

УДК 621.313.13

**А.С. Шилоносков, Ф.Е. Гиндис, С.В. Шутемов, Б.В. Кавалеров**  
Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВАХ**

В данной статье рассматривается опыт использования линейных электрических двигателей в мехатронных устройствах и робототехнике. Исследование этой информации помогло подтвердить возможность замены электропривода традиционного вращательного действия на линейный электропривод. Этот электропривод намечен для использования в устройстве обработки поверхностей робототехнического комплекса. Предлагаемая структура этого устройства представлена в статье. Представленные в статье результаты являются частью научно-исследовательских работ, проводимых студентами на кафедре электротехники и электромеханики.

**Ключевые слова:** линейный электродвигатель; робот; мехатронная система; синхронный двигатель; асинхронный двигатель; линейный асинхронный двигатель; линейный шаговый двигатель; привод

**A.S. Shilonosov, F.E. Gindis, S. V. Shutemov, B. V. Kavalero**  
Perm national research Polytechnic University, Perm

## **USE OF LINEAR ELECTRIC MOTORS IN MECHATRONIC DEVICES**

This article discusses the experience of using linear electric motors in mechatronic devices and robotics. The study of this information helped to confirm the possibility of replacing the traditional rotary electric drive with a linear electric drive. This electric drive is intended for use in the surface treatment of a robotic complex. The proposed structure of this device is presented in the article. The results presented in the article are part of the research work carried out by students at the Department of electrical engineering and electromechanics.

**Keywords:** linear electric motor; robot; mechatronic system; synchronous motor; asynchronous motor; linear asynchronous motor; linear stepper motor; drive

**Введение.** В настоящее время в нашей стране и за рубежом большое внимание уделяется использованию линейных электродвигателей в мехатронных устройствах и в робототехнических комплексах. В частности на кафедре электротехники и электромеханики ПНИПУ проводятся научно-исследовательские работы по созданию линейных электроприводов для робототехнического комплекса. Материалы настоящей статьи подготовлены при выполнении данных исследований. Преимущества использования линейных электродвигателей возвратно-поступательного движения хорошо известны. В сравнении с традиционными электродвигателями вращательного действия

сокращаются затраты на передаточные механизмы, а, следовательно снижается стоимость изделий и повышается их надежность.

На протяжении многих лет человечество живет на основе механических устройств. Без них мы бы не смогли существовать и, в принципе, двигаться вперед. Ведь большей частью не создаются новые электротехнические устройства, а совершенствуются те, которые мы имеем сегодня. Безусловно, это касается и линейных электродвигателей. В данной статье мы представили материалы об использовании линейных электродвигателей в различных мехатронных устройствах. Можно не сомневаться, что развитие этой сферы в электротехнике в скором времени приведет человечество к новым открытиям. Рассмотрим как используют линейные электродвигатели в мехатронных устройствах, а затем сделаем выводы о применимости этих методов и технологий для решения поставленной в проводимых научных исследованиях задачи. Кратко представим описание станка, для которого выбирается и проектируется линейный электродвигатель.

**Примеры использования линейных электрических двигателей в различных мехатронных устройствах.** Рассмотрим механизм работы линейного электродвигателя мехатронного токарного модуля [1].

Данные модули распространены в токарном оборудовании. Какой линейный двигатель используется? В мехатронном модуле применяется линейный двигатель магнитоэлектрического типа. Такой модуль эксплуатируется в качестве привода перемещения резца для обработки сложных профилей вращения. Как работает модуль? Мехатронный токарный модуль выполняет сложную задачу – обеспечение подачи резца одновременно с вращением заготовки, поэтому станок выполняет сразу три технологических операций, выполняя чистовую обработку поршня по замкнутому циклу: производство бочки поршня в аксиальном направлении; создание эллипса поршня в диаметральном направлении; создание каналов под проектировку поршневых колец модуля. Управление линейного модуля осуществляется на основании математической модели в программной среде MATLAB [1].

Рассмотрим магнитоэлектрический линейный двигатель мехатронного модуля осей подачи [2]

Применяется он в производстве металлорежущих станков, в роботах и в технических машинах. Используется линейный двигатель магнитоэлектрического типа. Что он делает? Выполняет перемещение резца под углом  $90^\circ$  оси вращения поршня. Управление осуществляется с помощью мгновеннодействующих цифровых систем электрического привода и систем числового автоматического регулирования, а также с помощью комплексной базы знаний интегрирования линейных двигателей подачи [2].

Рассмотрим (рисунок 1) робот, работающий на основе линейного шагового двигателя с магнито-воздушным подвесом с одним и двумя индукторами [3]

Используется при выполнении сложных функций в организации сборочного производства. Применяется линейный шаговый двигатель с магнито-воздушным подвесом с одним и двумя индукторами. Что он делает? На нижнем

ярусе плиты зафиксированы сборочные детали и питатели, в кассетах которых находятся устанавливаемые детали. Верхний ярус плиты стандартизирован ЛШД (линейный шаговый двигатель). По нему передвигаются на магнитовоздушной подушке в горизонтальном направлении два ИМ (исполнительных механизма), на индукторах находятся двигатели вертикального хода со схватами, которые фиксируют детали в питателях и устанавливают их на изделия [3].

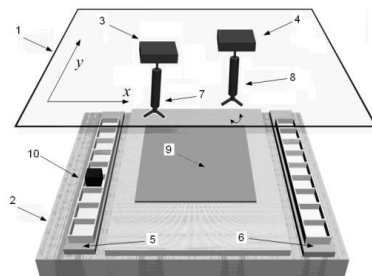


Рисунок 1 – как выглядит двухиндукторный робот [3]

Рассмотрим мехатронный модуль линейного перемещения с пневматическим приводом [4]. Пневматический привод может рассматриваться как альтернатива электроприводу.

Применяется широко и успешно в промышленности. Что он делает? Для того, чтобы изменить шток с исходными условиями, пневматический привод определяет местоположение этого штока. Тормозное действие привода осуществляется за счет электромагнитного тормозного устройства. Системы управления приводом создано на базе модулей *RealLab*, а моделирование работы привода проведено в системе MATLAB [4].

Рассмотрим устройства, которые обрабатывают металл с помощью вращательных передвижений, и саморегулирующие технические средства мехатронных модулей линейных перемещений [5].

Применяется при производстве на металлообрабатывающих станках. Используются мехатронные модули линейных и вращательных перемещений металлообрабатывающих станков. Что он делает? Человек может воспользоваться обновленными станочными узлами привода без его непосредственного вмешательства, так как устройство выполнит работу за человека для режущих материалов и оборудования на базе интеграции средств прецизионной механики, электроники, электротехники [5].

Рассмотрим электропривод с линейными двигателями по [6]

Применяется для конструкторов рабочих машин и производства транспортных средств. Используется линейный асинхронный двигатель.

Что он делает? Принцип работы. Возьмем в заданной плоскости статор электрического двигателя переменного тока. Важное условие, что магнитные силы статора будут передвигаться параллельно плоскости статора, имеется в виду, что появятся не крутящееся, а быстро перемещающееся ЭМП (электромагнитное поле) статора. Добавочная часть – это ферромагнитная полоса, находящаяся с малым воздушным зазором вдоль плоскости статора. Полоса – это важ-

ный момент КЗ (короткозамкнутого) ротора. Добавочная часть следует с движущимся полем статора и передвигается со малой скоростью, по сравнению перемещения поля статора на линейное абсолютное скольжение [6].

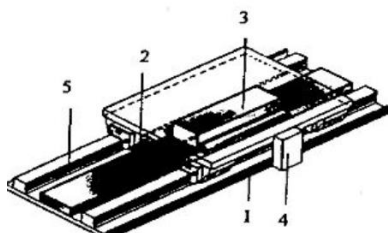


Рисунок 2 – конструкция линейного однокоординатного устройства, преобразующего энергию в механическую работу. [6]

Обратим также внимание на управляемую электромеханическую систему с линейными электродвигателями [7]. Она функционально очень близка устройству, которое нами проектируется, и будет рассмотрено в следующей части нашей статьи.

Данная система [7] используется в изготовлении элементов подъемно-транспортных машин, механизмов подачи станков, которые обрабатывают металл, для молотов, для кузнечных прессов. Как известно инженерам, линейные двигатели могут быть разного вида, это: двигатели постоянного тока, асинхронные и синхронные.

Магнитное поле, перемещающееся вдоль зазора, пересекает проводники обмотки 2 вторичного элемента и индуцирует в них ЭДС, под действием которой по обмотке начнут проходить токи. Токи начнут проходить, как раз за счет созданного ЭДС. Появляется сила, из-за взаимного действия проходящих токов, имеющая воздействие на вторичный элемент по закону Э.Х. Ленца в направлении передвижения магнитного поля. Вторичный элемент под действием этой силы начнет перемещаться со скольжением по отношению к магнитному полю, как и в обычном АД (асинхронный двигатель).

Показанная на рисунке 3, б конструкция представляет собой ЛАД (линейный асинхронный двигатель) с односторонним статором и вторичным элементом одного с ним размера. В зависимости от назначения ЛАД его вторичный элемент может быть длиннее статора или короче его. В первом случае ЛАД получили название двигателей с коротким статором, а во втором случае – с коротким вторичным элементом.

Вторичный элемент ЛАД не всегда снабжается обмоткой. Часто (и в этом одно из больших достоинств ЛАД) в качестве вторичного элемента используется лист, полоса или рельс, выполненные из стали, меди или алюминия. Такой вторичный элемент может устанавливаться между двумя статорами (ЛАД с двусторонним статором) или между статором и ферромагнитным сердечником (ЛАД с односторонним статором и сердечником). Линейный двигатель со вторичным элементом в виде полосы аналогичен обычному АД с массивным ферромагнитным ротором.

Плюс обмотки статора ЛАД имеют те же самые соединения, что и обычные АД, и подключаются к сети трехфазного переменного тока [7].

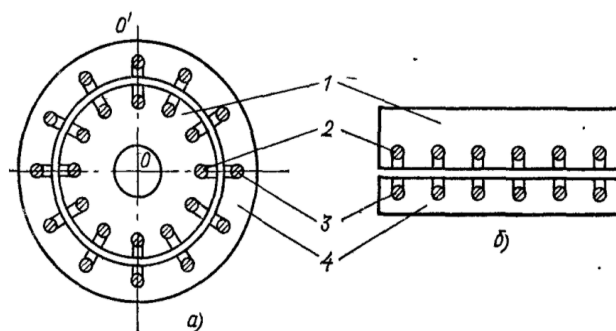


Рисунок 3 – конструктивная схема электропривода с линейными электродвигателями [7].

Рассмотренные варианты использования линейных электродвигателей позволили сделать вывод о том, что и для разрабатываемого устройства обработки поверхностей также может подойти подобный электрический двигатель. Рассмотрим возможный вариант конструкции такого устройства.

#### **4. Использование линейного электродвигателя для робототехнического комплекса по созданию функциональных материалов с новыми свойствами**

В настоящее время кафедра электротехники и электромеханики выполняет научно-исследовательскую работу по разработке и созданию линейного электродвигателя для робототехнического комплекса. Этот робототехнический комплекс служит для обработки поверхностей различных изделий с целью придания им необходимых свойств. Традиционно такие станки строятся с использованием электродвигателей вращательного действия. Но кафедра электротехники и электромеханики имеет богатый опыт создания линейных электродвигателей различного назначения. Например, в рамках постановления Правительства №218 был разработан и создан опытный образец линейного двигателя для выкачивания нефти. Для этого двигателя была разработана система управления. Создан испытательный стенд.

Поэтому, имея такой задел, на кафедре в настоящее время разрабатывается линейный электропривод для робототехнического комплекса в рамках государственного задания.

Именно с этой целью и был предпринят поиск по литературным источникам различных вариантов реализации линейного электропривода для мехатронных устройств различного назначения [1–7]. В первой части настоящей статьи эти материалы были представлены.

С использованием этих материалов произведена разработка структурной схемы для нового электропривода, используемого в устройстве доводки плоскостей робототехнического комплекса (рисунок 4).

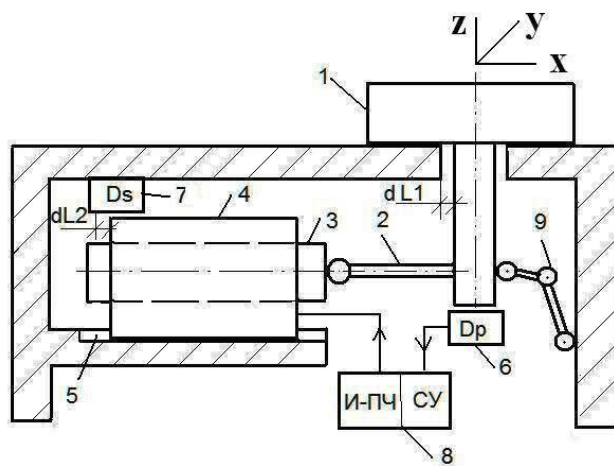


Рисунок 4 – устройство для доводки плоскостей

На рисунке обозначено: 1 – притир, 2 – толкатель, 3 – ротор линейного двигателя (4) возвратно-поступательного движения по оси X, паз 5 станины станка, корпус 4 линейного двигателя, датчики Dp 6 и Ds 7, систему управления (СУ) инвертора 8, питающего статор линейного двигателя 4.

По оси Y в перпендикулярном направлении второй линейный двигатель, связанный через второй толкатель  $2_y$  с ротором  $3_y$  второго линейного двигателя  $4_y$  возвратно-поступательного движения по оси Y, паз  $5_y$  станины станка, корпус  $4_y$  второго линейного двигателя, датчики Dp  $6_y$  и Ds  $7_y$ , два инвертора 8, два электродвигателя 4, пантограф 9.

Амплитуды  $dL1$  и  $dL2$  перемещения притира 1 и корпуса 4 линейного двигателя измеряются соответственно датчиками Dp и Ds, сигналы которых обрабатываются по программе системы управления СУ инвертора 8, питающего статор линейного двигателя 4.

Представленная на рисунке 4 конструкция устройства с линейными электродвигателями может быть рекомендована к разработке, поскольку в настоящее время, как об этом свидетельствуют многочисленные публикации [1–7], все более широко применяется линейный электропривод для различных устройств и систем.

Задачей новой конструкции (рисунок 4) является упрощение механической системы передачи энергии за счёт использования двух линейных электродвигателей возвратно-поступательного движения с питанием соответственно от двух инверторов с регулируемой частотой, с регулируемой амплитудой колебаний притира.

Новая конструкция создана следующим образом. Она получается, если взять за основу традиционное устройство, содержащее дисковый притир 1, приводимый за счёт планетарной передачи и двух вращающихся электродвигателей,

и в новом устройстве притир 1 жёстко связать через толкатель 2 с ротором 3 линейного электродвигателя 4 возвратно-поступательного движения, статор которого двигается по продольной оси X в пазу 5. При этом притир и корпус двигателя 4 двигаются в противоположных направлениях ( $dL1$ ,  $dL2$ ), измеряемых датчиками  $Dp$  6 и  $Ds$  7, сигналы которых обрабатываются в СУ инвертора 8, питающего статор линейного двигателя 4.

**Благодарность.** Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по государственному заданию FSNM-2020-0028.

**Заключение.** В заключении можно сказать, что в статье были исследованы различные варианты использования линейного электродвигателя. Собраны данные о разновидностях линейных двигателей. Рассмотрены способы применения линейных двигателей в роботах и мехатронных системах.

Изучив рассмотренную литературу отечественных и зарубежных авторов, а также патенты и технические материалы различных проектных организаций, можно сделать вывод о том, что линейный двигатель на сегодняшний день является перспективным звеном в робототехнике и мехатронных системах, ввиду большой потребности в линейно-поступательном движении.

Этот вывод помог обосновать схему замены традиционного электродвигателя вращательного действия на линейный электропривод в устройстве доводки плоскостей (рисунок 4) для робототехнического комплекса, над созданием которого в настоящее время работают преподаватели, сотрудники и студенты кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета.

### Список литературы

1. Бочкарев А., Бородин О., Петунин Ю. Линейный электродвигатель мехатронного токарного модуля // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2015. №4. С. 51-57.
2. Бочкарев А., Петунин Ю. Магнитоэлектрический линейный двигатель мехатронного модуля осей подачи // Инновационная наука. 2016. №2. С. 16-19.
3. Готлиб Б. М., Вакалюк А. А. Введение в специальность «Мехатроника и робототехника»: курс лекций / Ур. гос. ун-т путей сообщения. Екатеринбург, 2012. 134 с.
4. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение: учеб, пособие для студентов вузов. Москва, 2006. 256 с.
5. Naveen Kuppuswamy<sup>1</sup>, Hugo Gravato Marques, Helmut Hauser<sup>1</sup>. Synthesising a Motor-Primitive Inspired Control Architecture for Redundant Compliant Robots // Mechanical and Process Engineering, 2012. №7. С. 96-97.
6. Бочкарев А. В. Система линейного прецизионного электропривода малых перемещений: дис. ... канд. техн. наук: 13.04.02 - электроэнергетика и электротехника: утв. 01.07.17. М., 2017. 150 с
7. Школа для электрика : электропривод с линейными двигателями, 2014. URL : <http://electricalschool.info/>. (дата обращения: 01.12.20)

### Сведения об авторах

**Шилоносков Артем Сергеевич** – студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, email: artemshilik@yandex.ru

**Гиндис Феликс Евгеньевич** – студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, email: mge1999@yandex.ru

**Шутемов Сергей Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «электротехники и электромеханики», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, email: shutemovsv@mail.ru

**Кавалеров Борис Владимирович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электротехники и Электромеханики», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, email: kbv@pstu.ru

### About the authors

**Shilonosov Artem Sergeevich** – student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, email: artemshilik@yandex.ru

**Gindis Felix Evgenievich** – student, Perm National Research Polytechnic University, Perm, email: mge1999@yandex.ru

**Shutemov Sergey Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, email: shutemovsv@mail.ru

**Kavalerov Boris Vladimirovich** – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University, Perm, email: kbv@pstu.ru