

# Проектирование и применение инновационных конструкций прямых линейных электроприводов в высокоточном машиностроительном оборудовании

**С. Ф. Яковлев,**  
к. т. н., доцент, начальник отдела  
e-mail: yakovlev@stankin.ru

**А. В. Костин,**  
аспирант  
e-mail: avtkostin@gmail.com



**В. А. Алексеев,**  
инженер 1-й категории  
e-mail: alekseevas@yandex.ru



**А. С. Мягих**  
инженер  
e-mail: Isarxl@yandex.ru

**Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (МГТУ «СТАНКИН»)**

*В статье рассмотрены перспективы и примеры применения прямых линейных электроприводов в высокоточном машиностроительном оборудовании. Предложена методика проектирования применения прямых линейных электроприводов на базе линейной синхронного электродвигателя, работающего в вентильном режиме. Показаны примеры применения прямых линейных электроприводов, созданных в результате выполнения НИОКР в МГТУ «СТАНКИН», и стендов исследования механических характеристик (СМХ), разработанных на их базе.*

**Ключевые слова:** прямой линейный электропривод, высокоточное машиностроительное оборудование, методика проектирования.

### **Использование прямых линейных электроприводов в машиностроительном производстве и станкостроении**

Современные технологии машиностроительных производств предполагают увеличение предельных требований по ускорению, скорости и точности позиционирования исполняемого объекта [1–3]. Одним из путей решения этих проблем может являться применение прямых линейных электроприводов (ПЛЭ) [4–6].

ПЛЭ находят применение во многих современных технологиях: машиностроении, робототехнике, лазерной технике, производстве микроэлектронной техники; транспортных системах и т. д.

Развитие ПЛЭ идет на базе интеллектуализации электромеханических и измерительных устройств с использованием современных цифровых методов управления. Можно сказать, что современные прецизионные ПЛЭ — это мехатронные устройства, где глубокая интеграция электромеханики, электроники и сенсорики дает новые качества воспроизведения движения.

Применение и производство ПЛЭ резко возросли во всем мире в 1990-е гг. К традиционным лидерам в этой области — компаниям из США, Японии, стран ЕЭС — присоединились производители из Юго-Восточной Азии. Крупные электро- и машиностроительные компании такие как «Siemens»; «Fanuc»; «Omron»; «Dukenmotoren»; «Рухсервомотор» и др. на-

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ

чали выпускать ПЛЭ и технологическое оборудование на их основе [7].

Основные достоинства ПЛЭ:

- максимально высокие показатели точности (до 0,00001 мм) и повторяемости;
- способность создавать больший момент (до 50000 Нм) и, как следствие этого, возможность развития значительных ускорений, в том числе под нагрузкой;
- устойчивость всех основных электромагнитных и механических характеристик во время работы;
- компактность, легкость и надежность конструкции (в ПЛЭ отсутствует трансмиссия и другие традиционные элементы — редукторы, механизмы передачи, муфты, подшипники редуктора, сальники, опорная рама и т. д.);
- вследствие отсутствия трущихся частей компоненты двигателя прямого привода не подвержены износу, а значит, заданная точность обеспечивается

на протяжении всего срока службы оборудования;

- низкие уровни шума и вибрации;
- простота и удобство монтажа;
- привод не нуждается в смазке и практически не требует технического обслуживания [8].

Специалисты заключают, что ПЛЭ является не только самым оптимальным преобразователем электрической энергии в механическое перемещение, но и самым надежным с технической точки зрения электродвигателем.

По прогнозам экспертов, к 2015 г. более 45% всех станков и в высокоточном машиностроительном оборудовании (ВМО) в мире будут оснащаться ПЛЭ.

Характерные примеры применения ПЛЭ в станках и в ВМО:

- комплексы лазерного раскроя модели «КС-3В «Навигатор» фирмы «VNITEP»; модели «МЛ35»

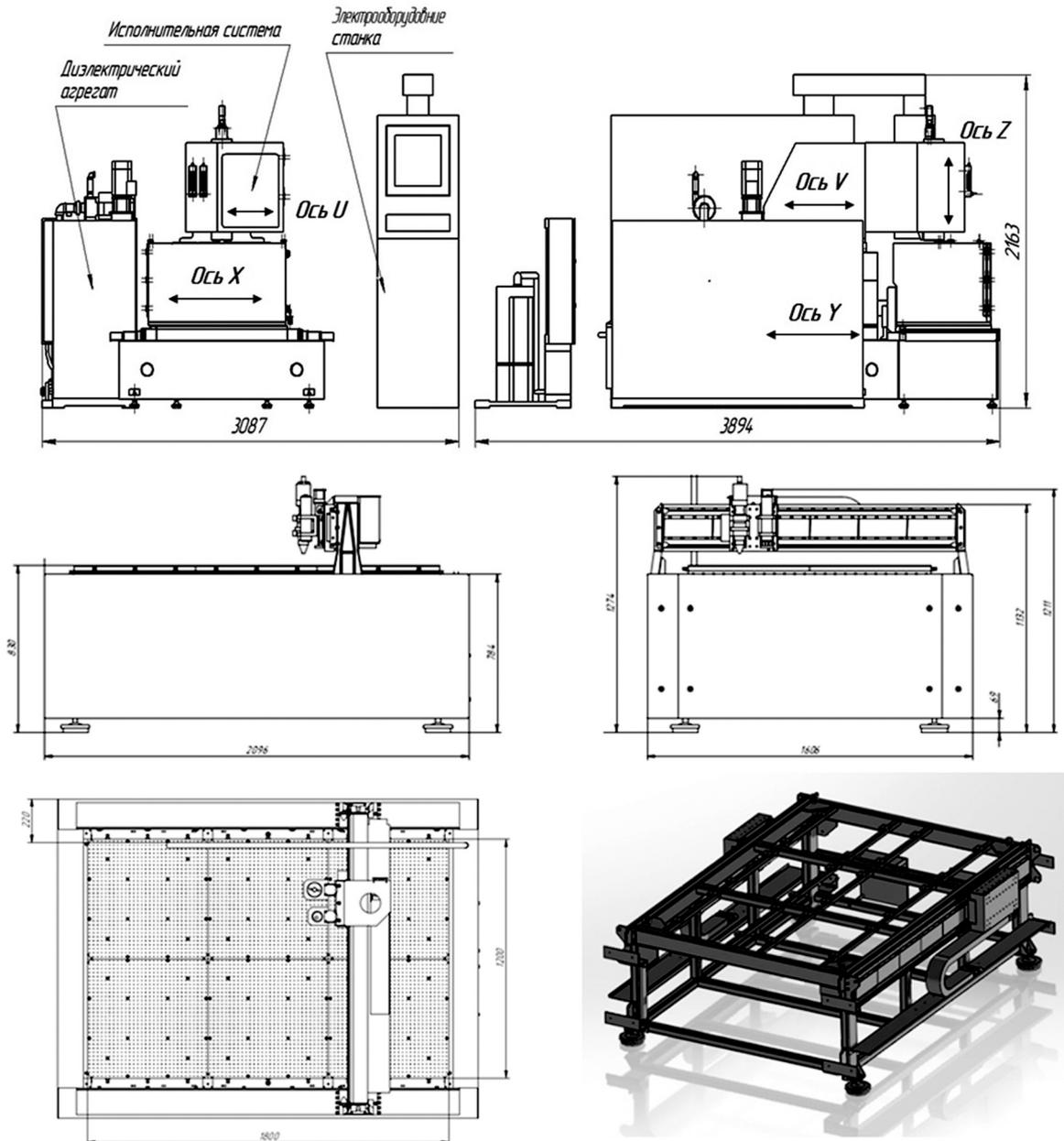


Рис. 1. Общий вид гаммы электроэрозионных станков и комплекса лазерного раскроя

фирмы «Esto»; модели «LaserCut-3015-3» фирмы ООО «Рухсервомотор»;

- фрезерный станок модели «HS650L» фирмы «Sodick» и четырехкоординатный фрезерно-гравировальный станок фирмы ООО «Рухсервомотор»;
- электроскоростной проволочно-вырезной станок модели «AQ327» фирмы «Sodick» [9].

Отдельного упоминания заслуживают разработки МГТУ «СТАНКИН» в которых нашли применение ПЛЭ. Всего ПЛЭ будут применены в 18 наименованиях станков и ВМО.

На рис. 1 приведены примеры общих видов гаммы электроэрозионных станков, разработанных в рамках НИОКР в МГТУ «СТАНКИН».

В ходе разработки перечисленного технологического оборудования в качестве приводов по осям  $X$  и  $Y$ , а также  $U$  и  $V$  применены отечественные, высокомоментные прецизионные ПЛЭ.

Перед современным машиностроением стоят задачи создания эффективных станков и ВМО, обладающих высокой производительностью, надежностью и точностью. Значительно повысить эти характеристики позволяет технологическое оборудование на базе механизмов с параллельной кинематикой («гексаподы»), в которых активно используются ПЛЭ. «Гексаподы» позволяют производить шестикоординатную обработку поверхностей. Высокое ускорение рабочего органа достигается за счет незначительности перемещаемых масс. Замкнутая кинематическая цепь обеспечивает более высокую жесткость всей конструкции и меньшие нагрузки на каждый ПЛЭ, это в свою очередь приводит к повышению точности позиционирования рабочего органа.

На мировом рынке данный класс техники в настоящее время тоже уже широко представлен. Разработкой и производством таких станков активно занимаются ведущие лидеры станкостроения, такие как «Ingersoll», «Giddings & Lewis» (США), «Geodetic Technology International» (Швейцария), «Hexel», «Toyota» (Япония), INDEX-Werke и др.

Обзор современного состояния станков и ВМО на базе ПЛЭ показал, что технологическое оборудование этого класса активно производится многими ведущими иностранными компаниями и востребовано на мировом рынке. Технические характеристики этого оборудования превосходят соответствующие характеристики станков обычной конструкции.

## Методика проектирования ПЛЭ на базе линейного синхронного электродвигателя (ЛСД)

При проектировании ЛСД, предназначенного для работы в режиме вентильного двигателя, важно обеспечить, наравне с высокими энергетическими и экономическими показателями, малое содержание внутренних возмущающих сил, ухудшающих точностные показатели электропривода. Это особенно важно, поскольку электропривод с ЛСД является прямым, т. е. не содержит механических преобразователей вращательного движения в поступательное, «маскирующих» возмущения нагрузки со стороны электродвигателя.

Для минимизации пульсаций силы желательно обеспечить максимальное приближение пространственного распределения магнитных полей в воздушном зазоре к синусоидальному. Для фазных обмоток хорошо известны и обоснованы три приема уменьшения высших гармоник магнитодвижущей силы статора с пазовой структурой:

- распределенная обмотка с целым числом пазов на полюс и фазу;
- укорочение шага;
- скос пазов [10].

Первые два приема напрямую связаны с конструкцией обмотки статора, а скос «пазов» может выполняться как на якоре, так и на системе возбуждения. Для уменьшения паразитных гармоник магнитного поля системы возбуждения с постоянными магнитами применяются различные приемы, в том числе подбор ширины магнита [11].

Свойства обмотки, связанные с формой пространственного распределения ее магнитодвижущей силы (далее — МДС), принято характеризовать отношением  $q$  количества пазов на полюс к количеству фаз и укорочением шага обмотки. Число  $q$  может быть целым, дробным больше единицы и дробным меньше единицы. Обмотки первых двух типов относительно хорошо изучены и широко применяются в «классических» типах электродвигателей переменного тока. Обмотки с  $q < 1$  известны давно, но имели ограниченное применение. В связи с развитием производства и применения вентильных двигателей для ПЛЭ, где часто требуется высокое значение электромагнитной силы, возник интерес к обмоткам с  $q < 1$  для ЛСД с большим числом пар полюсов. Выяснилось, что во многих случаях можно применить такие схемы обмотки из отдельных катушек, надеваемых на зубцы магнитопровода якоря без пересечения лобовых частей. Такие обмотки в отечественной литературе называются зубцовыми [12], а в англоязычной — сосредоточенными [10].

Обмотки с  $q < 1$  упрощают конструкцию якоря. Известно [11, 12], что обмотки с  $q < 1$  могут выполняться как с пересекающимися лобовыми частями, так и не пересекающимися лобовыми частями. Наиболее простыми оказываются зубцовые обмотки без пересекающихся лобовых частей. Эти обмотки имеют высокий коэффициент заполнения пазов медью, малую индуктивность рассеяния, высокую теплопроводность между обмоткой и магнитопроводом и простую технологию изготовления. Обычно якорь выполняется с постоянной шириной паза, хотя известны также разработки электродвигателей с переменной шириной паза.

Использование редкоземельных постоянных магнитов с плотностью магнитной энергии примерно в 10 раз выше, чем у ферритовых, также эффективно увеличивает потокосцепления и, соответственно, удельную силу ЛСД.

Одна из особенностей ЛСД состоит в том, что они могут иметь нечетное число полюсов. Это можно объяснить относительно просто: можно разрезать пополам цилиндрическую машину с нечетным числом пар полюсов по диаметру и использовать только одну половину статора. Ее необходимо развернуть и увеличить длину ротора, на котором размещены постоянные

магниты. Статор не изменяется, но его обмотка при этом создает только нечетное число полюсов, так как вторая половина при развертке не используется. В теории электрических машин принято обозначать число полюсов в виде  $2p$ , т. е. предполагается наличие четного числа полюсов. Для линейной машины число  $p$  может быть дробным (например, 10,5), или число полюсов  $2p$  — нечетным (например, 21).

При выборе главных размеров ЛСД одним из определяющих факторов является длина полюсного деления  $\tau_p$ , от которого зависит максимальная частота фазных токов (обычно не более 100 Гц) при заданном ограничении по линейной скорости. Увеличение  $\tau_p$  также упрощает задачу выбора размеров якоря. Обычно  $\tau_p$  достигает от 15 до 24 мм.

Предварительный расчет электромагнитных параметров ЛСД обычно производится не для всего электродвигателя, а для его выделенной части и на единицу активной ширины якоря. Выделение расчетного фрагмента электродвигателя зависит от исходной схемы «элементарной» машины, или модуля, вид которой во многом определяется типом применяемой обмотки якоря.

Отрезок серии ПЛЭ на базе ЛСД проектировался в следующем порядке:

1. Было выбрано значение  $\tau_p$ , тип обмотки и примерный раскрой листа стали якоря с принятой конфигурацией пазов.
2. По площади паза, предполагаемой продолжительной плотности тока обмотки якоря и коэффициенту заполнения паза медью было определено максимальное значение МДС фазы для расчетного фрагмента машины.
3. Поскольку постоянные магниты выполняются из высококоэрцитивного сплава Nd-Fe-B, имеющего линейную кривую размагничивания, то при расчете предполагалось, что магнитная индукция в воздушном зазоре равна половине магнитной индукции насыщения  $B_g$  магнита.
4. По значениям МДС и магнитной индукции оценивалась электромагнитная сила на единицу ширины якоря для выделенного фрагмента машины. По продолжительной силе из технических требований к машине выбиралось число элементарных машин и активная ширина якоря.
5. На основе эмпирических соотношений между максимальными значениями МДС обмотки якоря и постоянных магнитов системы возбуждения, а также предполагаемых коэффициентов рассеяния постоянных магнитов, выбиралось значение длины воздушного зазора, и вычислялась высота магнитов. Ширина магнитов выбиралась в соответствии с рекомендациями по обеспечению минимума высших гармоник в магнитной индукции.
6. Назначались высоты ярма якоря и замыкателя магнитного пути так, чтобы магнитная индукция в них не достигала значений, соответствующих насыщению материалов, из которых они изготовлены.
7. Для полученного эскиза машины производился расчет электромагнитных сил с использованием программных комплексов типа ELCUT или ANSYS. На этом этапе выполнялся полный цикл

Таблица 1

*Основные параметры линейных машин*

Линейная машина	МСЛ-0,6-2,2-К	МСЛ-1,5-3,3-В	МСЛ-2-4,6-В
Число элементарных машин	3	3	4
Сила продолжительная, Н	600	1500	2000
Ток фазы продолжительный (ампл), А	6	14,1	28,2
Полюсное деление, мм	15	15	15
Сопrotивление фазы, Ом	2,75	2,75	0,92
Индуктивность фазы, мГн	16	16	5,33
Напряжение питания, В DC	300	528	528
Механическая мощность (оценка), кВт	1	4	8
Длина якоря, мм	400	408	543
Ширина якоря, мм	145		
Высота якоря с магнитным путем, мм	62		
Габариты постоянного магнита (В×Ш×Д), мм	6×12×80		

Примечание: К — конвекционное охлаждение; В — водяное охлаждение.

уточнения геометрии ЛСД, оценки его электромагнитных и тепловых параметров и характеристик.

По предложенной методике был разработан отрезок серии ЛСД с зубцовой двухслойной обмоткой при  $q = 2/7$ . Основные параметры серии указаны в табл. 1.

Оптимизация схемы обмотки разработанных машин и поперечного сечения крайних зубцов пакета якоря позволила снизить индуктивность фазы и существенно уменьшить зубцовую силу.

### Итоги реализации НИОКР «Линия» и «Линия-2»

В ходе согласования параметров и показателей ФЦП «Национальная технологическая база» МГТУ «СТАНКИН» были определены ряд ключевых направлений в развитии станкостроительной и инструментальной промышленности России. Одним из таких направлений является создание отечественного технологического оборудования с использованием ПЛЭ.

Первой работой в этом направлении стала НИОКР, проведенная в МГТУ «СТАНКИН» в 2010–2011 гг. по заказу Министерства Промышленности и Торговли РФ. Итогом двухлетней работы стало проектирование типоряда ПЛЭ мощностью 1; 4 и 8 кВт и легкого вертикально-фрезерного станка на их основе. В ходе дальнейших работ, в середине 2012 г., спроектированы и изготовлены опытные образцы отечественного ПЛЭ мощностью 4 кВт (стенд СМХ1) и SIEMENS 1FN3150-3WC00-0AA1 (стенд СМХ2) [6, 13], изображенные на рис. 2. Стенды используются для сравнительных исследований и определения путей совершенствования конструкций ПЛЭ.

В настоящее время МГТУ СТАНКИН и МЭИ реализуют в рамках НИОКР разработку гаммы ПЛЭ (табл. 1), с учетом полученных ранее результатов и проводимых в МГТУ «СТАНКИН» НИОКР по созданию различных видов технологического оборудования. Разработка проводится в направлении наращивания мощности и улучшения конструкции ПЛЭ, использовании

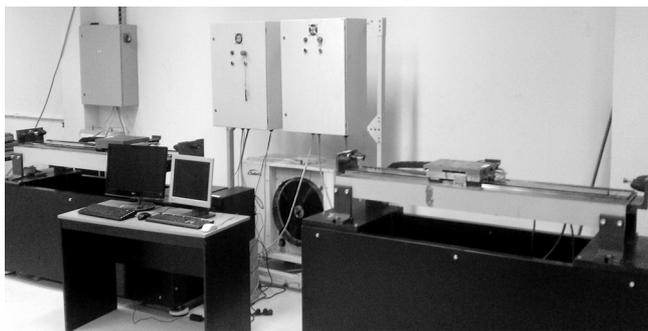


Рис. 2. Итоги реализации НИОКР «Линия»

расширяющихся возможностей микропроцессорной техники и новых методов управления.

В результате реализации проводимых мероприятий разработана гамма ПЛЭ, завершается изготовление опытных образцов и подготовка их серийного производства на основе рабочей конструкторской документации литеры О<sub>1</sub>. Стоимость серийных образцов ПЛЭ будет на 25–40% ниже зарубежных аналогов.

На создаваемые новые объекты интеллектуальной собственности будет обеспечено патентование разработок и права Российской Федерации.

В настоящее время в МГТУ «СТАНКИН» реализуется вся производственная программа ПЛЭ мощностью 1; 4 и 8 кВт. В общей сложности, к концу текущего года будут произведены все ПЛЭ, которые будут смонтированы на оборудовании, разработанном в Государственном инжиниринговом центре МГТУ «СТАНКИН».

#### Список использованных источников

1. С. Н. Григорьев. Решение задач технологического перевооружения машиностроения//Вестник МГТУ «СТАНКИН», № 4, 2011.
2. С. Н. Григорьев, М. П. Козочкин, Ф. С. Сабиров, В. А. Синопальников. Техническая диагностика станочного оборудования автоматизированного производства//Контроль. Диагностика, № 8, 2011.
3. А. А. Кутин, А. А. Корниенко. Современные проблемы и концепция повышения конкурентоспособности продукции отечественного станкостроения//Вестник МГТУ «СТАНКИН», № 2, 2009.
4. А. П. Балковой, Г. А. Сливинская. Прямые прецизионные электроприводы — опыт разработки и применения//Приводная техника, № 3, 2006.

5. А. П. Балковой, А. В. Костин, А. С. Мягких, О. А. Толстых, В. К. Цаценкин, С. Ф. Яковлев. Особенности проектирования гаммы прямых линейных электроприводов для машиностроения//Электротехника, № 7, 2013.
6. А. В. Костин, А. С. Мягких, Ю. В. Подураев, С. Ф. Яковлев. Методика определения основных электромеханических параметров//Мехатроника, автоматизация, управление, № 10, 2013.
7. А. П. Балковой, В. К. Цаценкин. Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
8. ЗАО «Сервотехника». Продукция для машиностроения//Оборудование: рынок, предложения и цены, № 12, 2005.
9. С. Ф. Яковлев. Перспективы разработки и применения прямых линейных электроприводов для расширения функциональных возможностей высокоточного машиностроительного оборудования//Сервопривод. Докл. науч.-метод. семинара. М.: Издательство МЭИ, 2013.
10. A. M. El-Refaie, E. M. Jahns, D. W. Novotny. Analysis of surface permanent magnet machines with fractional-slot concentrated windings//IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, No. 1, March 2006.
11. А. П. Балковой, В. Е. Луценко, В. П. Рубцов, В. К. Цаценкин, С. Ф. Яковлев. Якорь линейного электродвигателя. Патент на полезную модель RUS 109351 07.06.2011.
12. А. Ф. Шевченко. Многополюсные магнитоэлектрические двигатели с дробными зубцовыми обмотками//Труды XII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электрические материалы компоненты», МКЭЭЭ-2008. М.: Институт электротехники МЭИ (ТУ), 2008.
13. А. П. Балковой, В. К. Цаценкин, С. Ф. Яковлев, А. В. Костин. Актуальные вопросы создания отечественных линейных электроприводов на современной элементной базе//Мехатроника, автоматизация, управление, № 11, 2011.

#### Development and application of innovative direct linear drivers in high-precision machine-building equipment

**S. F. Yakovlev**, PhD, Docent, Chief of the department, MSTU «STANKIN».

**V. A. Alekseev**, engineer, MSTU «STANKIN».

**A. V. Kostin**, postgraduate student, MSTU «STANKIN».

**A. S. Myagkikh**, engineer, MSTU «STANKIN».

The article considers the application prospects and examples of direct linear drives in high-precision machine-building equipment. Designing methodology for direct linear drives based on linear synchronous motor which works in the valve mode is offered and examples and technical characteristics of direct linear drives and test benches based on these drivers which was developed in State Engineering Center of Moscow State Technological University «STANKIN» are shown.

**Keywords:** Direct linear drive, high-precision machine-building equipment, strategy of development.