

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

Направление – Электротехника

УДК [UDC] 621.313.33

DOI 10.17816/transsyst2020645-24

© **В. В. Никитин, В. М. Стрепетов**

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ЛИНЕЙНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ТЯГОВЫЙ ПРИВОД В ГОРОДСКИХ РЕЛЬСОВЫХ И МАГНИТОЛЕВИТАЦИОННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов с высокой плотностью населения и застройки должно осуществляться на базе инновационных технических решений, которые позволяют упростить условия прокладки трасс, удешевить строительство, снизить уровень шума, обеспечить комфорт пассажиров и сократить затраты на эксплуатацию подвижного состава. Одним из таких решений, эффективность которого подтверждается зарубежным опытом, является применение линейного асинхронного тягового привода (ЛАТП) в городских рельсовых и магнитолевитационных транспортных системах. Это, в частности, позволяет увеличить допустимую величину уклонов пути до 60–65 ‰, уменьшить вертикальные габариты подвижного состава до 3,15 м, сократить диаметр тоннеля на 25–30 %. Освобождение колесной пары от функции реализации тягового усилия дает возможность применять на вагонах сочлененные полурамы тележек, что обеспечивает лучшее вписывание подвижного состава в кривые, и как следствие – меньший износ колес и рельсов и уменьшение уровня шума.

В настоящей статье выполнен анализ преимуществ и недостатков ЛАТП по сравнению с тяговым приводом традиционного исполнения, рассмотрены варианты конструктивного исполнения линейных асинхронных двигателей (ЛАД), процессы электромеханического преобразования энергии в ЛАД, представлен вариант построения системы управления ЛАТП. В статье рассмотрены плоские ЛАД поступательного движения, которые нашли применение в транспортных системах крупных городов Азии и Америки. Процессы преобразования энергии в ЛАД отличаются наличием продольного краевого эффекта, что определяет искажение результирующего магнитного поля, которое проявляется в уменьшении индукции и смещении пика кривой распределения индукции к сбегающему краю индуктора. Особенно резко этот эффект выражен в высокоскоростных ЛАД с высокой добротностью. При допущении линейности магнитной среды результирующую электромагнитную силу ЛАД можно рассматривать как сумму электромагнитных сил, создаваемых главным полем, а также прямым и обратным полями продольного краевого эффекта. Краевые эффекты снижают КПД и коэффициент мощности ЛАД. В статье рассмотрены способы компенсации краевых эффектов, а также дан обзор мирового опыта применения ЛАТП в рельсовых и магнитолевитационных транспортных системах.

Преимущества ЛАТП и мировой опыт его применения позволяют предположить, что для городских транспортных систем при скоростях движения до 100-120 км/ч данный привод может составить реальную конкуренцию традиционным системам городского рельсового транспорта.

Ключевые слова: городской электрический транспорт, тяговый электропривод, линейный асинхронный двигатель.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

Field –Electrical Engineering

© **Victor V. Nikitin, Vladimir M. Strepetov**

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

LINEAR ASYNCHRONOUS TRACTION DRIVE IN URBAN RAIL AND MAGLEV TRANSPORT SYSTEMS

The development of transport infrastructure of large cities with high population density and development should be carried out on the basis of innovative technical solutions, that allow to simplify the conditions of laying of tracks, reduce the cost of construction, reduce noise, provide comfort to passengers and reduce the cost of operating rolling stock. One such solution, the effectiveness of which is confirmed by foreign experience, is the use of linear asynchronous traction drive (LATD) in urban rail and maglev transport systems. This, in particular, allows to increase the allowable value of slope paths to 60–65 ‰, reduce the vertical dimensions of rolling stock to 3.15 m, reduce the diameter of the tunnel by 25–30 %. The release of the wheel pair from the function of the implementation of traction effort makes it possible to apply on the wagons the articulated semi-frames of trolleys, that ensures better rolling stock in curves, and as a result - less wear of wheels and rails and less noise.

This article analyzes the advantages and disadvantages of LATD compared to the traction drive of traditional execution, considers variants of constructive performance of linear induction motors (LIM), processes of electromechanical energy conversion in LIM, the option of building a LATD control system is presented. The article examines the flat LIM, which have found use in the transport systems of major cities in Asia and America. The processes of energy conversion in LIM are distinguished by the presence of a longitudinal edge effect, which determines the distortion of the resulting magnetic field, which is manifested in the reduction of induction and the displacement of the peak of the induction distribution curve to the escaping edge of the inductor. This effect is particularly manifested in high-speed LIMs with high quality. When the linearity of the magnetic environment is allowed, the resulting electromagnetic force of the LIM can be considered as the sum of electromagnetic forces created by the main field, as well as the direct and reverse fields of the longitudinal edge effect. The edge effects reduce efficiency and power ratio of LIM. The article discusses ways to compensate for the edge effects, as well as an overview of the world experience of the use of LATD in rail and maglev transport systems.

The advantages of LATD and the world experience of its use suggest that for urban transport systems at speeds of up to 100-120 km/h this drive can be a real competition to traditional urban rail systems.

Keywords: urban electric transport, traction electric drive, linear induction motor.

ВВЕДЕНИЕ

Рост территории городов, численности и плотности городского населения, потребность в повышении мобильности населения определяет необходимость сокращения времени в пути между конечными точками маршрута, вокзалами и аэропортами, центрами городов и пригородами, а также выдвигает жесткие требования к уровню шума и вибрациям от подвижного состава в пределах городских агломераций. Этим требованиям в наибольшей степени соответствует развитие транспортной инфраструктуры, в частности городского рельсового транспорта, на основе технических решений, которые позволяют упростить условия прокладки трасс, удешевить строительство, снизить уровень шума и одновременно обеспечить комфорт пассажиров и сократить затраты на эксплуатацию. В этой связи заслуживает внимания зарубежный опыт применения линейного асинхронного тягового привода (ЛАТП) в городских рельсовых и магнитолевитационных транспортных системах.

ПРЕИМУЩЕСТВА И ПРОБЛЕМЫ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ С ЛИНЕЙНЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Стоимость строительства. Высокая плотность городской застройки, зачастую сопряженная со сложным ландшафтом местности обуславливает жесткие требования к условиям прокладки трасс городского рельсового транспорта и делают стоимость строительства новых линий с традиционным типом тягового привода высокой. Применение ЛАТП позволяет упростить требования к прокладке трасс по величине уклонов пути, влияет на количество и протяженность искусственных сооружений (мосты, тоннели) на трассе, что в совокупности ведет к удешевлению строительных работ. Облегчение требований к трассировке достигается за счет того, что тяговое усилие в линейном приводе реализуется не за счет сил сцепления в контакте колесо-рельс, которые ограничиваются коэффициентом сцепления и сцепной массой транспортного средства (вагона), а путем непосредственного электромагнитного взаимодействия магнитного поля индуктора, размещаемого, как правило, на экипаже и тока реактивной шины, располагаемой на путевом полотне. В действующих транспортных системах с ЛАД крутизна уклонов достигает 60–65 %, в то время как в системах с традиционным типом привода предельная крутизна уклонов составляет лишь 35–40 %. ЛАТП позволяет также размещать остановочные пункты в более удобных для пассажиров местах.

Для подвижного состава с ЛАТП характерны меньшие габариты по сравнению с традиционным приводом. Плоская конструкция индуктора ЛАД и малые вертикальные габариты двигателя приводят к уменьшению

вертикальных габаритов экипажной части в целом. Так вертикальный габарит подвижного состава сокращается с 4,1 м до 3,15 м. При прокладке подземных трасс метрополитенов с ЛАТП имеет место уменьшение диаметра тоннеля с 7,3 м до 5,3 м. Это заметно удешевляет строительство подземных транспортных линий.

ЛАТП позволяет также применять на подвижном составе тележки с изменяемым углом осей колесных пар. Это позволяет уменьшить предельные радиусы кривых участков пути на трассах со 100 м до 70 м, а в депо – с 45 м до 35 м. Благодаря этому имеет место не только удешевление строительства, но и сокращение площадей, занимаемых деповским хозяйством.

Подвижной состав. Пример конструкции тележки вагона с ЛАД представлен на (Рис. 1). Из Рис.1 видно, что плоский индуктор ЛАД размещается в габаритах, ограниченных осью колесной пары и реактивной шиной путевого полотна.



Рис. 1. Тележка вагона с линейным асинхронным приводом компании *Bombardier*

Непосредственная реализация тягового усилия за счет электромагнитного взаимодействия индуктора, размещаемого на экипаже, с реактивной шиной, размещаемой на путевом полотне, исключает необходимость в тяговом редукторе. Благодаря этому вагоны имеют меньшую массу и габариты, а также лучшее соотношение массы тары и полезной нагрузки. При этом вагоны оказывают меньшее динамическое воздействие на путь и позволяют снизить уровень шума. Освобождение колесной пары от функций реализации тягового усилия дает возможность применять на вагонах сочлененные полурамы тележек. Такая конструкция тележек позволяет осям колесных пар смещаться друг относительно друга на некоторый угол при вхождении в кривые. Это обеспечивает лучшее

вписывание подвижного состава в кривые, и как следствие – меньший износ колес и рельсов и уменьшение уровня шума. Следует также отметить, что инерционность вращающихся масс у подвижного состава с ЛАТП почти в три раза меньше традиционного привода, что позволяет либо понизить энергозатраты в динамических режимах работы, либо реализовывать большие ускорения.

Энергетика тяги. Значительные уклоны пути позволяют рекуперировать большую энергию при движении по уклону с постоянной скоростью. В условиях городского транспорта, когда расстояние между поездами, движущимися навстречу друг другу невелико, это повышает эффективность энергообмена между ними и сокращает общий расход энергии на тяговые нужды.

Проблемы. Разомкнутый магнитопровод ЛАД обуславливает появление продольных и поперечных краевых эффектов, которые оказывают вредное влияние на характеристики ЛАТП. С ростом скорости движения возрастает искажение распределения магнитной индукции по продольной координате, что снижает величину тягового усилия. Большой воздушный зазор в ЛАД определяет высокое значение его намагничивающей силы, в результате чего ЛАД обладает относительно низким коэффициентом мощности. По этой причине тяговая сеть транспортных систем с ЛАТП выполняется на постоянном токе, а реактивный энергообмен перенесен в систему "инвертор-индуктор ЛАД". Ограниченность активной зоны индуктора ЛАД поперечным размером межколесного пространства с учетом вылета лобовых частей обмотки индуктора и реализация тягового усилия за счет электромагнитного взаимодействия обуславливает большие электромагнитные и тепловые нагрузки линейного двигателя. Определенные проблемы в эксплуатации может создавать также открытая конструкция активной зоны ЛАД. С одной стороны, при этом обеспечивается лучшее охлаждение активной зоны двигателя, но с другой стороны, она подвержена воздействию пыли, снега и повышенной влажности воздуха.

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ, ОСНОВЫ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛАД

Наиболее полная классификация ЛАД дана в [1]; согласно этой классификации в настоящей статье рассматриваются плоские ЛАД поступательного движения для тягового привода транспортных средств. По конструкции индуктора плоские ЛАД поступательного движения могут быть выполнены односторонними (ОЛАД) или двухсторонними (ДЛАД). ДЛАД имеют два индуктора, в пазы которых укладывается трехфазная обмотка, индуцирующая первичное бегущее магнитное поле. В зазоре

между индукторами перемещается вторичный элемент (ВЭ), который представляет собой чаще всего проводящую полосу и называется также реактивной шиной (РШ). При этом магнитный поток, возбуждаемый токами в обмотках индуктора, пронизывает ВЭ и замыкается по сердечникам обоих индукторов. ОЛАД имеют один индуктор, а магнитный поток, пронизывая ВЭ, замыкается через обратный магнитопровод (ферромагнитную подложку), размещаемую, как правило, под электропроводящим ВЭ. ДЛАД по сравнению с ОЛАД имеют несколько лучшие энергетические показатели, однако являются более материалоемкими и дорогими.

Плоские ЛАД могут быть выполнены с длинным ВЭ и коротким индуктором; такой вариант конструкции получил наибольшее распространение. В этом случае индуктор располагается на экипаже, а ВЭ – на путевом полотне. ВЭ ЛАД может иметь различные варианты конструктивного решения. Наиболее простой вариант – изотропная РШ, выполняемая из проводящего материала (алюминий или медь). Зачастую РШ выполняют из нескольких материалов (медная или алюминиевая шина со стальной подложкой) или в виде многослойной конструкции (медь-сталь-медь или алюминий-сталь-алюминий). РШ может быть выполнена монолитной или в виде решетчатой конструкции с выштампованными окнами, что упорядочивает распределение вихревых токов во ВЭ и несколько снижает влияние краевых эффектов. Возможно также применение ВЭ с обмоткой в виде беличьей клетки из медных стержней и торцевых короткозамыкающих проводников. Анализ различных вариантов конструкции ВЭ [2, 3] показал, что вариант медного ВЭ в виде "лестницы" или "беличьей клетки" наиболее эффективен, но этот вариант является более дорогим для широкого использования в транспортных системах, поэтому более целесообразен его алюминиевый аналог. Возможен вариант сложной конструкции ВЭ в виде комбинации сплошной центральной проводящей части и решетчатой проводящей конструкции по обеим сторонам от центральной части [4], обеспечивающей лучшую поперечную устойчивость экипажа.

В ряде конструкций, в частности, предложенных фирмой *Hitachi* [5], в зонах, где осуществляется пуск и разгон, РШ выполняется из меди, а в зонах установившегося движения – из алюминия. Выполнение РШ из меди позволяет по некоторым оценкам [6] повысить КПД ЛАД с $\eta=0,762$ до $\eta=0,789$. Впрочем, можно встретить и противоположные оценки [7], согласно которым в медной РШ с большей проводимостью потери от вихревых токов, вызванных краевыми эффектами, больше, чем в алюминиевой РШ.

Компания *Bombardier* в своих транспортных системах применяет на участках пуска и торможения ЛАД шихтованную ферромагнитную

подложку, что уменьшает потери мощности и увеличивает пусковую (тормозную) мощность; при этом в зонах установившегося движения ферромагнитная подложка выполняется сплошной.

Следует отметить, что выполнение РШ из материалов с различными (по продольной координате) свойствами приводит к тому, что параметры ЛАД по мере разгона, движения и торможения могут изменяться, что создает дополнительные трудности при построении системы управления экипажем.

Кроме этого, ЛАД могут различаться по схеме замыкания магнитного потока – с продольным замыканием потока в направлении движения (такие ЛАД получили наибольшее распространение) и с поперечным замыканием потока [8].

Основные физические процессы преобразования энергии, протекающие в ЛАД, и их отличие от процессов в асинхронном двигателе вращательного движения наиболее наглядно можно представить на основе одномерной теории [1, 9, 10] ДЛАД.

Одномерная теория ДЛАД базируется на расчетной модели, представленной на Рис. 2, и ряде упрощающих допущений: активная поверхность индуктора гладкая, обмотка реального индуктора, расположенная в пазах, представлена токовым слоем, распределенным по поверхности индуктора и образующим бегущую в продольном (вдоль оси Ox) направлении волну; магнитная проницаемость сердечников бесконечно большая и их насыщение отсутствует; электропроводность сердечников не учитывается, сердечники индукторов имеют бесконечную протяженность по продольной (X) и поперечной (Z) координатам, а продольный краевой эффект является следствием лишь ограниченной длины поверхностного токового слоя индуктора; вторичный элемент представляет собой изотропную проводящую немагнитную среду и заполняет все межиндукторное пространство.

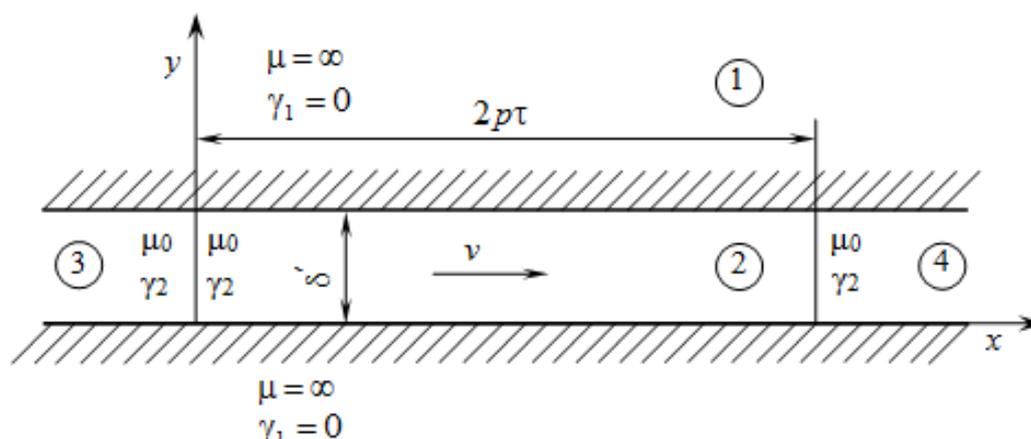


Рис. 2. Расчетная одномерная модель ДЛАД

В такой модели образуются следующие составляющие магнитного поля. В зоне 2, которая соответствует обмотанной части ЛАД: главное магнитное поле представляет бегущее вдоль оси OX с синхронной скоростью поле и имеющее постоянную амплитуду индукции; прямая (бегущая вдоль положительного направления оси OX) волна магнитной индукции продольного краевого эффекта, затухающая по продольной координате по экспоненциальному закону; обратная волна магнитной индукции продольного краевого эффекта, бегущая в противоположном направлении оси OX и также затухающая по продольной координате согласно экспоненциальному закону. Прямые волны магнитного поля краевого эффекта затухают медленнее, чем обратные. В высокоскоростных ЛАД прямые волны полей, вызванных продольным краевым эффектом могут достаточно глубоко проникать в область 2, иногда даже проникая в область 4. Это определяет искажение результирующего магнитного поля в ЛАД, вызываемое продольным краевым эффектом, и заключающееся в уменьшении индукции и смещении пика кривой индукции к сбегаящему краю индуктора в тем большей степени, чем ближе скольжение к нулю. Особенно резко этот эффект выражен в высокоскоростных ЛАД с высокой добротностью. Пример распределения магнитной индукции на поверхности РШ при различных скоростях движения для ЛАД транспортной системы *HSST* (Япония) представлен на Рис. 3 [11].

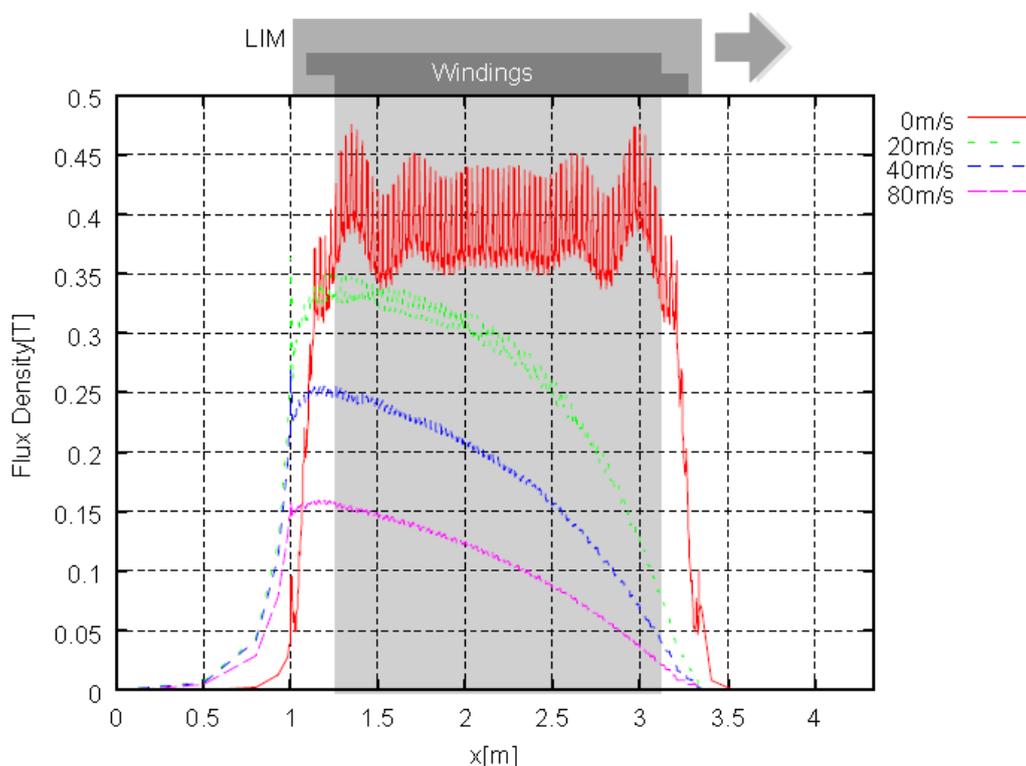


Рис. 3. Распределение магнитной индукции по длине активной части ЛАД в зависимости от скорости движения [11]

Важным параметром, характеризующим ЛАД, является добротность машины, или критерий качества, определяемый равенством:

$$\varepsilon_0 = \frac{\mu_0 \gamma_2 \omega \tau^2}{\pi^2},$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума;

γ_2 – электрическая проводимость ВЭ;

ω – угловая частота тока в обмотках индуктора;

τ – полюсное деление ЛАД.

В силу принятой линейности магнитной среды результирующую электромагнитную силу можно рассматривать как сумму электромагнитных сил, создаваемых главным полем, прямым и обратным полями продольного краевого эффекта:

$$F_x = F_0 + F_{\text{пр.кэ}} + F_{\text{об.кэ}}$$

Электромагнитная сила главного поля [1]:

$$F_0 = 2b\delta'p\tau \frac{\mu_0}{\alpha} J_m^2 \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon^2},$$

где $2b$ – ширина индуктора;

δ' – воздушный зазор в одномерной модели с гладкими активными поверхностями индукторов;

p – число пар полюсов обмотки индуктора;

$\alpha = \pi/\tau$ – волновое число;

J_m – плотность тока индуктора;

$\varepsilon = \varepsilon_0 s$;

s – скольжение.

Электромагнитная сила, создаваемая главным полем, при условии, что плотность первичного тока не зависит от нагрузки, может быть выражена в относительных единицах через скольжение s и добротность ЛАД ε_0 в таком виде:

$$F_0^* = \frac{F_0}{F_{0.б}} = \frac{2\varepsilon_0 s}{1 + (\varepsilon_0 s)^2},$$

где за базисное значение силы принято

$$F_{0.б} = b\delta'p\tau \frac{\mu_0}{\alpha} J_m^2.$$

Выражение $F_0^*(s)$ представляет собой механическую характеристику ЛАД в относительных единицах без учета влияния краевых эффектов.

Отсюда следует, что

$$F_0 \rightarrow F_{0.max} \quad \text{при} \quad s \rightarrow s_{кр} = \frac{1}{\varepsilon_0}.$$

Прямая и обратная волны индукции поля краевого эффекта создают электромагнитные силы, которые распределены по продольной координате (X) соответственно изменению индукции этих волн и затухают по мере затухания этих волн.

Прямая волна создает на набегающем крае индуктора тормозное усилие, которое по мере «продвижения» вглубь индуктора, становится двигательным, постепенно затухая с ростом координаты. Обратная волна на сбегающем крае индуктора создает двигательное усилие, которое по мере "продвижения" вглубь индуктора (против направления координатной оси Ox) становится тормозящим, постепенно затухая с ростом абсолютного значения координаты X .

По мере роста скорости ЛАД и уменьшения скольжения изменяются все три составляющие результирующей электромагнитной силы. Сила F_0 , создаваемая главным полем, аналогично тому, как это имеет место во вращающихся АД, возрастает, преодолевает максимум при $S=S_{кр}$, а затем уменьшается. В низкоскоростных ЛАД отрицательный вклад полей краевых эффектов с ростом скорости уменьшается, а положительный – увеличивается. Интересно заметить, что в ЛАД с низким значением добротности ϵ_0 влияние прямой и обратной волн продольного краевого эффекта проявляется лишь непосредственно вблизи краев индуктора и имеет практическое значение только для коротких индукторов ЛАД с малым числом пар полюсов, а положительное электромагнитное усилие (двигательное) может возникать даже при нулевом скольжении.

В двигателях с большими значениями добротности ϵ_0 есть особенность: отрицательные части кривой распределения силы, создаваемой прямым полем продольного краевого эффекта, практически во всем скоростном диапазоне больше положительных, поэтому в целом это прямое поле создает отрицательное продольное усилие в большей части скоростного диапазона ЛАД. Это создает более ярко выраженное неравномерное распределение результирующей силы F_x по координате X : в набегающей части индуктора результирующая сила меньше, в сбегающей – больше.

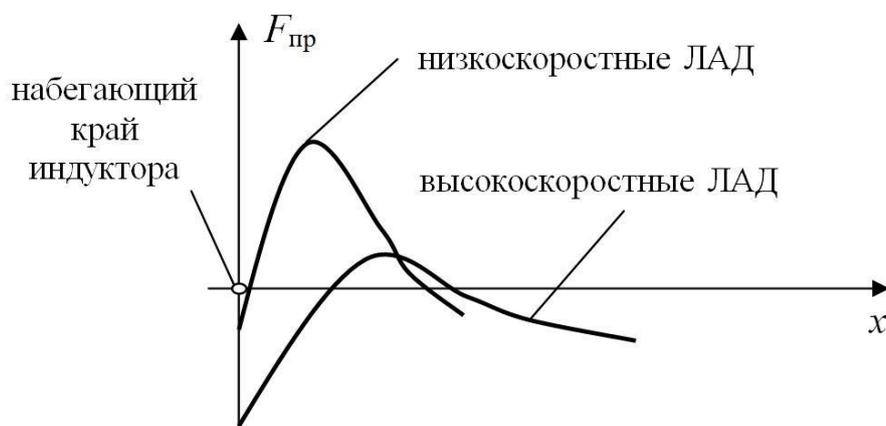


Рис. 4. Характер распределения электромагнитного усилия по продольной координате от прямой волны продольного краевого эффекта в низкоскоростных и высокоскоростных ЛАД

С. Ямамура [10], анализируя одномерные, двухмерные и трехмерные модели ЛАД, показал, что во многих случаях двухмерное, а иногда и одномерное приближение, дает вполне приемлемые для практических целей результаты (как правило, для низкоскоростных ЛАД). Однако для высокоскоростных ЛАД необходимо использование трехмерных моделей [12–15].

Краевые эффекты снижают КПД и коэффициент мощности ЛАД, что является их существенным недостатком и ограничивает область применения по сравнению с вращающимся аналогом асинхронной машины. Для компенсации продольных краевых эффектов предложено несколько технических решений.

Один из вариантов – компенсационная обмотка, предложенная С. Ямамурой [10]. Принципиально иной подход заключается в том, чтобы индуцировать во ВЭ (РШ) вихревые «контртоки», которые синхронизированы по частоте с током индуктора и наводятся во входящей зоне РШ перед набегающим краем индуктора ЛАД [16]. Такие «контртоки» могут создаваться компенсаторами вращающегося типа и статическими компенсаторами краевых эффектов. На Рис. 5 представлен вращающийся компенсатор краевого эффекта с постоянными магнитами, установленный на набегающем крае индуктора ЛАД [16].

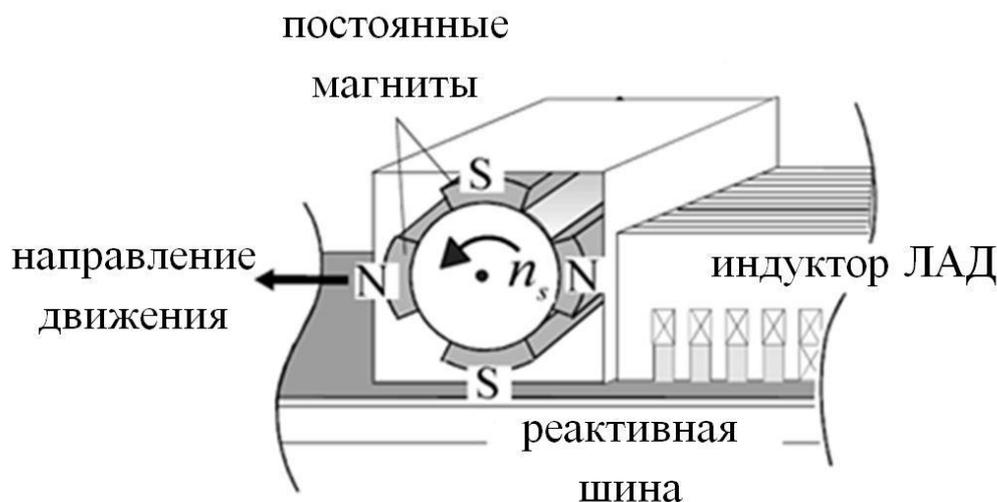


Рис. 5. Вращающийся компенсатор краевого эффекта

Частота вращения компенсатора определяется в зависимости от частоты тока обмотки индуктора:

$$n_s = 2f_1/p_r,$$

где f_1 – частота тока индуктора;

p_r – число полюсов вращающегося компенсатора.

Преимуществами такого типа компенсатора является отсутствие омических потерь при создании компенсирующего магнитного поля, а недостатком – необходимость привода компенсатора, который должен обеспечивать частоту вращения, согласованную с выходной частотой инвертора, питающего обмотку индуктора.

Вариант статического компенсатора представлен на Рис. 6 [16].

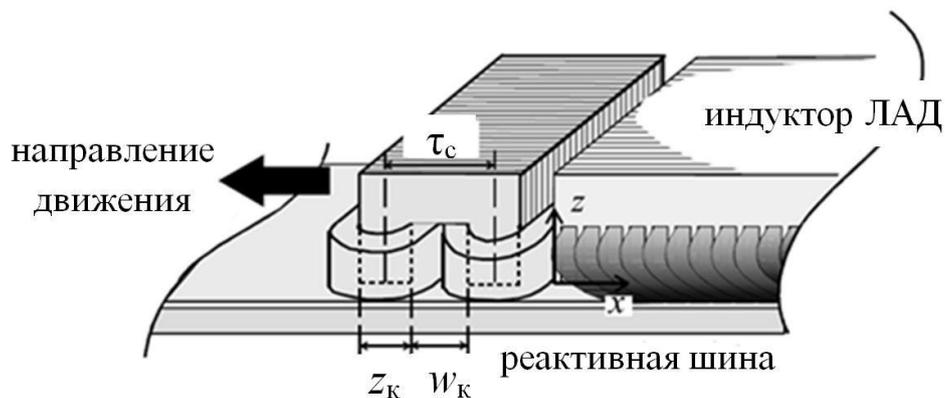


Рис. 6. Статический компенсатор краевого эффекта

Частота тока, питающего обмотки компенсатора, равна частоте тока индуктора ЛАД. Недостатком такого варианта компенсатора является наличие собственного краевого эффекта, который уменьшает тяговое усилие компенсированного ЛАД. Однако при оптимальном выборе полюсного шага (τ_c), ширины полюса (z_{tc}) и намагничивающей силы статического компенсатора это снижение незначительно, а наиболее значительного повышения КПД удастся добиться для ЛАД с длинным статором (число полюсов магнитного поля индуктора – 20 и более).

В ЛАТП экипажей на магнитном подвесе коммерческой линии в г. Чанша (Китай) для уменьшения влияния краевых эффектов на каждом вагоне применены по пять односторонних ЛАД (с каждой стороны кузова вагона), при этом фазные обмотки индукторов соединены последовательно с транспозицией (Рис. 7) [17].

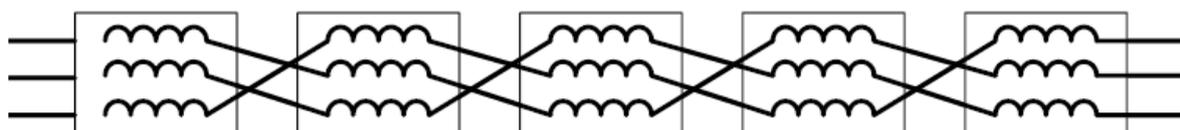


Рис. 7. Последовательное соединение обмоток индуктора ОЛАД с транспозицией (Чанша-маглев, Китай)

Особенностью электромагнитных силовых взаимодействий односторонних ЛАД является возникновение усилий вдоль трех координат: продольной (тяговое или тормозное), вертикальной (усилие,

действующее в нормальном к рабочей поверхности индуктора и поверхности ВЭ направлении) и поперечной координаты [18 – 20]. С этим явлением связан так называемый эффект "дельфина", который обусловлен двумя факторами. Во-первых, электромагнитным притяжением между индуктором и ферромагнитной подложкой (обратным магнитопроводом) ВЭ в односторонних ЛАД. Если такой двигатель используется в транспортных системах с магнитной левитацией, то это обстоятельство препятствует левитации и может оказывать существенное негативное влияние на параметры и характеристики тягового привода. Во-вторых, имеет место электродинамическое взаимодействие между токами обмотки статора и наведенными токами во ВЭ. В односторонних ЛАД это обстоятельство способствует левитации. Соотношение отрицательного, препятствующего левитации, и положительного, способствующего левитации, нормальных усилий зависит от многих факторов (скорости, величины воздушного зазора, частоты питания обмотки статора), однако искажение магнитного поля под действием вторичного продольного краевого эффекта почти всегда приводит к тому, что набегающий край индуктора испытывает поднимающее усилие, а сбегающий край – притягивающее усилие. Эффект "дельфина" приводит к появлению вращающих моментов, действующих в вертикальной плоскости, и дополнительных нагрузок, действующих на систему подвеса индуктора и/или экипажа. При малых скольжениях нормальное усилие может существенно превышать тяговое усилие ЛАД. Одним из вариантов снижения эффекта "дельфина" является увеличение воздушного зазора под сбегающим краем индуктора (Рис. 8).

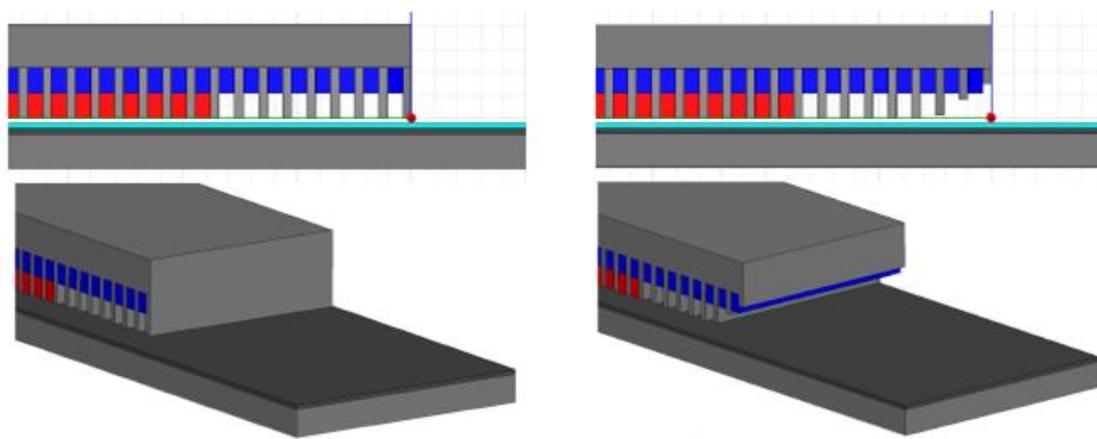


Рис. 8. Исходная конструкция сердечника индуктора (слева) и конструкция с увеличенным воздушным зазором под сбегающим краем индуктора (справа) [21]

Для описания процессов электромеханического преобразования энергии в ЛАД применяется Т-образная схема замещения [1, 10, 22]. Для задач анализа динамических процессов и построения системы управления

T-образная схема замещения ЛАД представляется в d - q осях, при этом схема в q -оси полностью повторяет схему замещения АД традиционного исполнения, а схема в d -оси учитывает краевые эффекты, чем и отличается от схемы замещения вращающегося АД (Рис. 9).

Многие зарубежные исследователи для построения системы управления ЛАД используют подход, предложенный J. Dupan [23], согласно которому поправочный коэффициент, учитывающий влияние вихревых токов, наводимых во ВЭ краевыми эффектами, является безразмерным и определяется равенством

$$f(Q) = (1 - e^{-Q}) \frac{1}{Q},$$

$$Q = \frac{l_r R_r}{V_r L_r},$$

где l_r – длина индуктора;

R_r – активное сопротивление ВЭ;

V_r – скорость движения индуктора;

L_r – индуктивность ВЭ.

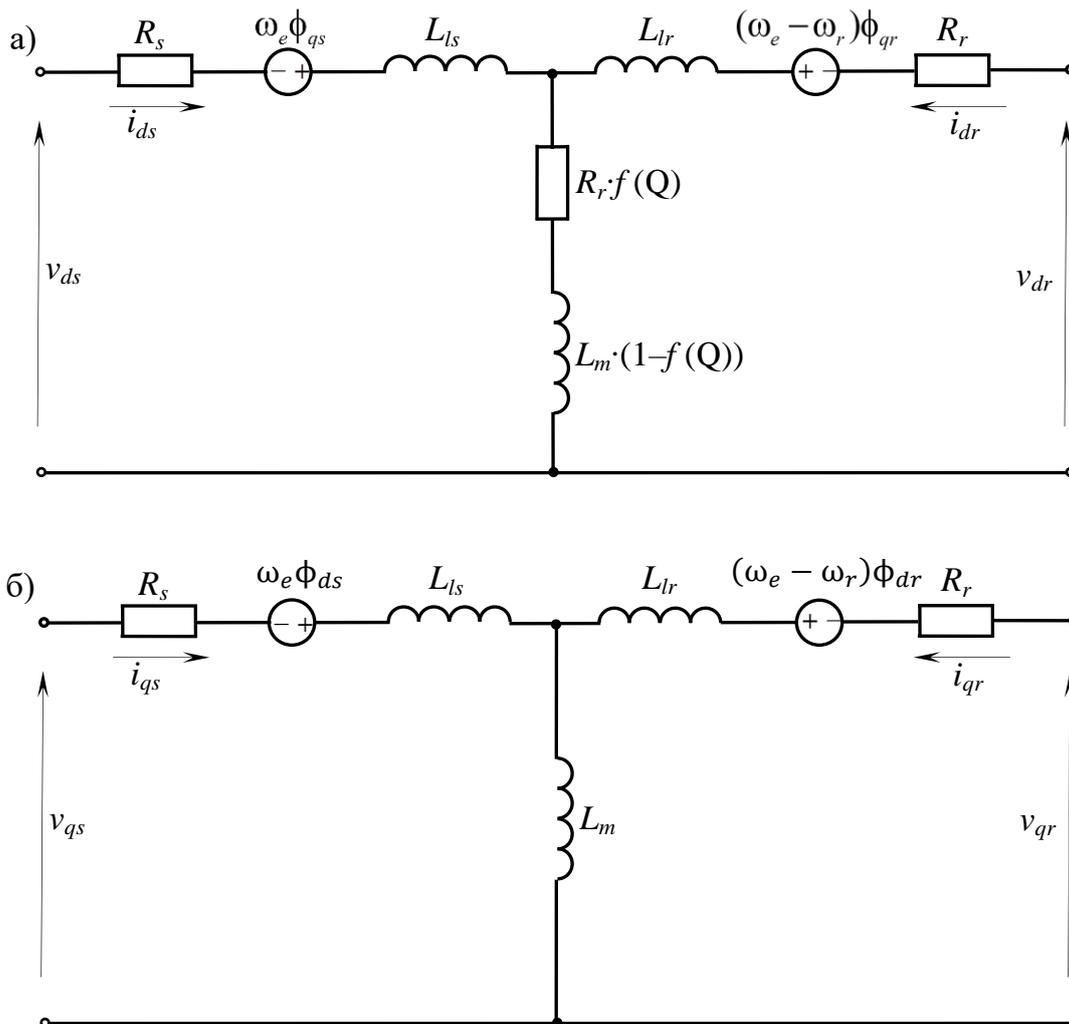


Рис. 9. Схема замещения ЛАД в d -оси (а) и q -оси (б)

Поправочный коэффициент $f(Q)$ вводится в ветвь намагничивания Т-образной схемы замещения ЛАД по d -оси.

Т-образной схеме замещения ЛАД в d - q осях соответствует следующая система уравнений [24]

$$\begin{aligned}v_{ds} &= R_s i_{ds} + R_r f(Q)(i_{ds} + i_{dr}) + D\phi_{ds} - \omega_e \phi_{qs}, \\v_{qs} &= R_s i_{qs} + D\phi_{qs} + \omega_e \phi_{ds}, \\v_{dr} &= R_r i_{dr} + R_r f(Q)(i_{ds} + i_{dr}) + D\phi_{dr} - (\omega_e - \omega_r)\phi_{qr} = 0, \\v_{qr} &= R_r i_{qr} + D\phi_{qr} + (\omega_e - \omega_r)\phi_{dr} = 0, \\\phi_{ds} &= L_{lr} i_{ds} + L_m(1 - f(Q))(i_{ds} + i_{dr}), \\\phi_{qs} &= L_{ls} i_{qs} + L_m(i_{qs} + i_{qr}), \\\phi_{dr} &= L_{lr} i_{dr} + L_m(1 - f(Q))(i_{ds} + i_{qr}), \\\phi_{qr} &= L_{lr} i_{qr} + L_m(i_{ds} + i_{dr}),\end{aligned}$$

где D – оператор дифференцирования.

Тяговое усилие определяется выражением:

$$F_e = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} \frac{L_m(1 - f(Q))}{L_r - L_m f(Q)} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds})$$

где p – число полюсов ЛАД;

Последнее выражение может быть приведено к виду:

$$F_e = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} \frac{L_m(1 - f(Q))}{(L_r - L_m f(Q))} \phi_{dr} i_{qs}.$$

Один из возможных вариантов построения системы управления односторонним ЛАД на основе приведенных выше уравнений, реализующий не прямое управление с ориентацией по полю с учетом краевых эффектов, представлен в работе [24] (Рис. 10).

Выходные сигналы системы управления с пропорционально-интегральным регулятором для автономного инвертора напряжения, который осуществляет питание обмотки статора ЛАД, имеют вид [24]:

$$\begin{aligned}v_{ds}^* &= \left(K_p + K_i \frac{1}{s}\right) (i_{ds}^* - i_{ds}) - \frac{\pi}{\tau} v_e L_\sigma(Q) i_{qs}^*, \\v_{qs}^* &= \left(K_p + K_i \frac{1}{s}\right) (i_{qs}^* - i_{qs}) + \frac{\pi}{\tau} v_e L_\sigma(Q) i_{ds}^* + p \frac{L_m}{L_r} \frac{\pi}{\tau} v_r \phi_{dr},\end{aligned}$$

где общая индуктивность рассеяния определяется выражением:

$$L_\sigma(Q) = L_s - L_m f(Q) - \frac{[L_m(1 - f(Q))]^2}{L_r - L_m f(Q)}.$$

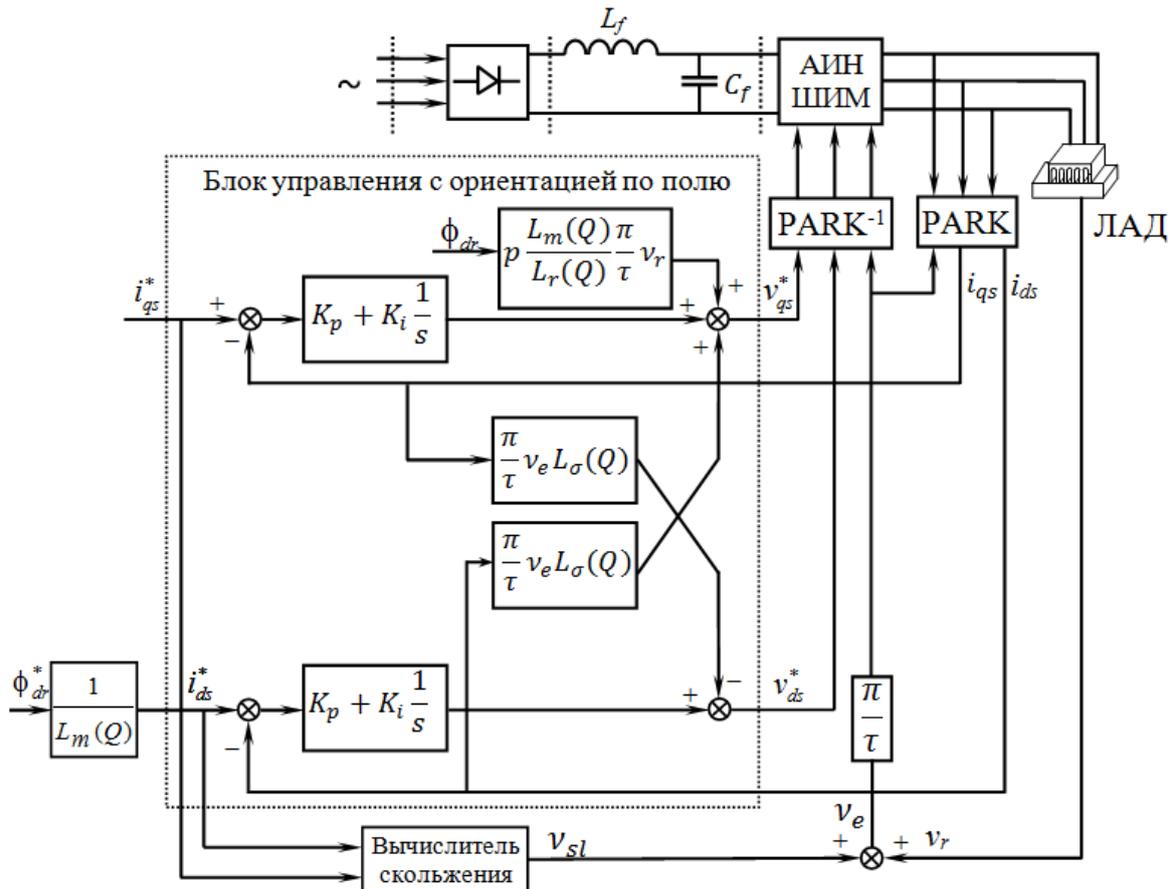


Рис. 10. Вариант структурно-функциональной схемы системы управления ЛАД с учетом влияния краевых эффектов

МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ТЯГОВОГО ПРИВОДА В ГОРОДСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

ЛАТП является альтернативой традиционному тяговому приводу на базе асинхронного двигателя вращательного движения, реализующему силу тяги за счет сцепления колеса с рельсом. Наибольшее распространение линейный привод получил для городских железных дорог, как наземного, так и подземного заложения, реализующих относительно невысокие скорости движения (до 100-120 км/ч). Несмотря на имеющиеся недостатки, ЛАД является конкурентоспособным и нашел применение в транспортных системах крупных городов (Табл. 1).

К настоящему времени во многих городах Канады, США, Японии, Южной Кореи, Китая и Малайзии в эксплуатации находится свыше 300 км городских железных дорог и более 1800 единиц подвижного состава с линейным асинхронным тяговым приводом, включая системы с магнитным подвесом.

Таблица. Городские железные дороги с ЛАТП

Город, страна	Год начала эксплуатации	Длина, км	Кол-во единиц подв. состава
Торонто (Канада)	1985	6,4	112
Ванкувер (Канада)	1986, 2002	49,5	298
Детройт (США)	1987	4,7	12
Осака (Япония)	1990, 2006	26,9	180
Токио (Япония)	1991, 2000	40,7	472
Куала-Лумпур (Малайзия)	1998	46,7	266
Кобе (Япония)	2001	7,9	30
Нью-Йорк (США)	2003	13	32
Фукуока (Япония)	2005	12	68
Нагоя (Япония)	2005	8,9	27
Пекин (Китай)	2008	28,1	40
Йокогама (Япония)	2008	13	68
Гуанчжоу (Китай)	2009	31,9	192
Йончжин (Китай)	2013	18,1	32
Инчхон (Южная Корея)	2014	6,1	12
Сендай (Япония)	2015	13,9	60
Чанша (Китай)	2016	18,6	н.д.
Пекин (Китай)	2017	9,1	н.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тяговый привод на основе ЛАД по сравнению с традиционным тяговым приводом и реализующим тяговое усилие за счет силы сцепления колеса с рельсом, имеет ряд существенных преимуществ, позволяющих упростить и удешевить строительство городских железных дорог, особенно в условиях плотной городской застройки, облегчить конструкцию подвижного состава, уменьшить шум и износ колес и рельсов, а также реализовывать большие ускорения в пуско-тормозных режимах за счет непосредственной реализации тягового усилия между магнитным полем индуктора ЛАД, размещенного на экипаже, и током вторичного элемента (как правило, проводящей реактивной шиной), размещенной на путевом полотне. Несмотря на имеющиеся недостатки ЛАД, связанные в первую очередь с возникновением краевых эффектов и большими воздушными зазорами между индуктором и реактивной шиной, отмеченные преимущества этого типа тягового привода привлекают внимание городских администраций и транспортных компаний, выполняющих городские перевозки, и в ряде случаев могут составлять реальную конкуренцию традиционным системам городского рельсового транспорта.

Авторы заявляют что:

1. У них нет конфликта интересов;
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с. [Veselovsky ON, Konyaev AJu, Sarapulov FN. *Lineinye asinkhronnye dvigateli*. Moscow: Energoatomizdat, 1991. 256 p. (in Russ.)].
2. Lee H-W, Lee SG, Park C, et al. Characteristic Analysis of a Linear Induction Motor for a Lightweight Train According to Various Secondary Schemes. *IJR International Journal of Railway*. 2008;1(1):6-11.
3. Li M, Yang Z, Lin F, Sun H. Characteristics of Linear Induction Motor Considering Material of Reaction Plate Change. *Journal of Computers*. 2013;8(1):102-107. doi: 10.4304/jcp.8.1.102-107
4. Чехова А.А., Соломин А.В. Тяговый линейный асинхронный двигатель для городского МАГЛЕВ транспорта // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т.6. – № 1. – С. 120–128. [Chekhova AA, Solomin AV. Traction Linear Induction Motor of Urban MAGLEV Transport. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(1):120-128. (In Russ., Engl.). doi: 10.17816/transsyst202061120-128
5. Isobe E. Linear Metro Transport System for the 21th Century. *Hitachi Review*. 1999;48(3):144-148.
6. Nonaka S, Higuchi T. Design of a Single Sided Linear Induction Motors for Urban Transit. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 1988;37(3):167-173. doi: 10.1109/25.16543
7. Zhu K, Wang YM, Fan JF. Influence of Reaction Plate's Material and Configuration on the Performance of LIM Urban Transit Vehicle. *Urban Mass Transit*. 2007;10(9):55-57.
8. Соломин В.А., Соломин А.В., Замшина Л.Л. Линейные асинхронные тяговые двигатели для высокоскоростного подвижного состава и их математическое моделирование. – М.: ФГБОУ УМЦ ЖДТ, 2015. – 164 с. [Solomin VA, Solomin AV, Zamshina LL. *Lineinye asinkhronnye dvigateli dla vysokoskorostnogo podvzhnogo sostava i ikh matematicheskoye modelirovanie*. Moscow: FGBOU UMC ZHDT; 2015. 164 p. (In Russ.)].
9. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. – Л.: Энергия, 1970. – 271 с. [Voldek AI. *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom*. Leningrad: Energia; 1970. 271 p. (In Russ.)].
10. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 180 с. [Yamamura S. *Teoria lineinykh asinkhronnykh dvigatelei*. Leningrad: Energoatomizdat; 1983. 180 p. (In Russ.)].
11. Nozaki Y, Koseki T, Masada E. Analysis of Linear Induction Motor for HSST and Linear Metro using Finite Difference Method. 5th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications. Proc. LDIA-2005. pp. 168-171.
12. Скобелев В.Е., Соловьев Г.И., Епифанов А.П. Анализ путей улучшения характеристик тяговых линейных асинхронных двигателей для высокоскоростного наземного транспорта // Железные дороги мира. – 1978.

- № 2. – С. 3–12. [Skobelev VE, Soloviev GI, Epifanov AP. Analiz putei uluchshenia kharakteristik tiagovykh lineinykh asinkhronnykh dvigatelei dla vysokoskorostnogo nazemnogo transporta. *Zheleznye Dorogi Mira*. 1978;2:3-12. (In Russ.)].
13. Соловьев Г.И. Трехмерная теория линейных асинхронных двигателей. Исследование путей улучшения их характеристик применительно к высокоскоростному наземному транспорту: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Ленинград, 1978. – 212 с. [Soloviev GI. Trekhmernaya teoriya lineinykh asinkhronnykh dvigatelei. Issledovanie putei uluchshenia ikh kharakteristik primenitelno k vysokoskorostnomu nazemnomu transportu [dissertation]. Leningrad; 1978. 212 p. (In Russ.)].
14. Епифанов А.П. Основные вопросы проектирования тяговых линейных асинхронных двигателей. Ч.1, Ч.2, Ч.3 // *Электротехника*. – 1992, №№ 1, 6, 10. [Epifanov A.P. *Osnovnye voprosy proektirovaniya tiagovykh lineinykh asinkhronnykh dvigatelei*. P.1, P.2, P.3. *Elektrotehnika*. 1992; 1,6,10. (in Russ.)].
15. Ким К.К., Иванов С.Н. Моделирование комбинированного электропривода // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2019. – Т. 62. – № 3. – С. 44–50. [Kim KK, Ivanov SN. Modelling of the Combined Electric Drive. *South Russian State Polytechnic University (NPI). Электромеханика*. 2019;62(3):44-50. (In Russ.)] doi:10.17213/0136-3360-2019-3-44-50
16. Fujii N, Hoshi T, Tanabe Y. Methods for Improving Efficiency of Linear Induction Motor for Urban Transit. *JSME International Journal, Series C*. 2004;47(2):512-517. doi: 10.1299/jsmec.47.512
17. He Y, Wang Y-S, Lu Q, et al. Design of Single-Sided Linear Induction Motor for Low-Speed Maglev Vehicle in 160 km/h and Variable Slip Frequency Control. *Transportation Systems and Technology*. 2018;4(2):120-128. doi: 10.17816/transsyst201842120-128
18. Черных И.В., Сарапулов Ф.Н. Основы теории и моделирование линейного асинхронного двигателя как объекта управления. – Екатеринбург, УГТУ, 1999. – 229 С. [Chernykh IV, Sarapulov FN. *Osnovy teorii i modelirovanie lineinogo asinkhronnogo dvigatel'ia kak ob'ekta upravleniia*. *Ekaterinburg*. UGTU. 1999. 229 p. (In Russ.)].
19. Епифанов А.П., Лебедев А.М., Скобелев В.Е. и др. Исследование интегральных нормальных сил в тяговом линейном асинхронном двигателе // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1984. – № 4. – С. 28–34. [Epifanov AP, Lebedev AM, Skobelev VE, et al. Issledovanie integralnykh normalnykh sil v tiagovom lineinom asinkhronnom dvigatele. *Izvestia vuzov. Elektromekhanika*. 1984;4:28-34. (In Russ.)].
20. Епифанов А.П., Лебедев А.М., Скобелев В.Е. и др. Метод исследования плотности распределения нормальных сил в одностороннем линейном асинхронном двигателе // *Известия вузов. Электромеханика*. – 1985. – № 1. – С. 91–96. [Epifanov AP, Lebedev AM, Skobelev VE, et al. Metod issledovaniia plotnosti raspredeleniia normalnykh sil v odnostoronnem lineinom asinkhronnom dvigatele. *Izvestia vuzov. Elektromekhanika*. 1985;1:91-96. (In Russ.)].
21. Lee H-W, Park C-B, Lee B-S. Thrust Performance Improvement of a Linear Induction Motor. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2011;6(1):81-85. doi: 10.5370/JEET.2011.6.1.081
22. Сарапулов Ф.Н., Сарапулов С.Ф., Шымчак П. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2001. – 236 С. [Sarapulov FN, Sarapulov SF, Shymchak P.

Matematicheskie modeli lineinykh induktsionnykh mashin na osnove skhem zameschenia. Ekaterinburg: UGTU-UII; 2011. 236 p. (In Russ.)].

23. Duncan J. Linear Induction Motor Equivalent Circuit Model. *Transportation Technology*. IEE Proceedings. 1983;130(5):51-57.
24. Boucheta A, Bousserhane IK, Hazzab A, Sicard P, Fellah MK. Speed Control of Linear Induction Motor Using Sliding Mode Controller Considering the End Effects. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2012;7(1):34-45. doi: 10.5370/JEET.2012.7.1.34

Сведения об авторах:

Никитин Виктор Валерьевич, доктор технических наук, доцент;

адрес: 190031, Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 9;

e-Library SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Стрепетов Владимир Михайлович, кандидат технических наук, доцент;

e-Library SPIN: 4649-2141; ORCID 0000-0002-4072-4519;

E-mail: strepetov.vm@mail.ru

Information about the authors:

Viktor V. Nikitin, Doctor of Technical Sciences, Professor;

e-Library SPIN: 6864-5678; ORCID: 0000-0002-5699-0424;

E-mail: pgups.emks@mail.ru

Vladimir M. Strepetov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

e-Library SPIN: 4649-2141; ORCID 0000-0002-4072-4519;

E-mail: strepetov.vm@mail.ru

Цитировать:

Никитин В.В, Стрепетов В.М. Линейный асинхронный тяговый привод в городских рельсовых и магнитолевитационных транспортных системах // Транспортные системы и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 4. – С. 5–24. doi: 10.17816/transsyst2020645-24

To cite this article:

Nikitin VV, Strepetov VM. Linear Asynchronous Traction Drive in Urban Rail and Maglev Transport Systems. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(4):5-24. doi: 10.17816/transsyst2020645-24