

УДК 621.313.001.3

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ – ТИПЫ И КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В.Б. Баль, В.Я. Геча, В.И. Гончаров, Е.В. Ежов, В.Г. Чиркин,
С.В. Ширинский, Д.А. Петриченко

Приведён обзор разработок и публикаций за последние 10 лет, посвящённых типам и конструкциям электрических машин возвратно-поступательного действия. Среди применяемых на практике линейных электрических машин рассмотрены синхронные машины с постоянными магнитами, машины с поперечным потоком, асинхронные машины, синхронные реактивные машины и вентильно-индукторные машины. Также приведён обзор конструктивных исполнений линейных электрических машин. Рассмотрены преимущества и недостатки вариантов расположения индуктора и якоря на подвижной и неподвижной части машины, оптимальные соотношения длин статора и индуктора, сравнение плоской конструкции линейного генератора с цилиндрической, а также конструкция сердечника цилиндрического линейного генератора. В заключении формулируется наиболее актуальное сейчас представление об оптимальной конструкции линейного генератора.

Ключевые слова: линейная электрическая машина, линейный генератор, линейный электрический двигатель, электрическая машина возвратно-поступательного действия, конструкция.

Линейные двигатели и генераторы возвратно-поступательного движения известны давно, но в последние 10 – 15 лет выделилось несколько направлений их применения, которые активно обсуждаются в научной литературе. Среди них: преобразователь энергии морских волн, система активной подвески для демпфирования колебаний, а также линейные электрические машины, встраиваемые в конструкцию двигателей внешнего сгорания (двигатель Стирлинга) и двигателей внутреннего сгорания со свободным поршнем. Причём, в последнем случае электрические машины применяются как в генераторном режиме, так и в двигателем для контроля перемещения поршня. При этом в современных установках применяются разные типы и конструкции линейных электрических машин, краткий обзор которых и приведён в настоящем исследовании.

Типы линейных электрических машин

В качестве линейных генераторов и двигателей могут применяться любые типы электрических машин. Разве что коллекторные машины не рассматриваются совсем ввиду очевидных недостатков щёточно-коллекторного узла, но их положительные свойства полностью реализуются в бесконтактных вентильных машинах.

В диссертации Samuel Chevailler [1] приведена хорошая подборка линейных электрических двигателей различных типов. Аналитический расчёт

различных видов линейных электрических генераторов также приведён в статье [2].

Наиболее часто применяются *синхронные машины с постоянными магнитами*. В них обмотка якоря располагается на статоре, а подвижный транслятор содержит постоянные магниты в качестве источников магнитного поля. Конфигурации магнитов включают поверхностные магниты с продольной или поперечной намагниченностью, а также так называемый массив Хальбаха. Якорь с обмоткой может иметь стальные зубцы, в пазах которых располагается обмотка, либо может иметь беспазовую конструкцию.

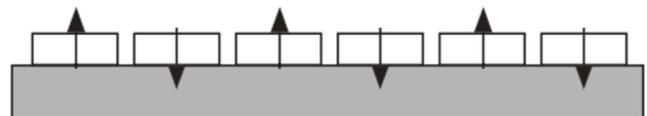


Рис. 1. Транслятор с постоянными магнитами с поперечной намагниченностью



Рис. 2. Транслятор с постоянными магнитами с продольной намагниченностью

На рис. 1 и 2 показаны конструкции трансляторов синхронной машины с постоянными магнитами, имеющими поперечную или продольную намагни-

ченность. В любом случае такие трансляторы должны содержать стальные участки, необходимые для замыкания магнитного потока. В первом случае транслятор представляет собой стальное ярмо, на поверхности которого располагаются магниты. Во втором случае постоянные магниты и стальные полюсы чередуются в продольном направлении. Стальные полюсы при этом выступают в качестве концентраторов магнитного потока.

При этом вся электрическая машина может быть плоской или цилиндрической, трансляторы могут быть одно- или двусторонними, эти особенности будут рассмотрены в следующей части и на принцип действия машины не оказывают никакого влияния.

На рис. 3 показана конструкция транслятора, в котором постоянные магниты различной намагниченности образуют массив с переменной намагниченностью.



Рис. 3. Транслятор с массивом магнитов типа псевдо-Хальбах

Первоначальная идея Хальбаха заключалась в формировании синусоидальной формы индукции в зазоре электрической машины при помощи постоянных магнитов с постепенно изменяющейся намагниченностью. Сейчас на практике чаще применяются массивы псевдо-Хальбаха, в которых используется лишь продольное и поперечное направление намагниченности без промежуточных направлений. Такие массивы не могут сформировать правильную синусоиду, но форма кривой индукции всё же намного ближе к синусоиде, чем комбинация магнитов только продольной или только поперечной намагниченности.

Помимо правильной формы кривой индукции массивы Хальбаха имеют ещё два преимущества, вызывающие интерес многих исследователей. Во-первых, максимальное значение индукции в зазоре оказывается выше, чем при использовании концентраторов магнитного потока, во-вторых, такой массив не требует использования стали – здесь не требуется стальное ярмо для замыкания потока. Конечно, материал постоянных магнитов слишком хрупок для самостоятельной передачи значительных усилий, поэтому постоянные магниты устанавливаются на несущей опоре, но она может быть выполнена из более лёгкого материала, чем сталь.

Основным недостатком массивов Хальбаха является их высокая стоимость, поэтому в случае применения синхронных машин с постоянными

магнитами на трансляторе следует рассматривать различные варианты исполнения индуктора, выбирая оптимальный с учётом значения максимальной индукции, полного потока на один полюс, а также общей массы и стоимости магнитных материалов.

Статор синхронной машины с постоянными магнитами на трансляторе может быть выполнен в двух вариантах: помимо традиционного зубчатого сердечника, в пазах которого расположены катушки одно- или многофазной обмотки, часто рассматривают вариант с беспазовым статором.

На рис. 4 показан вариант линейной электрической машины с беспазовым статором. В этом случае обмотка якоря конструктивно не меняется, но она располагается на поверхности ярма, которое служит для фиксации катушек и замыкания магнитного потока. Поток постоянных магнитов, замыкаясь через увеличенный немагнитный зазор и ярмо статора, оказывается сцеплен с катушками обмотки якоря так же, как и в случае традиционного статора (рис. 5). Современные магнитотвёрдые материалы позволяют поддерживать требуемые значения потока даже при значительно увеличенных немагнитных зазорах (конечно, ценой увеличения размеров и массы дорогостоящих магнитов), но принцип работы электрической машины при этом не изменяется.

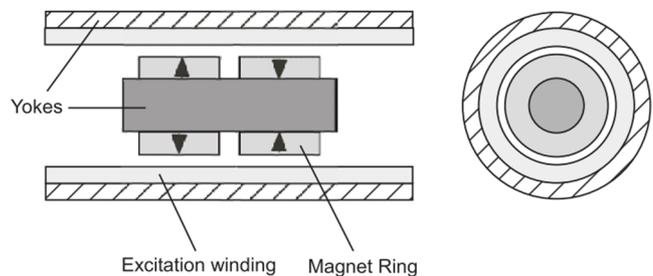


Рис. 4. Линейный генератор с беспазовым статором

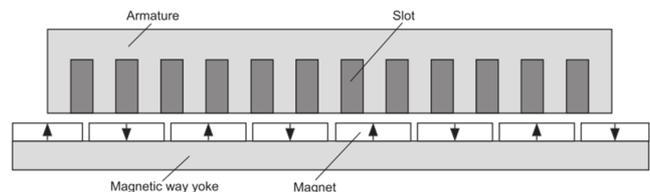


Рис. 5. Линейный генератор с зубчатым статором

Электрические машины с беспазовым статором отличаются пониженными уровнями пульсации момента в связи с отсутствием гармоник магнитной проводимости, а также отсутствием сил маг-

нитного тяжения. Меньший объём стали также приводит к пониженным магнитным потерям, что позволяет повысить КПД электромеханического преобразователя. Но повышенный вследствие низкой магнитной проводимости зазора ток якоря и соответствующее увеличение электрических потерь может скомпенсировать увеличение общего КПД.

Традиционная конструкция статора со стальными зубцами применяется чаще беспазовой. Она позволяет получить большую удельную мощность машины и снизить габариты, а также уменьшить объём требуемых постоянных магнитов, что благотворно скажется на массе транслятора и его стоимости. Но заметные пульсации момента ограничивают её применение в некоторых специальных областях, а существенные силы притяжения между статором и транслятором заставляют больше внимания уделять опорам транслятора. Правда, двусторонняя конструкция позволяет скомпенсировать силы магнитного тяжения, так же как и цилиндрическая конструкция при условии соблюдения соосности статора и транслятора. В целом зубчатый статор позволяет получить электромеханический преобразователь с большим КПД, чем беспазовая конструкция.

Значительный интерес в последнее десятилетие заметен в отношении *электрических машин с поперечным магнитным потоком (transverse flux machine)*. В статье [3] отмечается, что такие машины могут иметь значительно большую энергоёмкость, чем другие типы машин. Традиционные виды электрических машин имеют продольное направление магнитного поля. Под продольным направлением понимается такое, при котором магнитное поле распространяется в плоскости, параллельной направлению движения. Применительно к линейным машинам это будет именно продольное поле, во вращающихся машинах магнитное поле распространяется в поперечном сечении машины, т. е. в направлении вращения.

В машинах с поперечным потоком магнитный поток распространяется в плоскости, перпендикулярной направлению движения. При анализе таких машин нельзя обойтись анализом плоскопараллельного поля, так как магнитное поле в активной зоне машины имеет трёхмерный характер (рис. 6). Подобные конструкции были предложены более 100 лет назад (патент 1985 г. W.M. Morday), но стали привлекательными только сейчас с появлением высококоэрцитивных магнитов.

Пример современной конструкции машины с поперечным потоком, имеющей массив постоян-

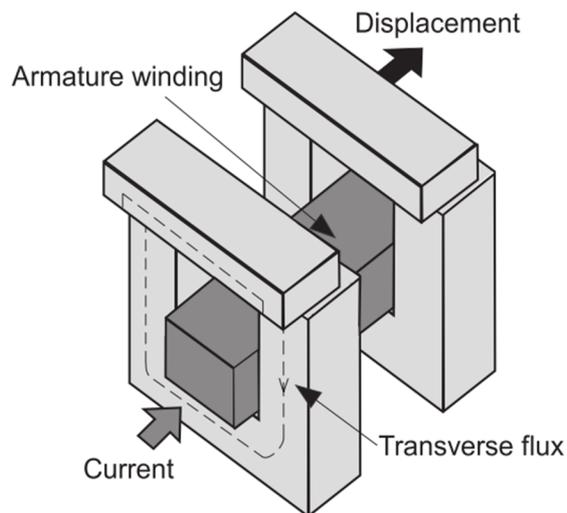


Рис. 6. Линейная машина с поперечным потоком

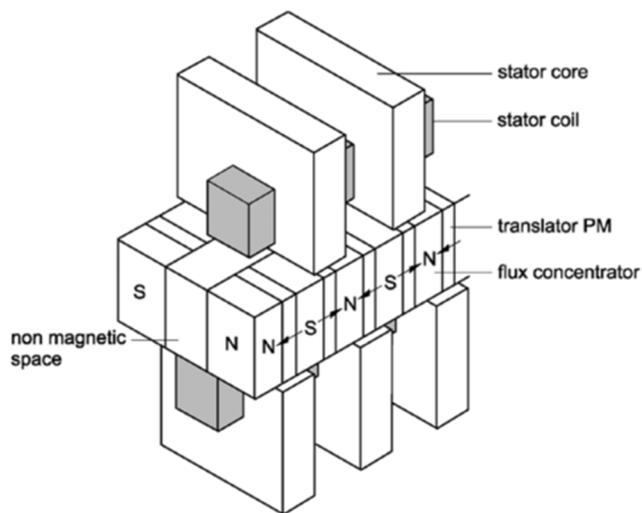


Рис. 7. Машина с поперечным потоком с магнитами на трансляторе

ных магнитов с концентраторами потока на подвижном трансляторе и двусторонний якорь с простыми кольцевыми обмотками, показан на рис. 7.

Здесь статор содержит катушки и U-образные сердечники по обеим сторонам транслятора.

Транслятор, в свою очередь, состоит из двух рядов постоянных магнитов и концентраторов магнитного потока, пространство между которыми заполнено конструкционным материалом. В представленной конструкции с подвижными магнитами и неподвижными обмотками транслятор имеет большую длину, чем статор. Поэтому часть дорогостоящих магнитов всегда недоиспользуется.

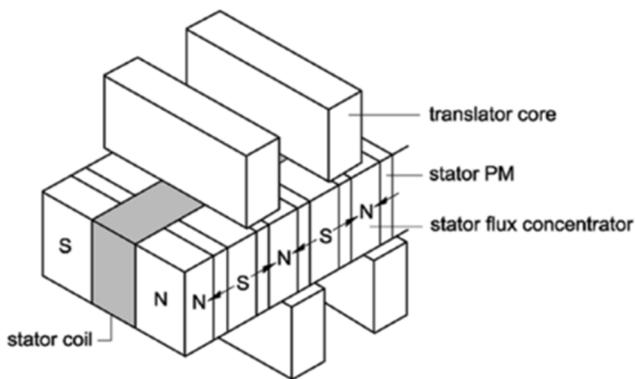


Рис. 8. Машина с поперечным потоком и неподвижными магнитами

В связи с этим предпочтительной является конструкция, в которой как магниты, так и обмотки являются неподвижными, а перемещается лишь транслятор со стальными сердечниками (рис. 8).

Машина на рис. 8 также является двусторонней, но в ней применено два транслятора, расположенных с обеих сторон статора. Такая конструкция рассмотрена в статье [4]. Там она названа *двусторонней машиной с поперечным потоком и подвижным сердечником*. По сравнению с предыдущим вариантом конструкционный материал между двумя рядами магнитов и концентраторов потока заменён на катушку. И катушка и магниты остаются неподвижными, а U-образные сердечники получают упрощённую форму, так как они теперь не должны охватывать катушку, и превращаются в ярма, расположенные на трансляторе.

Наиболее привычной представляется конструкция *асинхронной машины*, которая рассматривается в качестве линейного двигателя более полувека. Показанная на рис. 9 конструкция плоской двусторонней асинхронной машины отличается простотой и надёжностью, что всегда привлекало разработчиков. Транслятор машины представляет собой алюминиевую или медную шину либо содержит зубчатый сердечник с литой обмоткой типа «белочья клетка». Последний вариант сложнее в изготовлении, но даёт лучшие энергетические показатели всего двигателя.

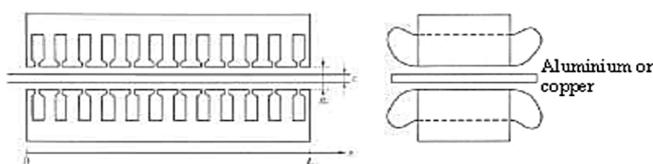


Рис. 9. Двусторонний линейный асинхронный двигатель

К сожалению, асинхронная машина имеет ограниченное применение в качестве генератора в силу отсутствия источника магнитного поля. Для самовозбуждения асинхронному генератору необходимо получать реактивную мощность от внешней электрической сети либо использовать собственные конденсаторы. Для линейных асинхронных машин актуальным является поддержание минимального зазора между статором и транслятором. По сравнению с синхронными машинами с постоянными магнитами асинхронные машины потребляют больше электроэнергии для создания тех же тяговых усилий. Применительно к линейным генераторам асинхронные машины не рассматриваются на практике. В статье [5] приведена модель линейного асинхронного двигателя длиной 425 м и мощностью 12 МВт, который предлагается использовать в качестве катапульты для запуска самолётов на авианосце.

Среди линейных машин реально рассматривается другой весьма простой и надёжный тип машин – *линейная реактивная машина*. В отличие от других типов электрических машин реактивная машина создает тяговое усилие за счёт изменения проводимости между статором и транслятором, имеющих явно выраженные полюсы (рис. 10).

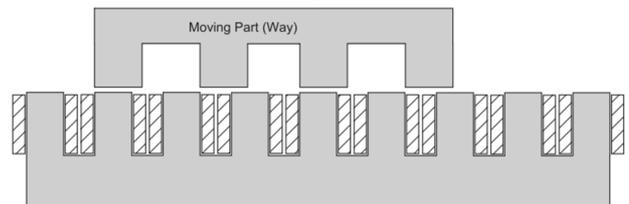


Рис. 10. Линейная реактивная машина

Реактивная машина имеет простой и надёжный транслятор, содержащий лишь магнитопровод с явно выраженными полюсами (или с зубцами и открытыми пазами между ними). На статоре в пазах сердечника расположены многофазные обмотки, создающие бегущее магнитное поле. К сожалению, реактивная машина проигрывает синхронной машине с постоянными магнитами по энергетическим показателям. У неё достаточно низкий КПД и очень высокая чувствительность к величине и равномерности воздушного зазора. Кроме того, реактивную машину сложно переключать из двигательного режима работы в генераторный и обратно. Тем не менее, простота конструкции требует рассматривать линейную реактивную машину в качестве одного из базовых вариантов при проек-

тировании электромеханического преобразователя возвратно-поступательного действия.

Здесь же следует упомянуть и *вентильно-индукторные машины*, получившие большое распространение в последние 20 – 30 лет благодаря простоте и надёжности своей электромеханической части, высоким энергетическим показателям и хорошим регулировочным качествам. Конструктивно они очень похожи на реактивные машины, но требуют специальной системы управления питанием обмоток для своей работы. На рис. 11 показан пример плоской односторонней вентильно-индукторной машины.

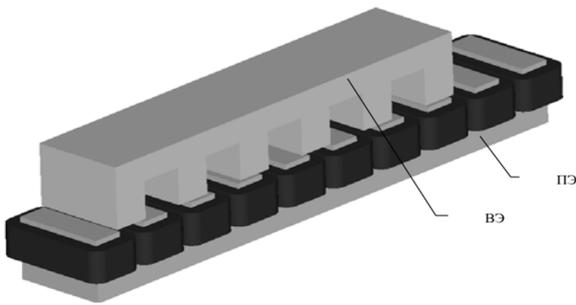


Рис. 11. Вентильно-индукторная машина, электромеханическая часть

Основы проектирования такой линейной машины рассматриваются в статье [6]. Как и все электрические машины вентильно-индукторный двигатель (ВИД) обратим и может работать в генераторном режиме, однако подобных примеров, где ВИД использовался бы преимущественно в генераторном режиме, среди современных публикаций найти не удалось.

Конструктивные исполнения линейных ЭМ возвратно-поступательного действия

Выше различные типы электрических машин, которые применяются в качестве линейных генераторов и двигателей прямого действия, рассматривались безотносительно их конструктивного исполнения. Здесь же внимание будет сосредоточено на возможных конструктивных исполнениях, которые в равной степени применимы к различным типам электрических машин.

Различные конструктивные исполнения линейных машин не раз обсуждались в литературе. Число таких исполнений невелико и их известные достоинства и недостатки позволяют сделать вполне определённый выбор оптимального ис-

полнения для требуемой области применения. Хорошо аргументированные выводы приведены в докладе [7].

Прежде всего, линейная электрическая машина может быть выполнена с коротким подвижным элементом или с коротким статором (рис. 12). Очевидно, что полная длина машины складывается из величины полного хода поршня и длины более короткого элемента. Оптимальным было бы выполнять длину машины вдвое больше величины хода поршня. Конструкция с коротким подвижным элементом имеет меньшую массу индуктора, но увеличивает массу меди в длинном статоре, что приводит к увеличению стоимости электрической машины. Конструкция с длинным индуктором, несмотря на увеличенную массу подвижного элемента, показывает более высокую удельную производительность. Из соображений механической жёсткости подвижных элементов свободнопоршневого двигателя предпочтение всегда отдаётся варианту с коротким и, как следствие, более жёстким подвижным элементом.

Линейная электрическая машина может быть выполнена цилиндрической («tubular» в англоязычной литературе) или плоской – одно или двухслойной. Плоские машины отличаются меньшей производительностью из-за больших потоков рассеяния вследствие поперечного краевого эффекта. Кроме того, такая конструкция неприемлема при общей компоновке свободнопоршневого двигателя с линейным генератором. Плоскую машину можно использовать лишь в лабораторных условиях для исследования прототипов двигателей, поскольку такого рода машины выпускаются некоторыми компаниями.

Ещё одна альтернатива касается размещения электрических катушек и постоянных магнитов на подвижном или неподвижном элементах машины (рис. 13).

Подвижные катушки предполагают обеспечение подвижного тока съёма в виде щёток с проводящими полосами либо гибких проводников, соединяющих подвижный элемент со статором. Такой вариант представляется неприемлемым вследствие его ненадёжности. Даже гибкие проводники подвергаются значительному риску при колебаниях подвижного элемента с частотой 20 – 50 Гц при длине хода 20 – 200 мм.

Однако размещение постоянных магнитов на подвижном элементе является не единственной альтернативой. Возможно выполнить подвижный элемент вовсе без активных материалов, сделав его только явнополюсным (рис. 14).

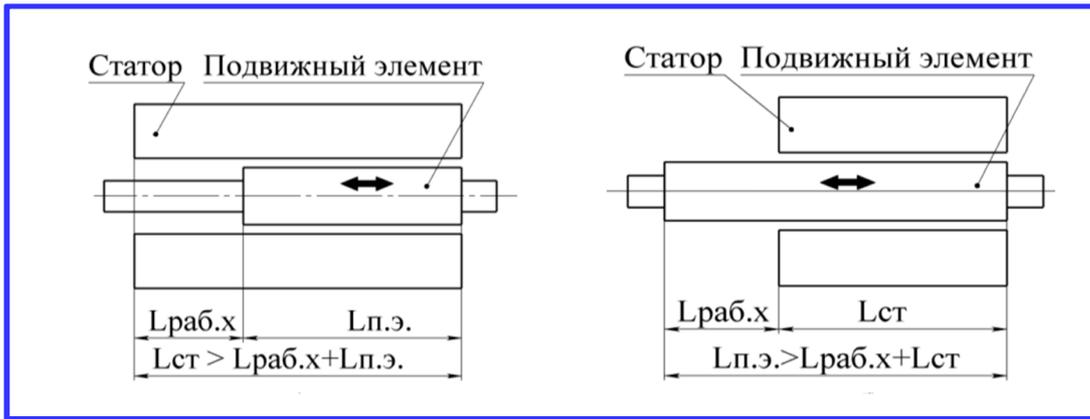


Рис. 12. Варианты компоновки по длине подвижного и неподвижного элементов

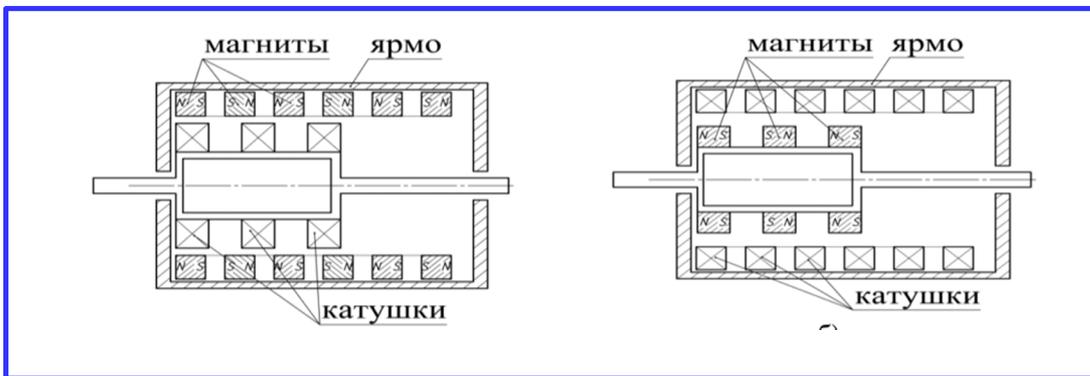


Рис. 13. Варианты размещения катушек и постоянных магнитов

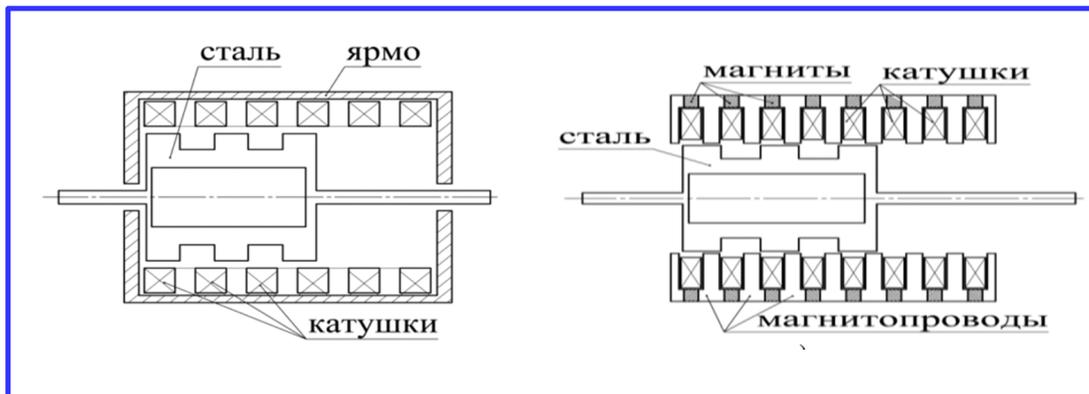


Рис. 14. Варианты конструкции с пассивным подвижным элементом

Достоинством вариантов, представленных на рис. 14, является не только отсутствие активных материалов на подвижном элементе, подвергающемся значительным ускорениям, но и снижение массы подвижного элемента, что является весьма желательным в механическом отношении.

Представленные на рис. 14 варианты относятся к реактивной машине и индукторной машине, эти типы машин были описаны выше.

Рассматривая конструкцию обмотки якоря, следует отметить, что практически везде применяется многофазная распределённая обмотка, причём число фаз всегда равно 3. Исключение составляет

единственный вариант сосредоточенной однофазной обмотки генератора, используемого с двигателем Стирлинга.

Катушки статора могут располагаться в пазах сердечника, что увеличивает потокосцепление обмотки и способствует снижению объёма постоянных магнитов. Но иногда рассматриваются также варианты беспазового статора, позволяющие облегчить конструкцию и уменьшить потери в стали, т. е. повысить КПД генератора. Такой генератор представлен в работе [8]. Основной причиной отказа от стальных зубцов авторы называют потери в стали зубцов на перемагничивание. А также они отмечают, что современные высококоэрцитивные постоянные магниты позволяют отказаться от магнитопровода при сохранении необходимого уровня индукции. Статья посвящена многофакторной оптимизации генератора и содержит экспериментальное подтверждение достигнутых результатов.

При использовании традиционного зубчатого статора также могут быть использованы различные конструктивные варианты исполнения сердечника. Прежде всего, невозможно сделать цилиндрический сердечник с продольной шихтовкой, поэтому такие шихтованные сердечники выполняют из нескольких квазисекторов. На самом деле это сердечники прямоугольного сечения, сходящиеся на внутреннем диаметре. На рис. 15 показано два варианта с 6 и 8 сердечниками.

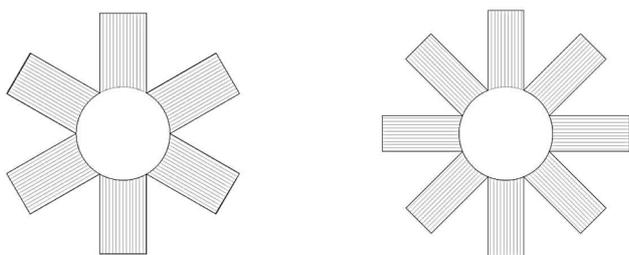


Рис. 15. Поперечное сечение сердечника цилиндрической линейной машины

Выбранный вариант конструкции сердечника должен учитываться при расчёте действительной индукции в стали, ведь машина не является действительно осесимметричной.

Кроме того, естественное желание выбрать полузакрытые пазы в таких сердечниках, обеспечивающие минимальные пульсации проводимости и создаваемого усилия на подвижном элементе, приводит к невозможности уложить в них кольцевые обмотки. То есть, сердечники приходится собирать

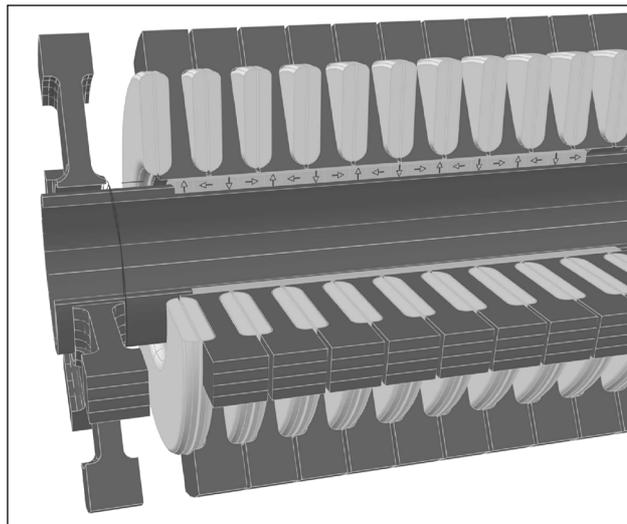


Рис. 16. Сборка зубчатого статора цилиндрической линейной машины

из отдельных модулей, равных зубцовому делению, чередуя укладку кольцевой обмотки и зубцовых модулей (рис. 16). А это потребует дополнительной конструкторской и технологической проработки.

Выше уже говорилось о разных вариантах исполнения подвижного элемента с постоянными магнитами. Это могут быть поверхностные радиально намагниченные магниты на стальном ярме, внутренние продольно намагниченные магниты между стальными концентраторами потока или массивы Хальбаха, позволяющие отказаться от стального сердечника и получить требуемую форму поля в зазоре. Вопросы оптимального выбора конструкции подвижного элемента цилиндрического линейного двигателя рассматриваются в нескольких работах, например [9 – 11], а также в работах [12] – с примером испытательного стенда – и [13].

Интересно, что ни в одной статье не рассматривается конструкция полупроводникового выпрямителя, хотя многие авторы признают, что многофазная обмотка генератора переменного тока должна подключаться к нагрузке через выпрямитель. Можно предположить, что трёхфазные генераторы подключаются к обычному мостовому выпрямителю. В случае реализации сложных алгоритмов управления электрической машиной, работающей как в генераторном, так и двигательном режиме работы, применяется обратимый мостовой активный выпрямитель/инвертор. Примером может служить статья [14]. Правда, в ней рассматривается линейный исполнительный механизм с двухфазной обмоткой статора.

Также стоит отметить, что практически все авторы используют в своих моделях редкоземельные постоянные магниты NdFeB, которые действительно имеют выдающиеся магнитные свойства, но отличаются невысокой рабочей температурой. А ведь линейный генератор должен быть частью двигателя внутреннего сгорания. Причиной этого является доступность на рынке постоянных магнитов с относительно высокой рабочей температурой. В качестве примера можно привести китайскую компанию SINE Magnetic Products [15]. Их каталог содержит предложения по редкоземельным магнитам с рабочей температурой 150, 180, 200° С и даже 230 °С.

Заключение

В рассмотренных работах, посвящённых созданию линейных электрических машин, работающих как в генераторном, так и в двигательном режимах, большинство исследователей применяют цилиндрическую линейную машину с многофазной распределённой обмоткой на статоре и постоянными магнитами на коротком роторе.

Чаще всего используется традиционная распределённая обмотка с числом пазов на полюс и фазу $q=1$ (одно- или двухслойная), имеющая 6 зубцовых делений статора на каждом периоде поля. Иногда встречается обмотка с $q=0,5$. Она позволяет получить только 3 зубцовых деления на периоде, т. е. применять относительно большие зубцы на статоре. В этом случае удаётся избежать проблем с высоким насыщением зубцов магнитным потоком и чрезмерно высокой плотностью тока в катушках статора. Но обмотка с $q=0,5$ имеет очень низкий обмоточный коэффициент, что приводит к необходимости увеличивать величину тока, а это, в свою очередь, ведёт к повышенной плотности тока и возможным проблемам с охлаждением обмотки.

Особо следует отметить интерес некоторых авторов к беспазовым конструкциям статора. Конструкция обмотки остаётся неизменной, но применение высококоэрцитивных магнитов позволяет обойтись без стальных зубцов при сохранении требуемого потокосцепления обмотки. Во всех случаях целью применения беспазовой конструкции является снижение пульсаций момента за счёт улучшения формы поля в зазоре. Это может быть существенным при создании линейного двигателя и менее важным для генераторного режима работы.

Подвижный индуктор в наиболее типичной конфигурации линейной электрической машины содержит постоянные магниты, что позволяет обойтись без скользящих контактов и обеспечить

требуемый уровень индукции в зазоре. При этом разные авторы применяют различные конфигурации постоянных магнитов. Многополюсную конструкцию с чередующейся полярностью часто реализуют с помощью массивов квази-Хальбах. Однако другие авторы с успехом используют более традиционные конфигурации, содержащие чередование постоянных магнитов с продольной намагниченностью и стальных полюсов (они работают как концентраторы магнитного потока). В ряде работ применяется совсем простая конфигурация индуктора с постоянными магнитами с радиальной намагниченностью, расположенными на поверхности стального ярма. Но здесь наличие стального ярма значительно повышает вес всей подвижной части генератора, что является весьма нежелательным с механической точки зрения.

В некоторых работах авторы отмечают потенциальную привлекательность электрической машины с поперечным магнитным потоком. Такие машины оказываются востребованы при создании тихоходных многополюсных машин либо при создании линейных генераторов и двигателей. Поскольку вся машина состоит из большого числа одинаковых модулей, их легко разместить на дуге окружности или вдоль прямой. То есть конструкция машины с поперечным потоком практически не различается для вращательного и возвратно-поступательного движения. А применение современных высококоэрцитивных магнитов позволяет получить высокие значения плотности энергии в таких машинах, делая их конкурентоспособными. Правда, здесь надо отметить, что варианты машин с поперечным потоком для линейных генераторов рассматриваются теоретически. В соответствующих публикациях отсутствуют сведения об экспериментальном подтверждении ожидаемых высоких показателей подобных машин. А вот при создании судовых тихоходных вращающихся двигателей машины с поперечным потоком уже используются на практике.

Индукторные машины, применяемые в их линейном варианте (гибридная линейная машина Вернье), могут представлять интерес с точки зрения простоты конструкции и дешевизны (подвижный элемент не содержит постоянных магнитов либо обмоток возбуждения, только стальной сердечник с зубчатой поверхностью, да и на статоре можно обойтись простой сосредоточенной обмоткой). Но авторы соответствующих работ признают, что индукторная машина проигрывает всем прочим видам электрических машин по массе активных материалов и энергетическим показателям.

Выбору силовой электроники, необходимой для работы генератора на нагрузку постоянного тока или питания многофазной обмотки статора от бортовой сети постоянного тока, в рассмотренных публикациях почти не уделяется внимания. Однако имеющиеся изображения позволяют сделать вывод о применении традиционного мостового активного выпрямителя/инвертора. Больше внимания уделяется алгоритмам управления линейным двигателем с помощью этого традиционного инвертора.

Настоящая статья подготовлена в рамках Соглашения о предоставлении субсидии No.14.577.21.0120 (Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57714X0120) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Исследования выполнены в Московском государственном машиностроительном университете (МАМИ) и Национальном исследовательском университете «МЭИ».

Литература

1. Chevailler Samuel. Comparative study and selection criteria of linear motors / Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suisse, 2006.
2. Trattner A. at al. Novel Range Extender Concepts for 2025 with Regard to Small Engine Technologies // SAE Int. J. Alt. Power. – Vol. 1. – Issue 2 (Dec. 2012).
3. Mueller M. A. Electrical generators for direct drive wave energy converters // Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib. – 2002. – Vol. 149. – Pp. 446 – 456.
4. Polinder Henk at al. Conventional and TFPM Linear Generators for Direct-Drive Wave Energy Conversion // IEEE transactions on energy conversion. – 2005, June. – Vol. 20. – No. 2.
5. Korkmaz F., Topaloglu I. и Gurbuz R. Simulink Model of Vector Controlled Linear Induction Motor with End Effect for Electromagnetic Launcher System // Elektronika ir elektrotehnika. – ISN 1392 – 1215. – 2014. – Vol. 20. – No. 1.

6. Рымша В. В. Проектирование линейных вентильно-реактивных двигателей // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2003. – (Серія : Електротехніка і енергетика; Випуск 67).

7. Духанин В. И. Автомобильный генератор возвратно-поступательного движения. Анализ конструкции // Международная научно-техническая конференция ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвящённая 145-летию МГТУ «МАМИ», 2010, 17 нояб.

8. Cheng-Tsung at al. Optimal Design of a Direct Driven Slotless Tubular Linear Generator for Renewable Energy Extraction // Journal of Physics : Conference Series 266 (2011) 012075.

9. Bianchi Nicola at al. Tubular Linear Permanent Magnet Motors: An Overall Comparison // IEEE Transactions On Industry Applications. – 2003, March/April. – Vol. 39. – No. 2.

10. Akhondi Hamidreza, Milimonfared Jafar. Design and Optimization of Tubular Permanent Magnet Linear Motor for Electric Power Steering System // Journal of Asian Electric Vehicles. – 2009. – Vol. 7. – No. 2, Dec.

11. Mohamed Yasser Abdel-Rady I., Milimonfared Jafar. Optimum Design of Tubular Permanent-Magnet Motors for Thrust Characteristics Improvement by Combined Mahdi Ashabani Taguchi – Neural Network Approach // IEEE transactions on magnetics. – Vol. 46. – No. 12, Dec.

12. Hong Sun-Ki at al. Analysis of Tubular-type Linear Generator for Free-Piston Engine // Electrical Machines (ICEM), XXth International Conference, 2012.

13. Wang Jiabin, Jewell Geraint W., Howe David. A General Framework for the Analysis and Design of Tubular Linear Permanent Magnet Machines // IEEE transactions on magnetics. – 1999. – Vol. 35. – No. 3, may.

14. Vese Ioana-Cornelia, Radulescu Mircea M. Direct Thrust Control Scheme For A Tubular Linear Brushless Permanent-Magnet Actuator // Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series. – 2010. – No. 34.

15. Ningbo Sine Industrial Company Limited. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.sinemagnetic.com.

Поступила в редакцию 24. 11. 2015

Владимир Борисович Баль, канд. техн. наук, доцент,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
т. (495) 362-71-89, e-mail: balvb@mpei.ru.

Владимир Яковлевич Геча, д-р техн. наук,
заместитель генерального директора,
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,
т. (495) 365-26-69.

Владимир Иванович Гончаров, ст. преподаватель,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
т. (495) 362-71-89, e-mail: goncharovvi@mpei.ru.

Евгений Викторович Ежов, инженер,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
т. (495) 362-74-29, e-mail: elmech.mpei@gmail.com.

Василий Германович Чиркин, аспирант,
Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Сергей Владимирович Ширинский, канд. техн. наук, доцент,
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
т. (495) 362-74-54, e-mail: shirinskiisv@mpei.ru.

Дмитрий Анатольевич Петриченко, канд. техн. наук, ведущий инженер-исследователь,
Московский государственный машиностроительный университет НТЦ «Силовые агрегаты»,
т. (495) 223-05-23 (доб. 1119), e-mail: dmitry.petrichenko@gmail.com.

LINEAR ELECTRICAL RECIPROCATING MACHINES – TYPES and DESIGN of ELECTRICAL MACHINES

**V.B. Bal, V.Ya. Gecha, V.I. Goncharov, E.V. Ezhov, V.G. Chirkin,
S.V. Shirinsky, D.A. Petrichenko**

Review of projects and related published materials, considering types and design of electrical reciprocating machines, over the last 10 years is presented in the article. Study of the following types of linear electrical machines is given: synchronous permanent magnet machines, cross flow machines, asynchronous machines, synchronous reluctance machines and switched reluctance machines. Additionally review of linear electrical machine design versions is offered for consideration. Advantages and disadvantages of locating inductor and armature on moving and stationary machine parts are discussed, optimum length relationship for stator and inductor is studied, flat and tubular linear generator design concepts are compared, as well as magnetic core design for tubular linear generators is considered. In conclusion the latest design concept for linear generators is represented.

Key words: linear electrical machine, linear generator, linear electric motor, reciprocating electrical machine, design.

List of References

1. Chevailler Samuel. Comparative Study and Selection Criteria of Linear Motors – Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Suisse, 2006.
2. Trattner A. et al. Novel Range Extender Concepts for 2025 with Regard to Small Engine Technologies // SAE Int. J. Alt. Power. – Vol. 1. – Issue 2 (Dec. 2012).
3. Mueller M. A. Electrical Generators for Direct Drive Wave Energy Converters // Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm. Distrib. – 2002. – Vol. 149. – Pp. 446 – 456.
4. Polinder Henk et al. Conventional and TFPM Linear Generators for Direct-Drive Wave Energy Conversion // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2005, June. – Vol. 20 – No. 2.
5. Korkmaz F., Topaloglu I. & Gurbuz R. Simulink Model of Vector Controlled Linear Induction Motor with End Effect for Electromagnetic Launcher System // ‘Elektronika i Elektrotehnika’ [Electronics and Electrical Engineering] Jour. – ISN 1392 – 1215 – 2014. – Vol. 20. – No. 1.
6. Rymsha V. V. Design of Linear Switched Reluctance Motors // Naukovi Pratsi Donetskogo Natsionalnogo Tekhnichnogo Universitetu [Scientific Works of Donetsk National Technical University]. – Donetsk: DVNZ “DonNTU”, 2003. – (Series: Elektrotehnika i Energetika [Electrical Engineering and Energetics]; Release 67).
7. Dukhanin V. I. Reciprocating Automotive Alternator. Design Analysis // International Scientific and Technical Conference of Automotive Engineer’s Association “Motor Vehicle and Tractor Industry in Russia: Development Priorities and Manpower Training” Dedicated to the 145 Anniversary of MGTU ‘MAMI’ [Moscow State University of Mechanical Engineering]. – 2010. – Nov. 17.
8. Cheng-Tsung et al. Optimal Design of a Direct Driven Slotless Tubular Linear Generator for Renewable Energy Extraction // Jour. of Physics : Conference Series 266 (2011) 012075.
9. Bianchi Nicola et al. Tubular Linear Permanent Magnet Motors: An Overall Comparison // IEEE Transactions On Industry Applications. – 2003, March/April. – Vol. 39. – No. 2.
10. Akhondi Hamidreza, Milimonfared Jafar. Design and Optimization of Tubular Permanent Magnet Linear Motor for Electric Power Steering System // Jour. of Asian Electric Vehicles. – 2009. – Vol. 7. – No. 2, Dec.
11. Mohamed Yasser Abdel-Rady I., Milimonfared Jafar. Optimum Design of Tubular Permanent-Magnet Motors for Thrust Characteristics Improvement by Combined Mahdi Ashabani Taguchi – Neural Network Approach // IEEE Transactions on Magnetics. – Vol. 46. – No. 12, Dec.
12. Hong Sun-Ki et al. Analysis of Tubular-type Linear Generator for Free-Piston Engine // Electrical Machines (ICEM), XXth International Conference, 2012.
13. Wang Jiabin, Jewell Geraint W., Howe David. A General Framework for the Analysis and Design of Tubular Linear Permanent Magnet Machines // IEEE Transactions on Magnetics. – 1999. – Vol. 35. – No. 3, May.
14. Vese Ioana-Cornelia, Radulescu Mircea M. Direct Thrust Control Scheme for a Tubular Linear Brushless Permanent-Magnet Actuator // Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering Series. – 2010. – No. 34.
15. Ningbo Sine Industrial Company Limited. [Digital Resource]. – Available at: www.sinemagnetic.com.

Vladimir Borisovich Bal, Ph. D. (Tech.), Associate Professor,
National Research University 'MPEI',
tel.: (495) 362-71-89, e-mail: balvb@mpei.ru.

Vladimir Yakovlevich Gecha, D. Sc. (Tech.),
Deputy Director General,
JC 'VNIEM Corporation',
tel.: (495) 365-26-69.

Vladimir Ivanovich Goncharov, Senior Lecturer,
National Research University 'MPEI',
tel.: (495) 362-71-89, e-mail: goncharovvi@mpei.ru.

Evgeny Victorovich Ezhov, Engineer,
National Research University 'MPEI',
tel.: (495) 362-74-29, e-mail: elmech.mpei@gmail.com.

Vasily Germanovich Chirkin, Ph. D., Student
National Research University 'MPEI'.

Sergy Vladimirovich Shirinsky, Ph. D. (Tech.), Associate Professor,
National Research University 'MPEI',
tel.: (495) 362-74-54, e-mail: shirinskiysv@mpei.ru.

Dmitry Anatolyevich Petrichenko, Ph. D. (Tech.), Leading Research Engineer,
Moscow State University of Mechanical Engineering (MAMI) Research and Development Centre 'Power Units',
tel.: (495) 223-05-23 (ext.: 1119),
e-mail: dmitry.petrichenko@gmail.com.