

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ПРИВОДА ПИЛЬНОГО СУППОРТА ОБРЕЗНОГО СТАНКА

*Алексеев А.Е., Петухов С.В., Баланцева Н.Б., Калиничева О.А., Радюшин В.В.,  
Бабкин И.М., Кришьянис М.В.*

*Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск*

**Ключевые слова:** обрезной станок, пильный суппорт, обрезка пиломатериалов, технологическая операция, система позиционирования, линейный асинхронный двигатель.

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы совершенствования обрезного станка путем применения нового типа привода перемещения пильного суппорта механизма резания. В качестве нового типа привода предложен электропривод с линейным асинхронным двигателем. Такой привод обеспечивает возможность повышения скорости перемещения и необходимое регулирование скорости движения исполнительного механизма, что важно для обеспечения повышения производительности труда и качества пиломатериалов. Исследуются физические явления, происходящие в линейном асинхронном двигателе при работе его в приводе перемещения пильного суппорта. Особое внимание уделяется определению точности позиционирования пильного суппорта, так как это наиболее важный фактор, влияющий на размеры обрабатываемых пиломатериалов. На основе проведенного исследования сформулированы технические решения, позволяющие компенсировать систематическую погрешность перемещения исполнительного органа пильного суппорта. Материалы статьи будут полезны для специалистов, занимающихся вопросами разработки, модернизации и эксплуатации деревообрабатывающих станков и технологических процессов обработки пиломатериалов.

## RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF USING A LINEAR ASYNCHRONOUS MOTOR TO DRIVE THE SAW SUPPORT OF AN EDGER

*Alekseev A.E., Petukhov S.V., Balantseva N.B., Kalinicheva O.A., Radyushin V.V.,  
Babkin I.M., Krishjanis M.V.*

*Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk*

**Keywords:** edger, sawn caliper, cutting lumber, technological operation, positioning system, linear asynchronous motor.

**Abstract.** The article deals with improving of edger by using new type of drive for moving the sawn caliper of the cutting mechanism. An electric drive with a linear asynchronous motor is proposed as a new type of drive. This drive provides the ability to increase the speed of movement and the necessary speed control of the executive gear which is important for ensuring an increase in labor productivity and quality of lumber. The physical phenomena occurring in a linear asynchronous motor during its operation in the drive of sawn caliper movement are investigated. Particular attention is paid to determining the positioning accuracy of the sawn caliper, as this is the most important factor affecting the size of the sawn timber. On the basis of the study, technical solutions have been formulated that allow compensating for the systematic error in the movement of the executive body of the saw caliper. The materials of this article will be useful for specialists involved in the development, modernization and operation of wood processing machines and technological processes for lumber processing.

### Введение

Индивидуальный зональный раскрой лесоматериалов на спецификационные пиломатериалы требует комплекса технических средств. Дальнейшее совершенствование и разработка новых рациональных способов раскроя определяется созданием рекомендаций по разрезанию пиломатериалов на лесопильном оборудовании. Как правило, параметры поставок непостоянны, поэтому технологическая линия производства, в состав которой входят исполнительные механизмы, должна автоматически подстраиваться к изменяющимся условиям работы.

На производительность и качество работы обрезных станков в первую очередь оказывают влияние скорость подачи, которая должна быть оптимальной для каждого постава, и перемещение подвижных пил (дистанционное или перселективное). Чтобы повысить ценностный выход обрезных пиломатериалов, необходимо оптимально загружать обрезные станки с соблюдением рекомендаций. Достижению этой цели способствует также внедрение видеокамер, лазерных сенсоров и устройств механизации вспомогательных операций.

Правильный выбор оптимальной скорости подачи станков, перемещение их подвижных пил (дистанционно и перселективно) – все это влияет на производительность обрезных станков. Требования по точности позиционирования приводного устройства для перемещения пил обусловлены также и государственными стандартами на пиломатериалы.

В настоящее время в обрезных станках отечественного производства в основном используется гидравлический привод, принцип работы которого, а также достоинства и недостатки подробно рассмотрены в [1, 2].

Однако, опираясь на основные требования, предъявляемые к приводу перемещения пил обрезных станков, можно сделать вывод о пригодности использования в качестве такого привода следящих механизмов, обеспечивающих позиционирование рабочих органов в следящем режиме с плавным изменением скорости на участках разгона и торможения – т.е. следящего привода. Применение замкнутых поршневых и электрогидравлических исполнительных механизмов позволяет позиционировать пильный суппорт обрезного станка [3].

Следующей ступенью научно-технологической эволюции приводов возвратно-поступательного движения, которые возможно применять для перемещения пильного суппорта обрезного станка в рамках автоматизации процесса обрезки является использование электроприводов. Применение электропривода повышает быстродействие, гибкость управления и дает возможность работать с системами программного управления

Однако электроприводы на базе электродвигателя вращательного движения применять в системе перемещения пильного суппорта нерационально, поскольку необходимо преобразовать вращательное движение вала в возвратно-поступательное движение рабочего органа станка. Для этой цели необходимо использовать механический преобразователь. Таким образом, существенный практический интерес представляет рассмотрение таких систем электропривода, в которых отсутствует преобразователь движения, и электродвигатель непосредственно связан с рабочим механизмом. К подобным системам относятся электроприводы, выполненные на базе шагового, линейного и линейно-шагового электродвигателя.

### **Материалы и методы исследований**

Цилиндрический линейный асинхронный двигатель (ЦЛАД) (рис. 1), используемый в качестве линейного электропривода пильного суппорта обрезного станка, имеет ряд достоинств. В частности, у него, отсутствуют лобовые части обмотки индуктора и потери в них, отсутствует поперечный краевой эффект, присутствует геометрическая и электромагнитная симметрия.

На механизм перемещения узла резания влияют технологические и силовые параметры движения, которые следует учитывать, чтобы оценить согласование электромеханических характеристик линейного перемещения асинхронного двигателя привода с характеристиками исполнительного механизма, выполняющего свою функцию в заданных режимах работы линейного двигателя в электроприводе пильного суппорта обрезного станка. Ограничение геометрических размеров исследуемого асинхронного двигателя, определяемое размерами обрезного станка, и специфическое охлаждение его активных частей влияет на особенности электромагнитных и тепловых процессов.

Для расчетно-теоретических исследований статической механической характеристики ЦЛАД в виде зависимости тягового усилия от скольжения  $F = f(s)$  реальный линейный асинхронный двигатель заменяют эквивалентной электрической схемой замещения (рис. 2).

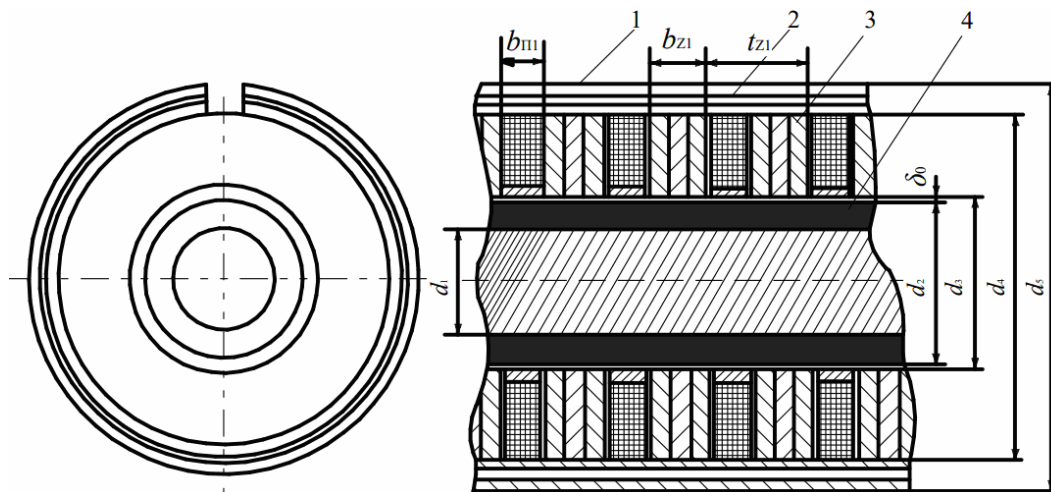


Рис. 1. Конструктивная схема цилиндрического линейного асинхронного двигателя: 1 – корпус индуктора (статора), 2 – сердечник индуктора, 3 – обмотка индуктора, 4 – вторичный элемент (ротор);  $b_{\text{пл}}$  – ширина паза статора;  $b_{z1}$  – ширина зубца статора;  $t_{z1}$  – размер зубчатого деления;  $\delta_0$  – воздушный зазор;  $d_1$  – внутренний диаметр вторичного элемента;  $d_2$  – наружный диаметр вторичного элемента;  $d_3$  – внутренний диаметр сердечника статора;  $d_4$  – наружный диаметр сердечника статора;  $d_5$  – диаметр корпуса

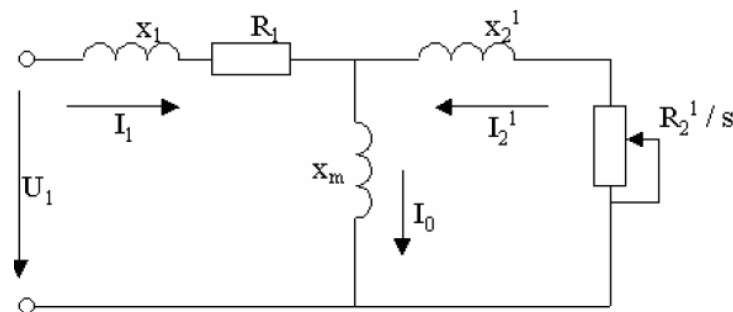


Рис. 2. Т-образная схема замещения ЛАД:  $R_m$  – активное сопротивление контура намагничивания, Ом,  $X_m$  – реактивное сопротивления намагничивания, Ом,  $R_1$  – активное сопротивление обмотки индуктора, Ом,  $X_1$  – индуктивное сопротивление индуктора, Ом,  $R_2^1$  – активное приведенное сопротивление вторичного элемента, Ом,  $X_2^1$  – приведенное индуктивное сопротивление вторичного элемента, Ом;  $s$  – скольжение

В приведенной схеме замещения значения электрических параметров  $R_1$ ,  $R_2^1$ ,  $X_1$ ,  $X_2^1$ ,  $R_m$ ,  $X_m$  определяются расчетным путем по инженерным методикам [4-7]. Методика расчета, в основе которой лежит Т-образная схема замещения, удобна для расчета механической характеристики ЛАД. Тем не менее, расчет механической характеристики с учетом электромагнитных процессов по этой методике является ошибочным, поскольку возникает значительная погрешность из-за принятия постоянных значений величин активного и индуктивного сопротивления как параметров роторного контура.

Если сравнивать вторичный элемент ЛАД с ротором асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором обычного исполнения, то можно заметить, что в начальный момент пуска у них происходят в какой-то мере сходные физические явления [8, 9]. Причем, с возрастанием мощности линейного асинхронного двигателя эти явления проявляются все больше [10].

В процессе работы активное и индуктивное сопротивления роторного контура изменяются, что можно учесть введением поправочных коэффициентов [11]. Это уточнение позволяет внести поправку в пусковые характеристики асинхронного двигателя.

На значение поправочных коэффициентов влияет изменение температуры, поскольку исследуемый асинхронный двигатель интенсивно нагревается при работе. Исследование этого изменения поможет определить точные значения параметров роторного контура.

Если допустить, что удельное сопротивление во вторичном элементе неизменно во всех тепловых режимах работы и температура неизменна, то предварительные значения коэффициентов  $K_R$  и  $K_X$  вычислить легко [8-10, 12-14]. Но в условиях реальной эксплуатации части линейного асинхронного двигателя имеют различную температуру, поэтому данные предположения не соблюдаются.

Значения поправочных коэффициентов  $K_R$  и  $K_X$  можно определить по следующим методам.

Метод Гельмгольца, представляющий собой численный метод решения дифференциального уравнения. При синусоидальном изменении напряженности электрического и магнитного полей, данное уравнение хорошо описывает, как в проводящей среде распространяется плоская волна. В основе метода Гельмгольца лежит разностная трехточечная схема [15], по которой рассчитываются  $K_R$  и  $K_X$  [12-14].

Метод магнито-связанных контуров [9].

Следует отметить, что описанные выше методы используют ряд допущений, относящихся к линейным асинхронным двигателям.

Таким образом, механические характеристики ЛАД можно уточнить путем решения взаимосвязанных электромагнитных и тепловых задач. Для расчета распределения температуры по вторичному элементу необходимо составить и решить уравнение теплового баланса [16], а для расчета распределения токов обычно используют метод Гельмгольца.

Целесообразнее всего эту задачу решить численными методами, поскольку аналитический способ довольно сложен. Также, для более точного расчета статических механических характеристик ЦЛАД можно применять методику, разработанную на основе уравнений Максвелла [4].

В зависимости от уровня допущений, которые влияют на сложность вычислений, динамические режимы работы ЛАД можно исследовать различными моделями [4-7, 17]. Очень хорошо себя зарекомендовал метод системы Парка-Горева [5-7, 11, 17]. Этот метод позволяет проследить зависимость от параметров двигателя электромагнитных, электромеханических и тепловых процессов, а для расчетов используют предварительно определенные по инженерным расчетам схемы замещения. Поэтому данный метод был использован в настоящей работе для исследования динамических режимов ЛАД. Для математического моделирования был использован программный продукт Mathlab Simulink.

Питание линейного асинхронного двигателя от регулируемого преобразователя частоты позволяет улучшить его характеристики. Для дальнейшего повышения качества общих энергетических характеристик двигателя, необходимо использовать рекуперативный метод торможения, а с помощью изменения частоты по требуемому закону можно уменьшить потери на переходные процессы при пуске двигателя. Пусковые характеристики ЦЛАД при питании от преобразователя частоты представлены на рисунках 3 и 4.

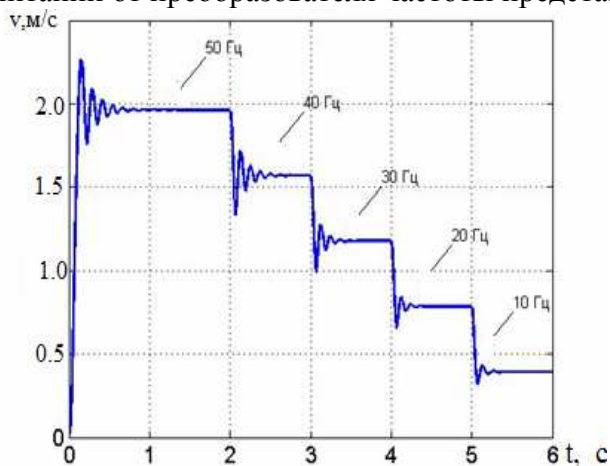


Рис. 3. Пуск ЦЛАД на холостом ходу, зависимость скорости от времени

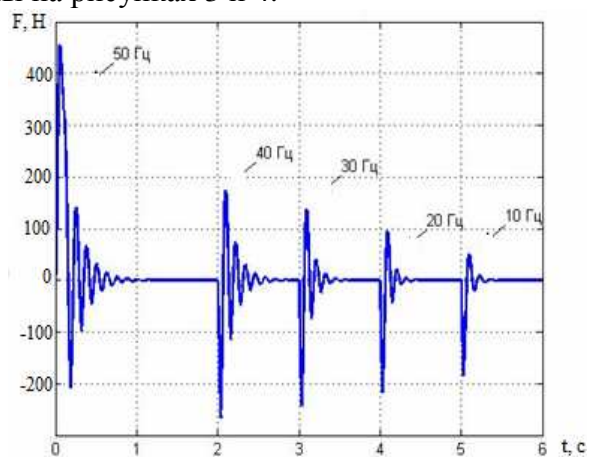


Рис. 4. Пуск ЦЛАД на холостом ходу, зависимость тягового усилия от времени

**Выводы**, которые можно сделать по результатам расчетно-теоретических исследований тепловых характеристик линейного асинхронного двигателя, следующие:

- в поперечном направлении и вдоль индуктора температура нагрева обмотки распределяется равномерно;

- в центре паза располагается точка с самой высокой температурой, отсюда же практически равномерно во все стороны распространяются тепловые потоки;

- правильность схемы распределения тепловых потоков, принятой в математической модели подтверждается при помощи анализа распределения температуры нагрева в индукторе;

- в одинаковых в тепловом отношении условиях находятся внутренние пакеты стали сердечника индуктора, в крайних пакетах условия охлаждения немного лучше;

- при исследуемых режимах работы температура крайних пакетов сердечника в продольном и поперечном направлении ниже, чем у внутренних, на 4-10%. Если линейная нагрузка индуктора возрастает, то перепад температур перегрева достигает 15-20%;

- потери мощности в стали индуктора определяются частотой питающего напряжения (рис. 5), индукцией в зубцах и спинке индуктора, а также маркой стали.

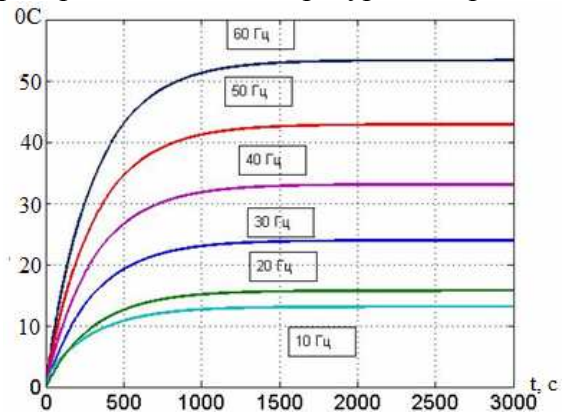


Рис. 5. Влияние частоты питающего напряжения на превышение температуры сердечника индуктора над окружающей средой при постоянной нагрузке

При производстве пиломатериалов и контроле их геометрических размеров на современных обрешных станках приводы должны обеспечивать перемещение рабочего органа с заданной точностью. Поэтому к ним предъявляются требования, обеспечивающие повышение статистических и динамических характеристик: обеспечить высокую точность позиционирования рабочего органа, реализовать качественные переходные процессы (пуск, реверс, торможение), улучшить устойчивость к воздействию внешних возмущений.

Преимущество линейных электроприводов – значительные диапазоны регулирования скорости и высокая точность позиционирования. Тем не менее, магнитные системы двигателя и силовой электроники не являются линейными элементами. Нелинейная зависимость усилия двигателя от тока и положения подвижной части приводит к неточности позиционирования. Этим обусловлено снижение стабильности движения на низких скоростях перемещения (доли мм/с). При быстрых скоростях (более 10 м/с), причинами снижения усилия становятся потери в стали и насыщение инвертора. В целом, погрешность позиционирования накапливается за счет суммирования погрешности электропривода и пильного механизма станка.

Собственную погрешность линейного электродвигателя можно рассчитать, используя следующую формулу:

$$\delta = \frac{\sin\left(\frac{8\pi x_3}{\tau}\right)}{\frac{\lambda_1 F_1}{4\lambda_0 F_2} - 2 \cos\left(\frac{8\pi x_3}{\tau}\right)}, \quad (1)$$

где  $\tau$  – величина полюсного деления линейного двигателя;  $x_3$  – заданное положение подвижного элемента линейного двигателя;  $F_1$  – амплитудное значение МДС обмотки статора;  $F_2$  – амплитудное значение МДС вторичного элемента;  $\lambda_0$  – постоянная составляющая магнитной проводимости воздушного зазора;  $\lambda_1$  – амплитудное значение переменной составляющей магнитной проводимости воздушного зазора.

Эту формулу с достаточной степенью точности в рамках расчетно-теоретических исследований можно использовать и для других типов линейных двигателей – линейного индукторного двигателя с электромагнитным возбуждением и линейным индукторным



двигателем с постоянными магнитами. Этот вывод можно сделать, опираясь на постулаты математического моделирования электрических машин.

**Экспериментальные исследования.** В результате проведения экспериментальных исследований требуется получить зависимость выходной величины эксперимента  $Y$  – погрешности размера (отклонения от заданной ширины доски) от следующих управляемых варьируемых факторов:  $A$  – задаваемой ширины доски (6 уровней),  $B$  – направления движения доски при распиле (2 уровня: вперед и назад),  $C$  – наличия нагрузки при работе двигателя (2 уровня: холостой ход и ход с нагрузкой). Актуальность таких факторов, как подача на зуб, жесткость, толщина, шаг зубьев, высота пропила, скорость и т.п., указана в работе [18].

Экспериментальная установка (рис. 6) состоит из линейного асинхронного двигателя 1, преобразователя частоты (ВЕСПЕР EI-9011-025), измерительной аппаратуры (инкрементальный энкодер E30S4-200-6-L-5), груза 3, моделирующего пильный суппорт и персонального компьютера.

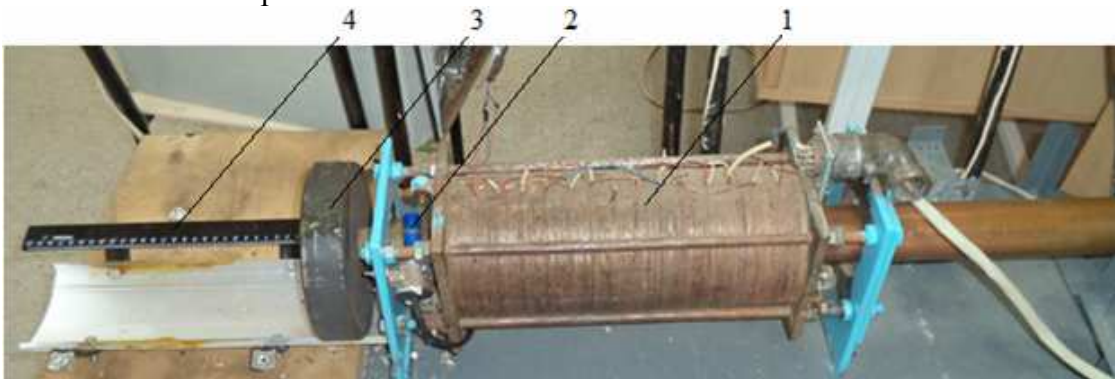


Рис. 6. Экспериментальная установка: 1 – линейный двигатель; 2 – датчик(энкодер); 3 – груз; 4 – измерительный инструмент

В ходе проведения экспериментальных исследований решали задачу по определению факторов, влияющих на величину точности позиционирования линейного асинхронного двигателя. В ходе проведения эксперимента было выполнено два вида исследований: измерение скорости перемещения вторичного элемента ЛАД при изменении частоты питания, ширины доски и направления движения; измерение точности позиционирования линейного двигателя в зависимости от частоты питания, ширины доски и направления движения. Для отыскания области оптимума, ограниченной значениями факторов, внутри которой можно определить наименьшее (оптимальное) значение функции отклика, использовали пошаговое движение в направлении градиента. На рисунке 7 представлена экспериментальная зависимость погрешности  $Y$  от ширины доски и регрессионная кривая  $y = \hat{Y}(x_1)$ . При любых уровнях факторов наблюдается рост значения погрешности  $Y$  при увеличении ширины доски.

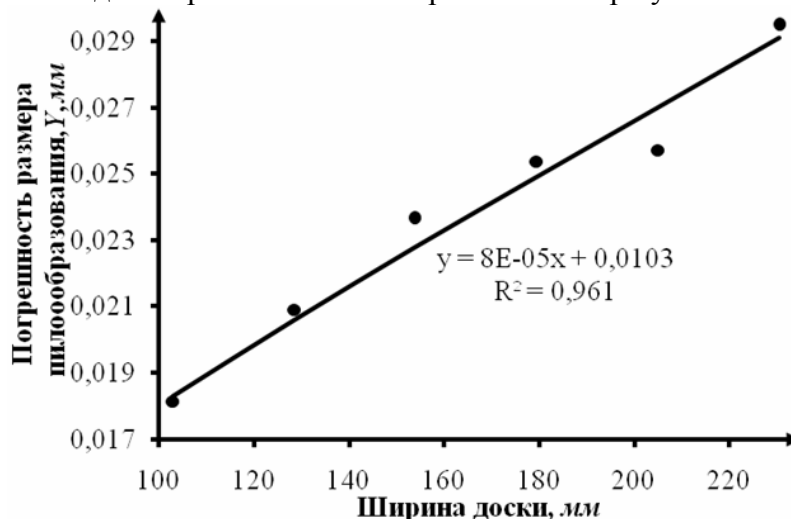


Рис.7. Корреляционная зависимость погрешности размера пилообработки от ширины доски

Согласно экспериментальным данным установлено, что отклонение погрешности размера или точность позиционирования исследуемого линейного двигателя во всех рассмотренных случаях не превышает 0,3 мм, что согласуется с допусками на ширины пиломатериалов, регламентируемыми нормативными документами. На практике на точность позиционирования следует учитывать влияние вибрации, связанной с вращением пилы.

### **Результаты**

Дальнейшее совершенствование и разработка новых рациональных способов раскря определяется созданием рекомендаций по разрезанию пиломатериалов на лесопильном оборудовании. Как правило, параметры поставок непостоянны, поэтому технологическая линия производства, в состав которой входят исполнительные механизмы, должна автоматически подстраиваться к изменяющимся условиям работы.

Совершенствование технологических процессов обрезки приводит к автоматизации выбора оптимального варианта раскря необрезных досок и максимально точному управлению перемещением подвижных пил обрезных станков ( $\pm 0,5 \dots 1$  мм) за определенное время.

Использование линейного электропривода исключает промежуточные звенья системы управления.

Наиболее высокими технико-экономическими показателями среди низкоскоростных двигателей обладают цилиндрические АД, которые позволяют оптимально тормозить вторичный элемент и точно его останавливать. Использование ЦАД упрощает конструкцию привода суппорта обрезного станка, повышает скорость и улучшает регулирование, реализует неограниченные перемещения.

Для получения более точных результатов расчета статических и динамических характеристик линейного электропривода пильного суппорта обрезного станка следует учитывать тепловые процессы и изменения параметров схемы замещения.

С учетом особенностей характеристик исследуемого пиловочного сырья и применяемых технологий и оборудования разработаны технологические требования для системы позиционирования суппорта обрезного станка от параметров линейного асинхронного двигателя. Рассмотрены изменения характеристик выхода пиломатериалов в зависимости от сочетаний толщин тонких и толстых досок. Установлено, что к наименьшей ширине обрезной доски, учитывая припуск на ее усушку по номинальной ширине, приводит максимальная длина вторичного элемента ЛАД.

Установлено, что факторами, влияющими на точность позиционирования электропривода пильного суппорта на основе линейного асинхронного двигателя, являются: тип применяемого двигателя, тип системы управления, геометрическая точность сопряженных поверхностей и базирование; масса, скорость и ускорение вторичного элемента линейного двигателя; точность установки шкал измерительной системы и её техническое состояние; деформация механизма подачи под воздействием динамических сил; температурную деформацию из-за нагрева.

Сформулированные требования были учтены при разработке экспериментальной установки. На ней была отработана методика исследований для определения точности позиционирования привода перемещения суппорта обрезного станка с прямолинейным возвратно-поступательным движением от линейного электродвигателя, были изучены режимы управления и параметры движения.

### **Заключение**

Спроектированная и изготовленная система управления учитывает требования, предъявляемые к обрезке пиломатериалов. Программные режимы работы экспериментальной установки отработаны в полной мере с учетом основных технологических факторов производства.

Проведены экспериментальные исследования точности позиционирования, разработаны основные требования к приводу перемещения пильного суппорта обрезного станка, осуществляющему базирование, заданное перемещение на требуемую ширину в зависимости от скорости и времени перемещения.

### Список литературы

1. Аксенов П.П. Технология пиломатериалов. – М.: Гослесбумиздат, 1963. – 579 с.
2. Песоцкий А.Н. Лесопильное производство. – М.: Лесн. пром-сть, 1970. – 432 с.
3. Боровиков А.М. Качество пиломатериалов. – М.: Лесн. пром-сть, 1990. – 256 с.
4. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
5. Соколов М.М., Сорокин Л.К. Электропривод с линейными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 136 с.
6. Аипов Р.С. Линейные электрические машины и приводы на их основе. – Уфа: БГАУ, 2003. – 202 с.
7. Алексеев А.Е., Емельянов В.П., Маркин Н.И., Петухов С.В. Линейный электропривод производственных механизмов и машин: Монография. – Архангельск: АГТУ, 2009. – 230 с.
8. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины (в двух томах). – СПб.: Питер, 2006. – Т. 1. – 320 с.; 2007. – Т. 2. – 352 с.
9. Богуславский И.З. Поверхностный эффект в стержнях ротора мощного асинхронного двигателя с учетом распределения в них температуры // Электричество. – 1981. – №9. – С. 69-71.
10. Стадник И.П., Филиппов Д.М. Аналитическое решение задачи расчета вихревых токов и тягового усилия линейного асинхронного электродвигателя // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2012. – Т. 1, № 72. – С. 11-16.
11. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шымчак П. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – 236 с.
12. Богуславский И.З., Кришьянис М.В. Активное и индуктивное сопротивление трапецидальных стержней клетки мощного частотно-регулируемого двигателя // Электротехника. – 2006. – №8. – С. 7-10.
13. Богуславский И.З., Кришьянис М.В. Метод расчета поверхностного эффекта в стержне клетки ротора с учетом изменения в нем температуры при пуске // Электротехника. – 2008. – №3. – С. 24а-30.
14. Богуславский И.З., Кришьянис М. В. Поверхностный эффект в стержнях ротора мощного асинхронного двигателя с учетом изменения в них температуры при пуске. // Проблемы создания и эксплуатации новых типов электроэнергетического оборудования: сб. науч. тр. – СПб.: Российская академия наук, отдел электроэнергетических проблем РАН. – 2006. – Вып. 7.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Пер. с англ. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
16. Гуревич Э.И., Рыбкин Ю.Л. Переходные тепловые процессы в электрических машинах. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 216 с.
17. Аипов Р.С. Основы построения и теории линейных асинхронных приводов с упругими накопителями энергии. Уфа: БГАУ, 2006. – 295 с.
18. Пижурич А.А., Пижурич А.А. Основы научных исследований в деревообработке. – М.: Московский государственный университет леса, 2005. – 305 с.

### References

1. Aksenov P.P. Lumber technology. – M.:Goslesbumizdat, 1963. – 579 p.
2. Pesotsky A.N. Sawmill production. – M.: Forestry industry, 1970. – 432 p.
3. Borovikov A.M. Quality of sawn timber. – M.: Forestry industry, 1990. – 256 p.
4. Veselovsky O.N., Konyaev A.Yu., Sarapulov F.N. Linear induction motors. – M.: Energoatomizdat, 1991. – 256 p.
5. Sokolov M.M., Sorokin L.K. Electric drive with linear motors. – M.: Energy, 1974. – 136 p.
6. Aipov R.S. Linear electrical machines and drives based on them. – Ufa: BSAU, 2003. – 202 p.
7. Alekseev A.E., Emelyanov V.P., Markin N.I., Petukhov S.V. Linear electric drive of production mechanisms and machines. Monograph. – Arkhangelsk: ASTU, 2009. – 230 p.
8. Voldek A.I., Popov V.V. Electric machines (in two volumes). – SPb.: Peter, 2006. – Vol. 1. – 320 p.; 2007. – Vol. 2. – 352 p.
9. Boguslavskii I.Z. The skin-effect in the powerful induction motor rotor bars according to temperature distribution in their // Electricity. 1981, no. 9, pp. 69-71.
10. Stadnik I.P., Filippov D.M. Analytical solution of the problem of calculating eddy currents and tractive effort of a linear induction motor //Bulletin of the KrNU named after Mikhail Ostrogradsky. 2012, vol. 1, no. 72, pp. 11-16.
11. Sarapulov F.N., Sarapulov S.F., Shymchak P. Mathematical models of linear induction machines based on equivalent circuits. – Yekaterinburg: USTU, 2001. – 236 p.
12. Boguslavsky I.Z., Krisjanis M.V. Active and inductive resistance of trapezoidal rods of the cage of a powerful frequency-controlled motor // Electrical engineering. 2006, no. 8, pp. 7-10.
13. Boguslavsky I.Z., Krisjanis M.V. Method of calculating the surface effect in the rotor cage rod taking into account the temperature change in it at start-up // Electrical engineering. 2008, no. 3, pp. 24a-30.
14. Boguslavsky I.Z., Krishyanis M. V. Surface effect in the rotor rods of a powerful asynchronous motor, taking into account the temperature changes in them during start-up. // Problems of creation and operation of new types of electric power equipment: collection of scientific tr. – St. Petersburg: Russian Academy of Sciences, Department of Electric Power Problems of the Russian Academy of Sciences. – 2006. – Issue 7.
15. Korn G., Korn T. Handbook of mathematics. – M.: Science, 1970. – 720 p.



16. Gurevich E.I., Rybkin L. Yu. Transient thermal processes in electrical machines. – Leningrad: Energoatomizdat, 1983. – 216 p.
17. Aipov R.S. Fundamentals of construction and theory of linear asynchronous drives with elastic energy storage. – Ufa: BSAU, 2006. – 295 p.
18. Pizhurin A.A., Fundamentals of scientific research in woodworking. – M.: Moscow State University of Forest, 2005. – 205 p.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Алексеев Александр Евгеньевич</b> – доктор технических наук, профессор кафедры технического инжиниринга	<b>Alekseev Aleksandr Evgenievich</b> – doctor of technical sciences, professor, Professor of the department of technical engineering
<b>Петухов Сергей Васильевич</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	<b>Petukhov Sergey Vasilievich</b> – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of electricity and electrical engineering
<b>Баланцева Наталья Борисовна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	<b>Balantseva Natalya Borisovna</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of electricity and electrical engineering
<b>Калиничева Оксана Александровна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	<b>Kalinicheva Oksana Aleksandrovna</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of electricity and electrical engineering
<b>Радюшин Вячеслав Витальевич</b> – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	<b>Radyushin Vyacheslav Vitalievich</b> – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of electricity and electrical engineering
<b>Бабкин Игорь Михайлович</b> – кандидат химических наук, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники	<b>Babkin Igor Mikhailivich</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of electricity and electrical engineering
<b>Кришьянис Майя Волдемаровна</b> – старший преподаватель кафедры электроэнергетики и электротехники	<b>Krishyanis Maya Voldemarovna</b> – senior lecturer of the Department of electricity and electrical engineering
v.radyushin@narfu.ru	

Получена 06.04.2023