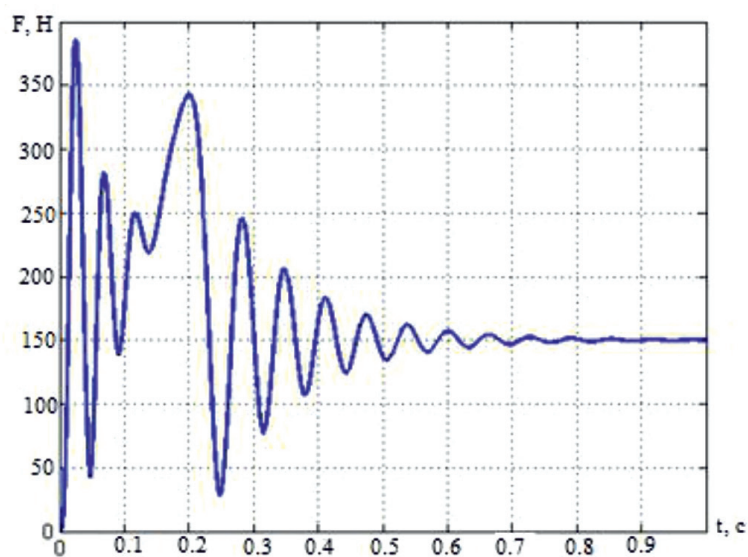


Рис. 2. Зависимость тягового усилия от времени при пуске ЛАД под нагрузкой

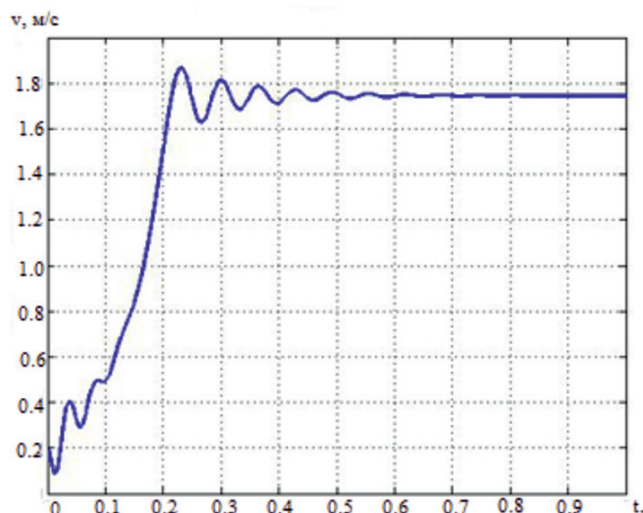


Рис. 3. Зависимость скорости от времени при пуске ЛАД под нагрузкой

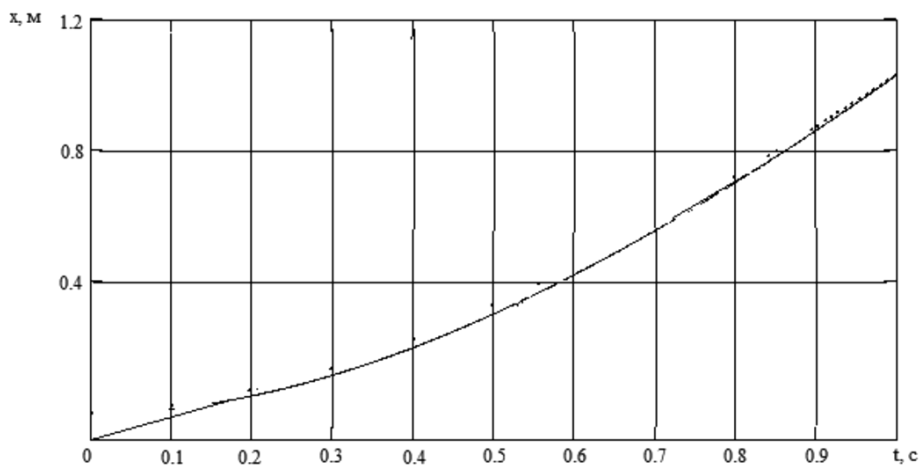


Рис. 4. Изменение перемещения вторичного элемента

Выше уже было оговорено, что исследуемый линейный двигатель будет функционировать с повышенными значениями скольжения, то есть иметь тяжелый тепловой режим. Самой подверженной тепловым нагрузкам частью будет изоляция обмоток индуктора. Высокие температурные показатели являются причиной теплового старения изоляции обмоток, это ведет к уменьшению механической и электрической прочности. В процессе работы линейного асинхронного двигателя нагревается как индуктор, так и вторичный элемент. Серьезный нагрев вторичного элемента может стать причиной снижения тягового усиления и впоследствии может вызвать де-

формации в результате повышения температуры, по этой причине для него мы тоже рассмотрели тепловое состояние [9, 10].

#### Выводы

1. По итогам проведенных исследований мы рассмотрели и доказали имеющуюся возможность использования цилиндрических линейных асинхронных двигателей для привода пильного суппорта обрезающего станка, что позволяет увеличить скорость перемещения и улучшить возможность регулировать скорость движения исполнительного механизма.

2. Отсутствие кинематических связей между статором и вторичным элементом,



а равно и промежуточным рабочим органом, в значительной степени минимизируют механические потери.

3. Применение линейного асинхронного двигателя позволяет положительно решать вопросы, связанные с торможением вторичного элемента и его точным повышением надежности работы станка и качества обработки пиломатериалов.

#### Список литературы

1. Амалицкий В.В., Амалицкий В.В. Деревообрабатывающие станки и инструменты. М.: Издательский центр «Академия», 2011. 400 с.
2. Бавельский М.Д., Девятков С.И. Гидропневмоавтоматика деревообрабатывающего оборудования. М.: Лесная промышленность, 1978. 320 с.
3. Алексеев А.Е., Емельянов В.П., Маркин Н.И., Петухов С.В. Линейный электропривод производственных механизмов и машин: монография. Архангельск: АГТУ, 2009. 230 с.
4. Кураев Н.М. Исследование и разработка электроприводов с цилиндрическим линейным асинхронным двигателем: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / [Место защиты: Нац. исслед. ун-т МЭИ]. Москва, 2013. 146 с.
5. Сарапулов Ф.Н., Фризен В.Э., Швыдкий Е.Л., Смольянов И.А. Математическое моделирование линейного асинхронного двигателя на основе детализированных схем замещения // Электротехника. 2018. № 4. С. 58–63.
6. Масандилов Л.Б., Кузиков С.В., Кураев Н.М. Расчет параметров схем замещения и характеристик цилиндрических линейных асинхронных и МГД-двигателей // Электропривод и системы управления // Труды МЭИ. Вып. 688. М.: Издательство МЭИ, 2012. С. 4–16.
7. Аипов Р.С. Основы построения и теории линейных асинхронных приводов с упругими накопителями энергии: учебное пособие. Уфа: БГАУ, 2006. 295 с.
8. Аипов Р.С. Линейные электрические машины и приводы на их основе: учебное пособие. Уфа: БГАУ, 2003. 202 с.
9. Alekseev A.E., Krisjanis M.V. Evaluation of the thermal state of a linear induction motor operating as a positioner in the edging machine. 2017, USA, Detroit: Scientific public organization «Professional science», 2017. 336 p. ISBN 978-1-370-29463-3.
10. Alekseev A.E., Krisjanis M.V. Evaluation of the thermal state of a linear induction motor operating as a positioner in the edging machine / International Conference on Recent Advances in Engineering, Technology and Applied Sciences, November 23th Madrid, Spain, 2017. P. 17–25.