

УДК 621.313.282

М.И. Ярославцев, канд. техн. наук, Академия
пожарной безопасности им. Героев Чернобыля, г.
Черкассы

ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ В ПРИВОДАХ С РЕГУЛИРУЕМЫМ ТЯГОВЫМ УСИЛИЕМ

М.І. Ярославцев. Лінійні індукторні двигуни в приводах з регульованим тяговим зусиллям. Розглядається застосування лінійних індукторних двигунів в приводах з регульованим тяговим зусиллям і підходи до удосконалення лінійних індукторних двигунів з метою покращення їх тягових характеристик.

М.И. Ярославцев. Линейные индукторные двигатели в приводах с регулируемым тяговым усилием. Рассматривается применение линейных индукторных двигателей в приводах с регулируемым тяговым усилием и подходы к усовершенствованию линейных индукторных двигателей с целью улучшения их тяговых характеристик.

M.I. Yaroslavtsev. Linear inductor motors in drives with the operated traction. Application of linear inductor motors in drives with the operated traction, as well as the approaches to the improvement of linear inductor motors for the purpose of improvement of their tractive characteristics, are considered.

Одной из основных проблем в машиностроении является, как известно, износ подвижных частей, узлов и деталей. Несмотря на применение самых современных марок смазки, трение между подвижными и неподвижными элементами в технологическом оборудовании с прецизионной шарико-винтовой передачей приводит к потере точности позиционирования при длительной эксплуатации этого оборудования. При перемещении рабочих механизмов возникают значительные давления в шарико-винтовой паре и смазка выдавливается, а это ведет к интенсивному износу винта. Неизбежные при этом люфты и вызывают потерю точности позиционирования.

Малый срок службы технологического оборудования, обусловленный износом их подвижных частей, вынуждает отечественных и зарубежных специалистов искать технические решения, которые позволили бы исключить трение в подвижных узлах и одновременно дали бы возможность увеличить скорости перемещения подвижных элементов, а также точность позиционирования.

Одним из направлений для достижения этой цели является использование в технологическом оборудовании для перемещения рабочих механизмов непосредственно линейных электродвигателей с газовой смазкой в направляющих. Замена электродвигателя вращательного движения, а также редуктора и шарико-винтовой пары линейным электродвигателем существенно упрощает кинематику привода подачи. Использование же линейного электродвигателя с газовой смазкой в направляющих исключает трение между его подвижной и неподвижной частями.

Это и позволяет повысить долговечность, надежность и быстродействие электроприводов по-
дач разнообразного технологического оборудования.

В настоящее время линейные электродвигатели находят все более широкое применение в
приводах робототехнических систем [1].

Нашли успешное применение линейные индукторные двигатели (ЛИД) с шаговым
управлением. Одним из первых ЛИД является двухкоординатный двигатель фирмы
“XYNETICS”, получивший название устройства позиционирования (magnetic positing device) [2].

Двухкоординатный ЛИД представляет собой подвижный элемент, перемещающийся по по-
верхности ферромагнитной плиты одновременно по двум координатам. Подвижный элемент со-
держит два индуктора с возбуждением от постоянных магнитов, каждый из которых обеспечи-
вает перемещение вдоль одной координаты. Ферромагнитная плита выполнена в виде сетки орто-
гональных зубцов с одинаковыми зубцовыми делениями. Пространство между зубцами заполне-
но материалом с большим магнитным сопротивлением. Воздушный зазор между подвижным
элементом и ферромагнитной плитой создается путем подачи сжатого воздуха под рабочую по-
верхность подвижного элемента. Сила отталкивания, создаваемая давлением воздуха, и сила при-
тяжения, обусловленная магнитной связью между магнитами на подвижном элементе и ферро-
магнитной плитой, уравниваются, обеспечивая стабилизированный воздушный зазор.

Двухкоординатный ЛИД фирмы “XYNETICS” нашел применение в технологических ус-
тановках лазерного скрайбирования и микропозиционерах [1].

В однокоординатном исполнении ЛИД был впервые применен в графопостроителях [3].
Привод графопостроителя включает в себя три однокоординатных линейных двигателя. Пер-
вые два двигателя размещены на расчерчиваемой плоскости параллельно друг другу. Третий
двигатель установлен на перекладине, которая своими концами крепится к подвижным элемен-
там первых двух двигателей. Эти двигатели работают синхронно и осуществляют перемещение
перекладины совместно с третьим двигателем, на котором установлен пишущий узел.

Однокоординатный ЛИД представляет собой подвижный элемент, перемещающийся в на-
правляющих вдоль ферромагнитной плиты. Подвижный элемент линейного двигателя состоит
из двух жестко связанных электромагнитных модулей. Каждый модуль включает в себя два П-
образных магнитопровода, постоянный магнит возбуждения и обмотку управления. Постоян-
ный магнит установлен на плечах П-образных магнитопроводов, а обмотка управления охваты-
вает прилегающие полюсы магнитопроводов. Неподвижным элементом двигателя является
ферромагнитная плита, которая имеет в сечении зубчатую форму. Зубчатую форму имеют и
рабочие поверхности полюсов П-образных магнитопроводов подвижного элемента двигателя.
Зубцовые зоны ферромагнитной плиты и полюсов П-образных магнитопроводов выполнены с
одинаковым зубцовым делением t . Между подвижным элементом и плитой поддерживается
постоянный воздушный зазор.

Такой ЛИД называют еще двигателем Савьяра. Он является линейным индукторным ша-
говым двигателем и представляет собой по существу развернутый на плоскости круговой ин-
дукторный шаговый двигатель, поскольку его конструкция соответствует основным отличи-
тельными признакам индукторных шаговых двигателей [4].

Благодаря простоте конструкции и надежности в работе линейные индукторные шаговые
двигатели, называемые просто линейными шаговыми двигателями, стали находить все более
широкое применение. Конструктивное исполнение линейных шаговых двигателей становилось
все более разнообразным. Были предложены различные варианты одно-, двух- и четырехмо-
дульных линейных шаговых двигателей с возбуждением от постоянных магнитов [1, 5]. Поми-
мо линейных шаговых двигателей с возбуждением от постоянных магнитов, нашли применение
также двигатели с электромагнитным возбуждением [6].

Несмотря на разнообразие конструкций, наибольшее распространение получил двухмо-
дульный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов (рис. 1). Как и в двигателе Савья-
ра, каждый электромагнитный модуль такого двигателя состоит из двух П-образных магнито-
проводов 1, обмотки управления 2 и постоянного магнита возбуждения 3. Модули взаимно
смещены относительно зубцовой зоны ферромагнитной плиты на четверть зубцового деления t .

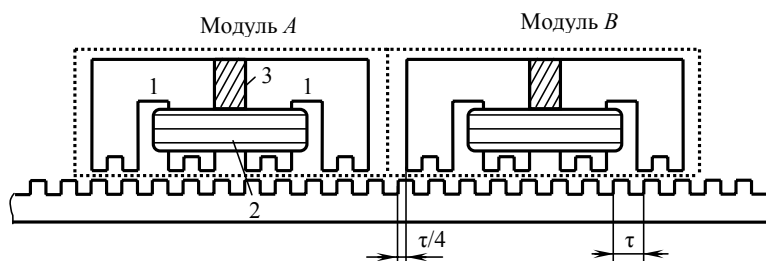


Рис. 1. Схема двухмодульного ЛИД с возбуждением от постоянных магнитов

Основное отличие линейного шагового двигателя такой конструкции от двигателя Савьяра состоит в том, что постоянные магниты возбуждения 3 установлены не на плечах П-образных магнитопроводов 1, а между магнитопроводами. Благодаря этому повысилась надежность и быстродействие двигателя.

ЛИД с шаговым управлением используются в прецизионном оборудовании,

в котором нагрузка на подвижные элементы двигателей является незначительной. К такому оборудованию относятся графопостроители, картографы, микропозиционеры, автоматические устройства для сборки печатных плат и т.п. Использование ЛИД с малым зубцовым делением позволяет добиваться высокой точности позиционирования.

Благодаря простоте и надежности в работе применение ЛИД оказалось перспективным и в других видах прецизионного технологического оборудования, где нагрузка на подвижные элементы линейных двигателей может быть соизмеримой с максимальными значениями тяговых усилий, создаваемых двигателями. Примером является прецизионное оборудование для механической обработки, в частности, для резки, проточки, фрезерования деталей и др., а также автоматические устройства, предназначенные для раскроя листового материала, изготовления лекал и т.п.

Однако применение в подобном технологическом оборудовании ЛИД с шаговым управлением оказалось неприемлемым, в основном, по двум причинам. Во-первых, в шаговых устройствах позиционирования, разомкнутых по положению, добиться высокой точности позиционирования при нагрузках, соизмеримых с максимальными тяговыми усилиями линейных двигателей, не представляется возможным. Во-вторых, двигателям с шаговым управлением присуща предрасположенность к колебаниям и возможность выхода из синхронизма, приводящая к сбою в работе оборудования.

Успешное применение ЛИД в приводах указанного технологического оборудования возможно только путем создания на основе этих линейных двигателей замкнутых систем позиционирования. В свою очередь, решение этой проблемы может быть сведено к решению двух задач: к созданию на основе ЛИД электропривода с регулируемым тяговым усилием и последующей разработке на базе этого регулируемого линейного электропривода замкнутых системы позиционирования.

Решение второй задачи не вызывает принципиальных трудностей и может быть выполнено с использованием классической теории автоматического управления. Наиболее сложным является решение первой задачи, т.е. создание на основе ЛИД электропривода с регулируемым тяговым усилием.

Для решения этой задачи представляется возможным подойти к индукторным двигателям как к синхронным машинам переменного тока и воспользоваться частотно-токовым способом управления двигателями переменного тока [7].

Частотно-токовое управление ЛИД сводится к запитке обмоток линейного двигателя токами, жестко связанными синусоидальной зависимостью с текущим положением подвижного элемента двигателя. Управление тяговым усилием, создаваемым ЛИД при частотно-токовом управлении, осуществляется путем регулирования амплитуды управляющих токов [8].

Поскольку индукторные двигатели отличаются от синхронных как конструкцией, так и принципом действия, то следует ожидать, что и тяговые характеристики индукторных двигателей при частотно-токовом управлении будут отличаться от тяговых характеристик, создаваемых синхронными двигателями.

Как показали исследования, ЛИД с частотно-токовым управлением создает тяговое усилие, которое состоит из полезной и паразитной составляющей [9]. Полезная составляющая, пропорциональна амплитуде управляющих токов, и является регулируемой составляющей соз-

даваемого тягового усилия. Паразитная же составляющая представляет собой методическую погрешность, обусловленную использованием частотно-токового управления синхронной машиной для управления индукторным двигателем. Возникающая паразитная составляющая приводит к снижению точности регулирования тягового усилия, создаваемого ЛИД.

Повышение точности регулирования тягового усилия ЛИД с частотно-токовым управлением может быть достигнуто путем усовершенствования конструктивной схемы двигателей.

Предложен подход к усовершенствованию конструкции ЛИД, сущность которого сводится к следующему [10]. Неподвижный элемент линейного двигателя (ферромагнитная плита с зубцовой зоной) выполняется в виде двух взаимно смещенных секций, а подвижный элемент двигателя (индуктор) оставляется без изменения. При взаимном смещении секций ферромагнитной плиты на четверть зубцового деления достигается максимальное подавление паразитной составляющей в создаваемом тяговом усилии. Аналогичный результат достигается также путем выполнения П-образных магнитопроводов индуктора двигателя в виде двух продольных секций, взаимно смещенных на четверть зубцового деления. Взаимное смещение секций ферромагнитной плиты или секций магнитопроводов индуктора двигателя выбирается с учетом особенностей технологии изготовления ЛИД.

Характерной особенностью ЛИД с возбуждением от постоянных магнитов является то, что даже при отсутствии управляющих токов на подвижный элемент двигателя оказывают действие так называемые магнитные “бугры”. Магнитные “бугры” — это зоны повышенной плотности магнитного потока, фиксирующие положение подвижного элемента двигателя в определенных точках. Сила магнитных “бугров” зависит от текущего положения подвижного элемента ЛИД и изменяется с периодичностью, определяемой зубцовым делением двигателя.

Сила магнитных “бугров”, накладываясь на создаваемое двигателем тяговое усилие, как и возникающая методическая погрешность, снижает точность регулирования тягового усилия, создаваемого ЛИД.

Предложен подход к усовершенствованию конструкции ЛИД путем скоса зубцов на ферромагнитной плите или на индукторе двигателя, что позволило повысить точность регулирования тягового усилия, создаваемого ЛИД при частотно-токовом управлении как путем подавления возникающей методической погрешности, так и путем сглаживания силы магнитных “бугров” [11].

ЛИД со скосом зубцов был использован в приводах разнообразного прецизионного технологического оборудования НПО “Ротор” (г. Черкассы) (рис. 2).

Скос зубцов выполнен на индукторе двигателя. Кроме магнитов 1, установленных между П-образными магнитопроводами, для усиления магнитного потока возбуждения задействованы дополнительные магниты 2, установленные в середине и по краям индуктора. Для замыкания магнитных потоков, создаваемых крайними магнитами, используется ферромагнитный корпус индуктора или применяются специальные магнитные замыкатели 3.

ЛИД обычных и усовершенствованных конструкций представляют собой двухфазные одно-модульные и двухмодульные двигатели. Усовершенствование ЛИД путем разбиения двигателей на взаимно смещенные секции или путем скоса зубцов на двигателях позволяет существенно повысить точность регулирования создаваемых ими тяговых усилий. Однако, за счет таких изменений в конструкции ЛИД заметно уменьшаются и создаваемые ими тяговые усилия.

Предложен подход к усовершенствованию ЛИД, который, с одной стороны, позволяет добиться высокой точности регулирования тягового

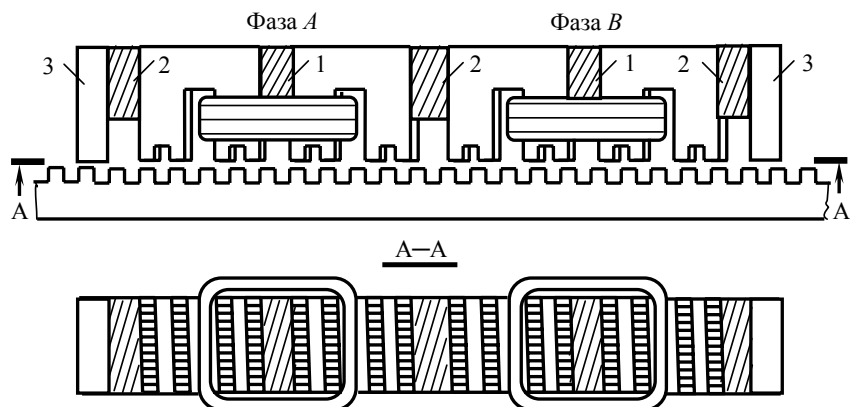


Рис. 2. Схема ЛИД с возбуждением от постоянных магнитов и со скосом зубцов на индукторе

усилия, а, с другой стороны, не приводит к уменьшению создаваемого тягового усилия [2].

Предложенный подход сводится к построению трехфазного трехмодульного ЛИД (рис. 3), и созданию на его основе регулируемого электропривода с частотно-токовым управлением.

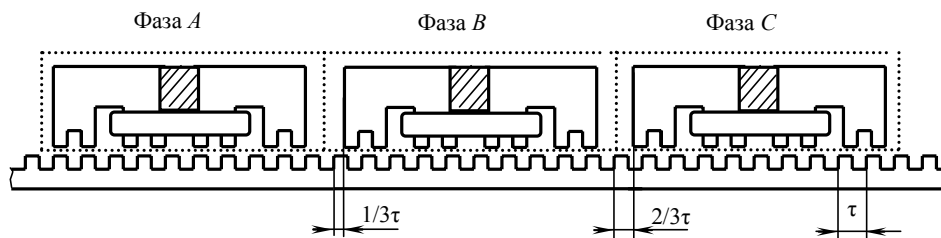


Рис. 3. Схема трехфазного трехмодульного ЛИД с возбуждением от постоянных магнитов

Дополнительная доработка трехфазного ЛИД путем скоса зубцов дает возможность практически полностью сгладить возникающие магнитные “бугры”.

Применение трехфазных трехмодульных ЛИД, а также новых технологий и материалов позволяет повысить удельное тяговое усилие более чем в три раза по сравнению с серийно выпускаемыми двухфазными ЛИД.

Литература

1. Электромагнитный привод робототехнических систем / А.А. Афонин, Р.Р. Билозор, В.В. Гребеников и др. — К.: Наук. думка, 1986. — 272с.
2. Пат. 1257251 Великобритания, МКИ G 05 d 3/00 H 02 k 41/02. Magnetic positioning device. — № 8270/69; Заявл. 14.02.69; Оpubл. 15.12.71.
3. Пат. 3857075 США, МКИ H 02 K 41/02. Positioning device / В. А. Sawyer. — № 323408; Заявл. 15.01.73; Оpubл. 24.12.74.
4. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями. / Б.А. Ивоботенко, В.П. Рубцов, Л.А. Садовский и др. — М.: Энергия, 1971. — 624 с.
5. Луценко, В.Е. Выбор и расчет электромагнитных модулей многокоординатных шаговых двигателей / В.Е. Луценко, В.Б. Баль // Тр. Моск. энергет. ин-та. — 1979. — Вып. 440. — С. 31 — 37.
6. Пат. 4766358 США, МКИ H 02 K 41/00. Linear stepping motor / Toshiro Higuchi — № 418; Заявл. 01.01.87; Оpubл. 23.08.88.
7. Бродовский, В.Н. Приводы с частотно-токовым управлением / В.Н. Бродовский, Е.С. Иванов. — М.: Энергия, 1974.
8. Ярославцев, М.И. Дослідження тягових характеристик двомодульних лінійних індукторних двигунів з частотно-струмовим управлінням / М.И. Ярославцев // Вісник ЧІТІ. — Черкаси, 2000. — № 4. С. 23 — 28.
9. Ярославцев, М.И. Исследование тяговых характеристик линейного индукторного двигателя с частотно-токовым управлением / М.И. Ярославцев // Техн. електродинаміка. — 2006. — № 6. — С. 48 — 51.
10. Ярославцев, М.И. Повышение точности регулирования тягового усилия линейного индукторного двигателя с частотно-токовым управлением / М.И. Ярославцев // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. — К., 2007. — № 2 (17). — С. 41 — 47.
11. Ярославцев, М.И. Повышение точности регулирования тягового усилия линейного индукторного двигателя / М.И. Ярославцев // Техн. електродинаміка. — 2007. — № 5. — С. 36 — 38.
12. Ярославцев, М.И. Повышение точности управления тяговым усилием линейного индукторного двигателя / М.И. Ярославцев // Вісник ЧІТІ. — Черкаси, 2001, — № 2, — С. 23 — 29.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Черкас. гос. технол. ун-та Шарапов В.М.

Поступила в редакцию 18 января 2010 г.