

МИРОНОВ СТАНИСЛАВ ЕВГЕНЬЕВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЯГОВОГО ЛИНЕЙНОГО
АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ГОРОДСКОГО ТРАНСПОРТА

Специальность 05.09.01 – Электромеханика
и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Уральском федеральном университете имени Первого президента России Б.Н.Ельцина на кафедре «Электротехника и электротехнологические системы», г. Екатеринбург.

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор, Сарапулов Федор Никитич
Научный консультант:	кандидат технических наук, доцент, Бегалов Владимир Анатольевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор, Смолин Георгий Константинович кандидат технических наук, доцент, Родионов Игорь Евгеньевич.
Ведущая организация:	ЗАО «Энергомаш (Екатеринбург) - Уралэлектротяжмаш»

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уральского федерального университета.

Защита диссертации состоится 22 декабря 2010 года в 14¹⁵ на заседании диссертационного совета Д 212.285.03 при Уральском федеральном университете по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. Э 406

Отзывы в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ, К-2, ученому секретарю совета.

Автореферат разослан 19 ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.285.03
д.т.н., доцент

Зюзев А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. При разработке электропривода для транспортных систем на основе линейного асинхронного двигателя (ЛАД) актуальной задачей является анализ влияния конструкционных изменений и режимов работы на тяговые усилия. Необходимость такого анализа возникает как при проектировании двигателя, так и в ходе его эксплуатации.

В частности, необходимо учесть возможное изменение параметров конструктивных элементов, таких как тип используемой обмотки, схема ее укладки в пазы, использование дополнительных обмоток в пазах, подбор параметров питания обмоток, изменение ширины вторичного элемента, толщины или свойств активного слоя, оценить влияние технологических разрывов во вторичном элементе (ВЭ) на характеристики двигателя. Необходимо учитывать перекосы двигателя относительно ВЭ, возникающие при движении, наличие нормальных усилий, нагружающих опоры путевой структуры, определить возможные способы уменьшения сил притяжения с помощью выбора режима работы или изменения конструкции еще на стадии проектирования.

Такие исследования осложняются тем, что линейные асинхронные двигатели отличаются от вращающихся электрических машин характером протекания в них электромагнитных процессов. Основные отличия заключаются в следующем: имеются краевые эффекты; индуктор и вторичный элемент ЛАД, как правило, работают в разных тепловых режимах; усилия распределяются неравномерно по длине вторичного элемента (ВЭ).

Применение известных методов расчета, используемых в приводах вращательного действия, является некорректным, т.к. они основаны на ряде допущений, которые для линейных машин не выполняются и ведут к неточным результатам.

Также следует отметить, что при выполнении полевых расчетов без значительных упрощений магнитные потоки определяются как многомерные функции, формируемые на основе полученных результатов для заданного числа положений подвижного объекта и заданного числа значений тока в каждой обмотке. Такие расчеты требуют больших затрат времени, что на практике делает их трудновыполнимыми.

Вместе с тем, как показывает опыт, модели, построенные на базе детализированных до секции обмотки и зубцового деления электрических и магнитных схемах замещения, позволяют достаточно простыми средствами и с достаточной для практики точностью исследовать динамические режимы ЛАД в составе электромеханической системы за время, исчисляемое несколькими минутами или десятками секунд.

Таким образом, актуальной является разработка программных средств и «быстрых» математических моделей, учитывающих указанные особенности ЛАД и обеспечивающих проведение исследования его характеристик. Данная работа основывается на разработках коллектива кафедры электротехники и

электротехнологических систем УрФУ в области линейных индукционных машин и развивает их.

Объектом исследования является линейный асинхронный двигатель, **предмет исследования** – тяговые и силовые характеристики ЛАД.

Цели работы:

1. Разработать методику и программные средства для расчета тяговых и силовых характеристик ЛАД в динамических и статических режимах на основе детализированных электрических и магнитных схем замещения;
2. Исследовать тяговые и силовые характеристики ЛАД конкретных модификаций в их рабочих режимах на основе разработанной методики.
3. Сформулировать рекомендации по формированию режимов работы и конструкции ЛАД.

Для выполнения поставленных целей решаются **следующие задачи:**

1. Разработка модификаций математической модели линейного асинхронного двигателя для транспортной системы на основе детализированных схем замещения. Они позволяют провести исследование двигателей с различными особенностями конструкции при помощи детализированной магнитной схемы замещения, с учетом влияния краевых зон магнитной цепи и потоков рассеяния в немагнитном зазоре, поперечного краевого эффекта и зубчатости сердечника индуктора.

2. Формирование модели и ее модификаций при изменении элементов конструкции линейного асинхронного двигателя для учета неравномерности зазора, модуляции параметров вторичного элемента по длине, особенностей моделирования двухчастотного питания обмоток индуктора.

3. Анализ влияния на тяговые и энергетические характеристики неравномерности зазора между индуктором и вторичным элементом, конструктивных изменений в обмотке, разрывов во вторичном элементе ЛАД.

Методы исследования. В работе используются методы теории электрических цепей, метод детализированных магнитных и электрических схем замещения, реализованный в математическом пакете *MATHCAD*, методы компьютерного моделирования с помощью пакета *ELCUT*.

Научная новизна заключается в разработке математической модели электромеханических процессов в ЛАД, позволяющей учесть влияние на тяговые и энергетические характеристики неравномерности зазора между индуктором и вторичным элементом, конструктивных и схемных особенностей обмотки ЛАД, наличия разрывов во вторичном элементе ЛАД, изменения параметров питания обмотки двигателя.

Практическая ценность заключается в следующих аспектах:

1. Создание программных средств для исследования процессов в линейном асинхронном двигателе.
2. Получение результатов анализа процессов в ЛАД при неравномерном зазоре, разрывах вторичного элемента, применении дополнительных обмоток индуктора, изменения элементов конструкции.
3. Создание рекомендаций по конструктивному исполнению линейного двигателя и режимам работы тягового асинхронного электропривода.

Основные аспекты, выносимые на защиту:

- математическая модель линейного асинхронного двигателя для транспортной системы на основе детализированных схем замещения и ее модификации при изменении элементов конструкции линейного асинхронного двигателя для учета неравномерности зазора, модуляции параметров вторичного элемента по длине, особенностей моделирования двухчастотного питания обмоток индуктора;
- результаты анализа влияния на тяговые и энергетические характеристики неравномерности зазора между индуктором и вторичным элементом, конструкционных изменений в обмотке, разрывов во вторичном элементе ЛАД, сравнения с данными, полученными на испытательном стенде;
- рекомендации по конструктивному исполнению и режимам работы, сформулированные в ходе исследования промышленного образца тягового ЛАД.

Внедрение. Результаты работы используются: 1. ОАО «Инженерно-научный центр «ТЭМП» (г. Москва) для решения текущих задач по эксплуатации тяговых ЛАД поезда монорельсовой дороги, а также при разработке новых конструкций тяговых двигателей; 2. На кафедре электротехники и электротехнологических систем УрФУ в учебном процессе, при курсовом и дипломном проектировании, проведении научных исследований.

Апробация. Основные результаты доложены, обсуждены и одобрены на следующих научных мероприятиях:

- VI международный симпозиум ЭЛМАШ-2006. Москва, октябрь 2006 г.
- XI Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Алушта, сентябрь 2006 г.
- Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Актуальные проблемы ресурсо- и энергосберегающих электротехнологий», Екатеринбург, УГТУ-УПИ, апрель 2006 г.
- VIII региональная научно-практическая конференция с международным участием «Энергосберегающие техника и технологии». Екатеринбург, май 2005 г.
- XIII Международная научно-техническая конференция «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург, УГТУ-УПИ, март, 2005 г.
- VI International Conference «Unconventional Electromechanical and Electrical Systems». Alushta, Ukraine, September, 2004 г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 12 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников и 2 приложений общим объемом 169 страниц. Основная часть изложена на 142 страницах машинописного текста, иллюстрирована 107 рисунками, 15 таблицами. Список использованной литературы содержит 113 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описаны перспективные области применения ЛАД, отражена актуальность исследования электромеханических процессов в ЛАД, сформулированы цели работы и задачи, необходимые для их достижения, отмечена научная новизна, практическая ценность результатов исследования и результаты внедрений, приведена структура диссертации и апробация работы.

В первой главе приведен обзор литературных источников. Перечислены известные методы электромагнитного расчета ЛАД, кратко описана математическая модель на основе детализированных схем замещения, принятая в качестве базовой для применения и развития. В соответствии с принятым подходом, машина сводится к совокупности трех детализированных схем замещения: электрической цепи индуктора, магнитной цепи и электрической цепи вторичного элемента. Описываются статическая и динамическая модели, на основе которых будут проводиться расчет и анализ характеристик тягового ЛАД для транспортной системы. Выделяются несколько критериев оценки каждой из рассматриваемых моделей относительно области их использования.

Вторая глава описывает математическую модель линейного асинхронного двигателя на основе детализированных схем замещения.

В основу базовой модели ЛАД положена однослойная схема замещения магнитной цепи. При этом предполагается:

1. Магнитные силовые линии пересекают немагнитный зазор, в состав которого входит также толщина проводящего слоя вторичного элемента, только в нормальном направлении, а по сердечникам проходят только в тангенциальном направлении.
2. Сердечники индукторов считаются гладкими. При этом величина немагнитного зазора умножается на коэффициент Картера, в результате эквивалентный зазор возрастает по сравнению с действительным.
3. По числу пазов вторичный элемент приведен к индуктору. Если вторичный элемент выполнен в виде сплошной металлической шины с шихтованным сердечником, то токи в проводящем слое протекают только поперек слоя. При этом в соответствии с толщиной проводящего слоя, его шириной и шагом не менее зубцового деления по длине машины выделяются эквивалентные стержни, замкнутые сверхпроводящими боковыми короткозамыкающими шинами (как в обычной асинхронной машине). Электрическая проводимость стержня рассчитывается на основе удельной электропроводности металла и полученных размеров стержня. Она умножается на коэффициент Болтона для учета поперечного краевого эффекта.

С учетом введенных допущений далее описывается базовая математическая модель многофазной линейной индукционной машины (ЛИМ). Рассматривается двухполюсная машина с трехфазной барабанной обмоткой, включенной по схеме звезды с нейтральным проводом. Обмотка имеет число пазов на полюс и фазу $q = 1$, распределение по пазам выполнено по классической схеме с 60-градусной фазной зоной, в соответствующих обозначениях: A Z B X C Y (или A -C B -A C -B)

Вектор ЭДС фаз индуктора

$$(E) = -D \cdot u_n \cdot (K_E) \cdot (\Phi_n) \quad (1)$$

где (K_E) – матрица формирования ЭДС фаз обмотки индуктора,

D – оператор дифференцирования по времени,

u_n – число витков в пазу индуктора,

Φ_n – потоки в участках сердечника.

(E) – вектор ЭДС фаз индуктора,

Вектор МДС пазов индуктора

$$(F) = u_n \cdot (K_F) \cdot (I), \quad (2)$$

где (K_F) – матрица формирования МДС пазов индуктора,

(I) – вектор токов фаз обмотки индуктора

Матрица формирования ЭДС фаз обмотки и МДС пазов индуктора для данной раскладки по пазам будут иметь следующий вид:

$$K_E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (K_F) = (K_E)^T \quad (3)$$

На рис. 1 представлена схема замещения вышеприведенной модели индуктора.

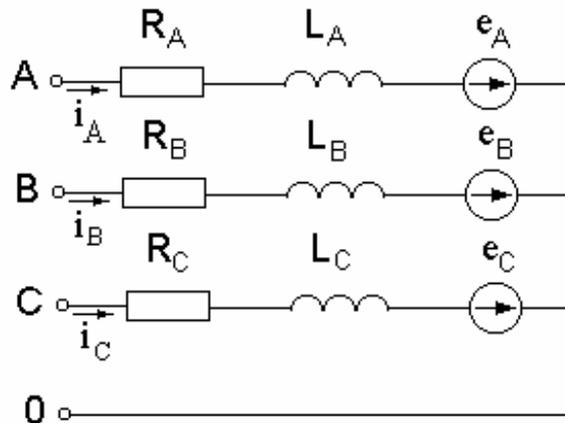


Рис. 1. Схема замещения обмотки индуктора

Уравнение электрического состояния фаз обмотки индуктора (УЭС1)

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{pmatrix}}_R \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \dot{E}_A \\ \dot{E}_B \\ \dot{E}_C \end{pmatrix} + \underbrace{\begin{pmatrix} L_A & 0 & 0 \\ 0 & L_B & 0 \\ 0 & 0 & L_C \end{pmatrix}}_L \cdot D \cdot \begin{pmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{pmatrix},$$

Или УЭС1 в матричной форме

$$(U) = (R)(I) - (E) + (L)D(I)$$

с учетом (1) получим

$$(U) = (R)(I) + (L)D(I) + u_n \cdot D(K_E)(\Phi),$$

ЭДС стержня ВЭ

$$e_{cn} = -D\Phi_n - V \frac{\partial \Phi_n}{\partial x} \quad (4)$$

Уравнение электрического состояния (УЭС) n-го стержня (фазы) ВЭ имеет вид:

$$T_{cn} \cdot D \cdot i_{cn} + \frac{T_{cn} \cdot V}{2t_z} (i_{c,n+1} - i_{c,n-1}) + i_{cn} = \frac{1}{r_{cn}} \left(\underbrace{-D \cdot \Phi_n}_{\text{трансф.}} - \underbrace{\frac{V}{2t_z} (\Phi_{n+1} - \Phi_{n-1})}_{\text{движ.}} \right), \quad (5)$$

где $T_{cn} = \frac{L_{cn}}{R_{cn}}$ - постоянная времени стержня,

или УЭС2 в матричной форме для всех стержней

$$(Z_c)(I_r) = (g_r)(K_{Er})(\Phi),$$

Уравнение магнитного состояния (УМС) для показанного на рис.2 контура

$$R_{n,n} \cdot \Phi_n - R_{\delta n} \cdot \Phi_{n-1} - R_{\delta n+1} \cdot \Phi_{n+1} = F_n + i_{cn} \quad (6)$$

или в матричной форме для всех контуров

$$(R)(\Phi) = (F) + (I_r),$$

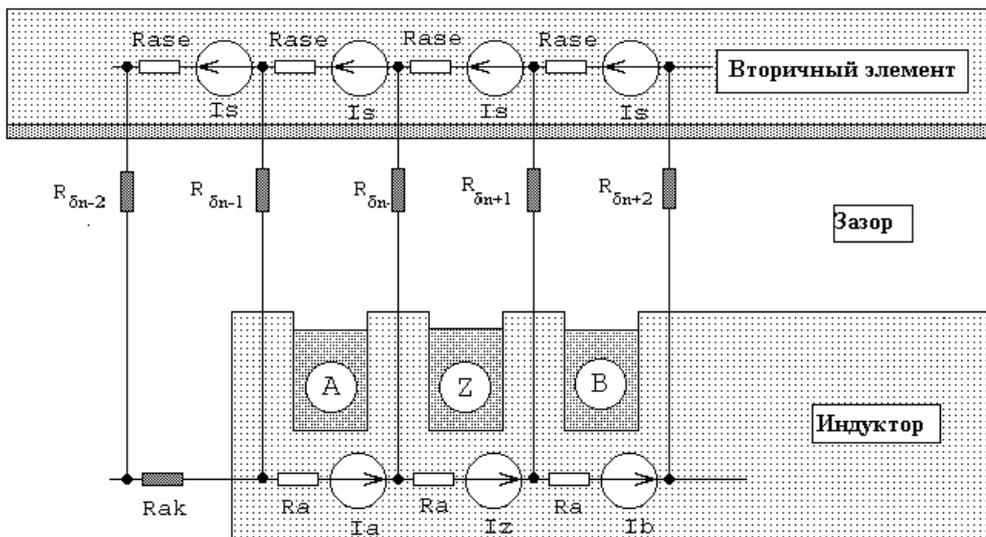


Рис.2. Детализированная схема замещения магнитной цепи ЛИМ с учетом краевых зон

Совместное решение УЭС1, УЭС2 и УМС позволяет найти токи индуктора, потоки в участках сердечника индуктора, токи в эквивалентных стержнях ВЭ и тяговые усилия, действующие на каждый стержень и на ВЭ в целом.

Динамическая модель линейной индукционной машины на основе двухслойной схемы замещения

Рассматривается математическая модель линейной индукционной машины на основе «двухэтажной» схемы замещения с тангенциальными магнитными сопротивлениями зазора R_z для учета потоков рассеяния в зазоре (рис. 3).

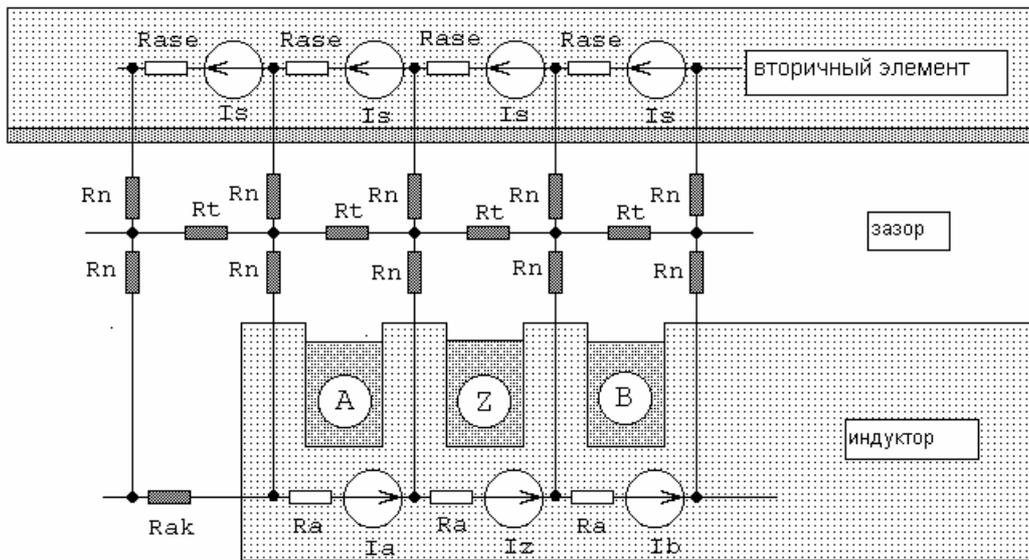


Рис.3. Фрагмент детализированной до зубцового деления магнитной схемы замещения.

Отличием динамической модели от известных статических является то, что она содержит две системы дифференциальных уравнений электрического состояния фаз индуктора и ВЭ, а также две системы алгебраических уравнений магнитного состояния для этажей магнитной схемы замещения:

$$\left. \begin{aligned} (u) &= (R_\phi)(i_\phi) + (L_\phi)(Di_\phi) + (K_E)(D\Phi_{11}), \\ (R_{11})(\Phi_{11}) - (R_{12})(\Phi_{22}) &= (K_F)(i_\phi), \\ -(R_{21})(\Phi_{11}) + (R_{22})(\Phi_{22}) &= (i_c), \\ (r_c)(i_c) + (L_c)(Di_c) + (L_c)(v)(i_c) &= -(D\Phi_{22}) - (v)(\Phi_{22}) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где (R_ϕ) , (L_ϕ) - матрицы сопротивлений (R_{ase}) и индуктивностей фаз индуктора; (r_c) , (L_c) - матрицы сопротивлений (R_a) и индуктивностей фаз ВЭ; (i_ϕ) - вектор (матрица-столбец) мгновенных значений неизвестных токов фаз индуктора (I_a , I_z , I_b); (i_c) - вектор (матрица-столбец) мгновенных значений неизвестных

токов фаз ВЭ (I_s); D – оператор дифференцирования по времени; $(\Phi_{11}), (\Phi_{22})$ – векторы мгновенных значений потоков в участках спинок индуктора и ВЭ; (K_F) – матрица распределения пазовых МДС; $(R_{11}), (R_{22}), (R_{12}) = (R_{21})$ – матрицы собственных и взаимных магнитных сопротивлений контуров магнитной схемы замещения; $(K_E) = (K_F^T)$ – матрица формирования мгновенных значений ЭДС в фазах индуктора; (v) – матрица формирования ЭДС движения в фазах (стержнях) ВЭ, содержащая ненулевые элементы $a_{n,n-1} = -v/2t_z$ и $a_{n,n+1} = v/2t_z$, причем v – скорость движения ВЭ, t_z – зубцовое деление.

Для учета влияния краевых зон магнитной цепи принимаем модель, в которой принято, что сердечник бесконечно протяжен, но его свойства в краевой зоне иные по сравнению с активной. Этот принцип положен в основу учета продольного краевого эффекта в предлагаемой одномерной модели.

Принимаем, что схема замещения магнитной цепи в краевых зонах имеет такую же структуру и такие же магнитные сопротивления зазора, что и в активной, однако (в соответствии с изложенным выше) значения магнитных сопротивлений участков магнитопровода корректируются исходя из реальной картины поля за пределами активной зоны.

Показана методика учета влияния потоков рассеяния в немагнитном зазоре с помощью статической модели на основе двухслойной схемы замещения приведенной на рис.3.

В третьей главе показаны модификации модели тягового линейного асинхронного двигателя.

Учет неравномерности зазора между индуктором и вторичным элементом по длине.

При эксплуатации ТЛАД в реальных условиях монорельсовой транспортной системы возникают режимы, при которых двигатель работает с неравномерным воздушным зазором между индуктором и ВЭ. Это не может не повлиять на тяговые характеристики двигателя, в связи с чем возникает необходимость учета изменения зазора по длине ЛАД в расчетной модели.

Введен коэффициент, учитывающий изменение эквивалентного зазора и угол наклона индуктора в продольном направлении относительно ВЭ, определяемый по формуле:

$$d = \frac{\delta_{\max} - \delta_{\min}}{\delta_z},$$

где δ_{\max} и δ_{\min} соответственно максимальное и минимальное расстояние между вторичным элементом и индуктором в крайних точках.

При использовании унифицированной базовой расчетной модели, описанной выше, неравномерность зазора учитывается на этапе формирования матрицы магнитных сопротивлений схемы замещения с помощью задания различных длин участков зазора.

Модификация модели для учета модуляции параметров по длине вторичного элемента основана на изменении сопротивлений и короткозамыкающих шин на соответствующих участках.

Указанный алгоритм учета модуляции параметров ВЭ по длине является очень удобным, поскольку позволяет отразить не только разрывы ВЭ, но также изменение толщины или материала проводящего слоя на некоторых участках путевой структуры.

В модели без детализации по поперечной оси ВЭ представлен системой автономных стержней, с длиной равной ширине сердечника вторичного элемента. При этом проводимость каждого стержня скорректирована с помощью коэффициента Болтона для учета поперечного краевого эффекта.

В модели с детализацией по поперечной оси ВЭ разделяется на несколько продольных узких полос (элементарных машин). При этом сплошной проводящий слой ВЭ сводится к совокупности эквивалентных коротких стержней, расположенных в зазоре поперек ВЭ с шагом в зубцовое деление и замкнутых в продольном направлении несколькими боковыми шинами.

Разрыв отражен в моделях следующим образом:

- в модели с детализацией по поперечной оси как разомкнутость двух соседних участков каждой из «боковых шин» («выключение» одного стержня в каждой полосе);

- в модели без детализации - разомкнутостью одного стержня. В магнитной цепи магнитное сопротивление сердечника вторичного элемента соответствующего участка задается много большим, чем на остальных участках.

В таблице 1 приведено сравнение результатов расчета тяговых усилий ЛАД при частоте тока 5 Гц и $q = 2$ по двум модификациям модели для анализа разрывов во вторичном элементе, которое показало возможность применения каждого из подходов для расчета тягового двигателя транспортной системы.

Таблица 1. Сравнение расчетных значений тяговых усилий ЛАД

	Модель с детализацией по поперечной оси	Модель без детализации по поперечной оси (по Болтону)
Без разрыва во ВЭ	6178 Н	6259 Н
С разрывом во ВЭ в одно зубцовое деление	5663 Н	5619 Н

Данная модель позволяет оценить влияние смещения индуктора ЛАД относительно продольной оси ВЭ при движении на появление поперечных усилий, действующих в сторону смещения, как показано на рис.4, и возможность изменения ширины вторичного элемента.

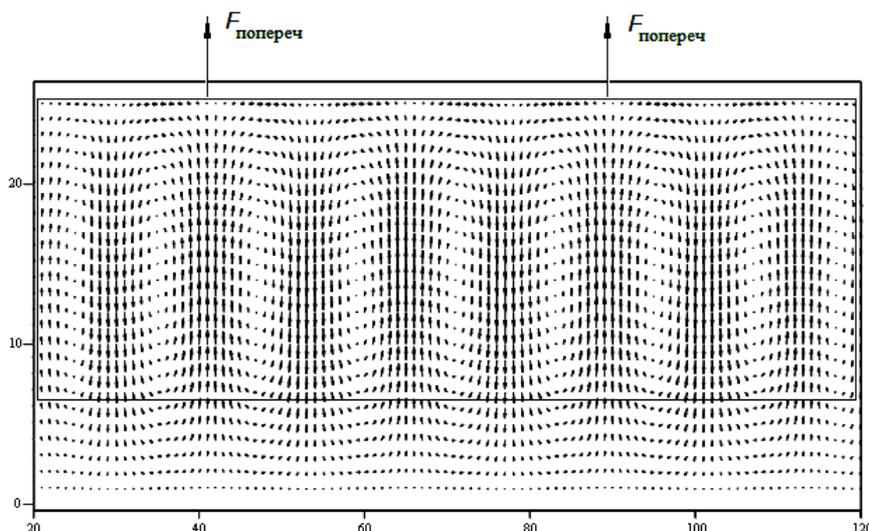


Рис.4. Распределение токов во ВЭ и поперечные усилия при смещении индуктора

В четвертой главе проводится исследование характеристик промышленного образца тягового ЛАД и его модификаций.

Результатом исследования является: оценка усилий, развиваемых ЛАД для различных модификаций, режимов работы и конструктивных исполнений, питания обмотки токами разной частоты, применения двухслойной обмотки и изменения полюсного деления, изменения ширины вторичного элемента, возникновения неравномерного зазора между индуктором и вторичным элементом, применения дополнительных обмоток в индукторе, наличия технологических разрывов во вторичном элементе.

На рис.5, в расчете прямого пуска двигателя, показаны тяговое усилие F_t , отталкивания F_{ottalk} , притяжения $F_{пр}$, суммарное усилие притяжения и отталкивания $F_{пр}+F_{ottalk}$, функции от времени при прямом пуске двигателя

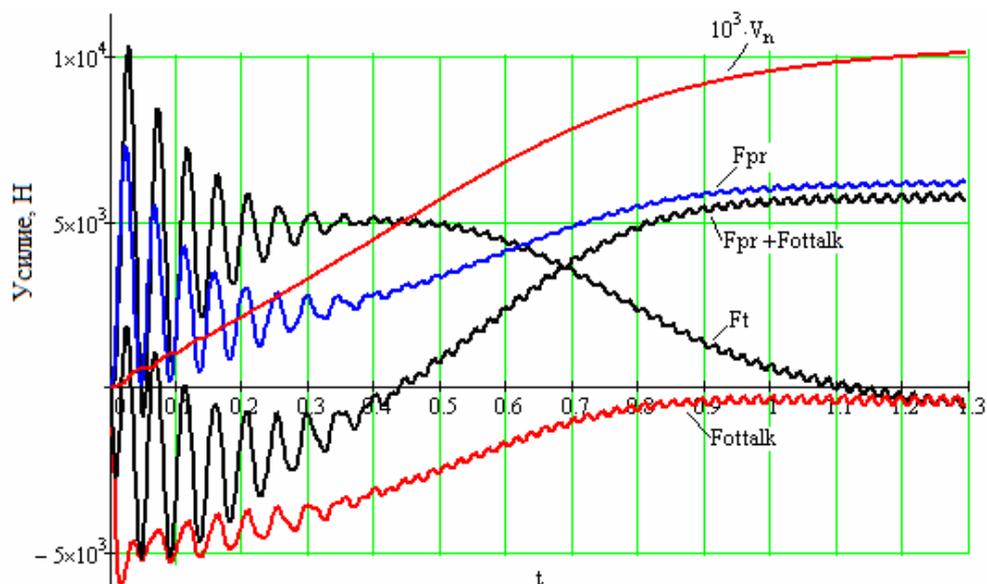


Рис.5. Усилия, развиваемые тяговым ЛАД при прямом пуске

Видно, что нормальное усилие при определенной скорости меняет направление, что нужно учитывать при проектировании транспортной системы.

Для **оценки толщинного эффекта (прежде всего рассеяния потока в зазоре)** значения подведенной мощности, тягового и нормального (левитации) усилий для случая неподвижного ВЭ, полученные с помощью различных моделей, сведены в таблицу 2. Под чертой показаны значения, рассчитанные на основе многослойных схем, но при условии размещения всего объема проводящего металла ВЭ в локальном слое на поверхности ферромагнитного сердечника. Такие условия соответствуют допущениям, принятым для первой модели с двухслойной детализированной магнитной схемой замещения.

Таблица 2. Расчет характеристик ЛАД

Модель Параметр	ДМСЗ (двухслой- ная)	ДМСЗ (пятнадцати- слойная)	Е-Н (двухслой- ная)	Е-Н (пятнадцати- слойная)
Мощность, кВА	$77 + j98.7$	$80.5 + j98.7$ $77.6 + j98.4$	$83.3 + j98.96$	$86.3 + j106.9$ $84.7 + j110.6$
Усилие левитации, Н	7192	3811 7255	3927	4110 8032
Тяговое усилие, Н	4984	5288 5023	5980	6285 6122

Следует отметить также, что тяговое усилие и мощность, рассчитанные методом Е-Н-четырёхполюсников, несколько превышают соответствующие значения, полученные с помощью первой модели. Различие объясняется тем, что метод не позволяет учесть продольный краевой эффект, поскольку слои приняты бесконечно протяженными в продольном и поперечном направлениях. Вместе с тем различие невелико, так как двигатель имеет восемь полюсов и сравнительно небольшую электромагнитную добротность.

Результаты расчета магнитного потока в ярме при поперечном разрыве (разреze) алюминиевого и стального слоев ВЭ шириной в одно зубцовое деление показаны на рис.6 и 7.

По результатам расчетов, в качестве рекомендации, было предложено на пусковых и тормозных участках у остановочных пунктов уменьшить ширину вторичного элемента для увеличения тягового усилия.

В результате расчета возникающей при движении **неравномерности зазора** между индуктором и вторичным элементом по длине были получены распределения усилий притяжения F_{pr} , левитации F_{lev} и тяговых усилий F_t по пазовым делениям вдоль индуктора в зависимости от заданного перекоса, а также суммарных нормальных усилий ($F_{pr} - F_{lev}$).

На рис.8 представлен результат расчета варианта с максимально возможным значением перекоса индуктора.

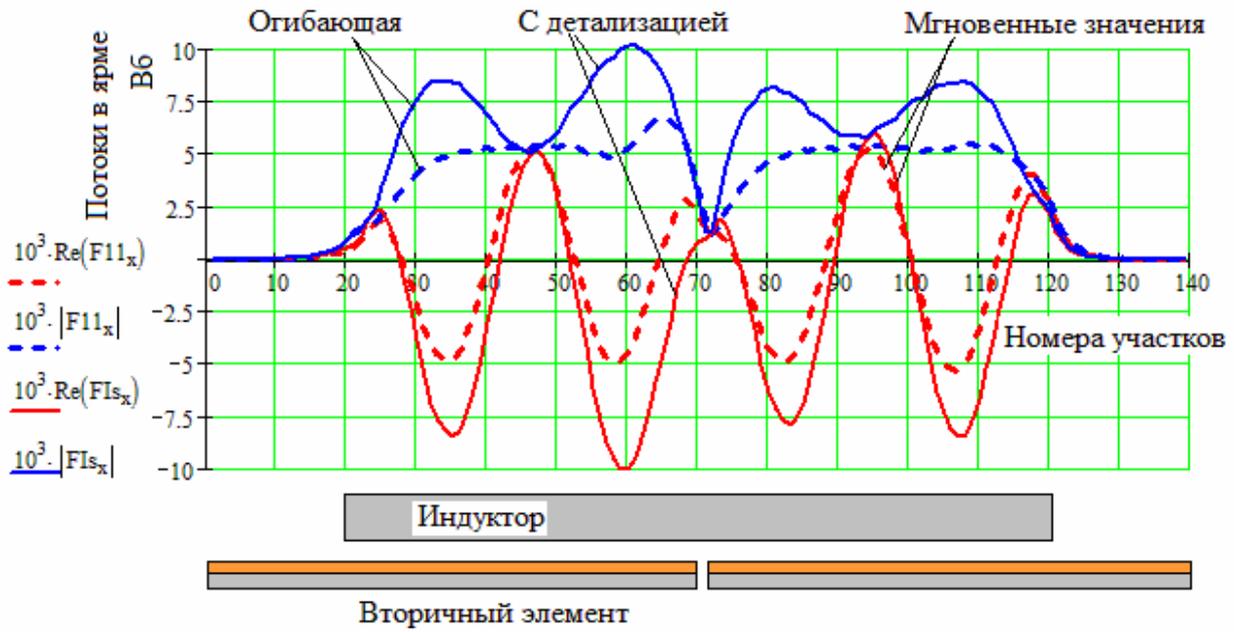


Рис.6. Распределение потока в сердечнике индуктора при разрыве проводящего слоя и ферромагнитного сердечника ВЭ шириной в одно зубцовое деление

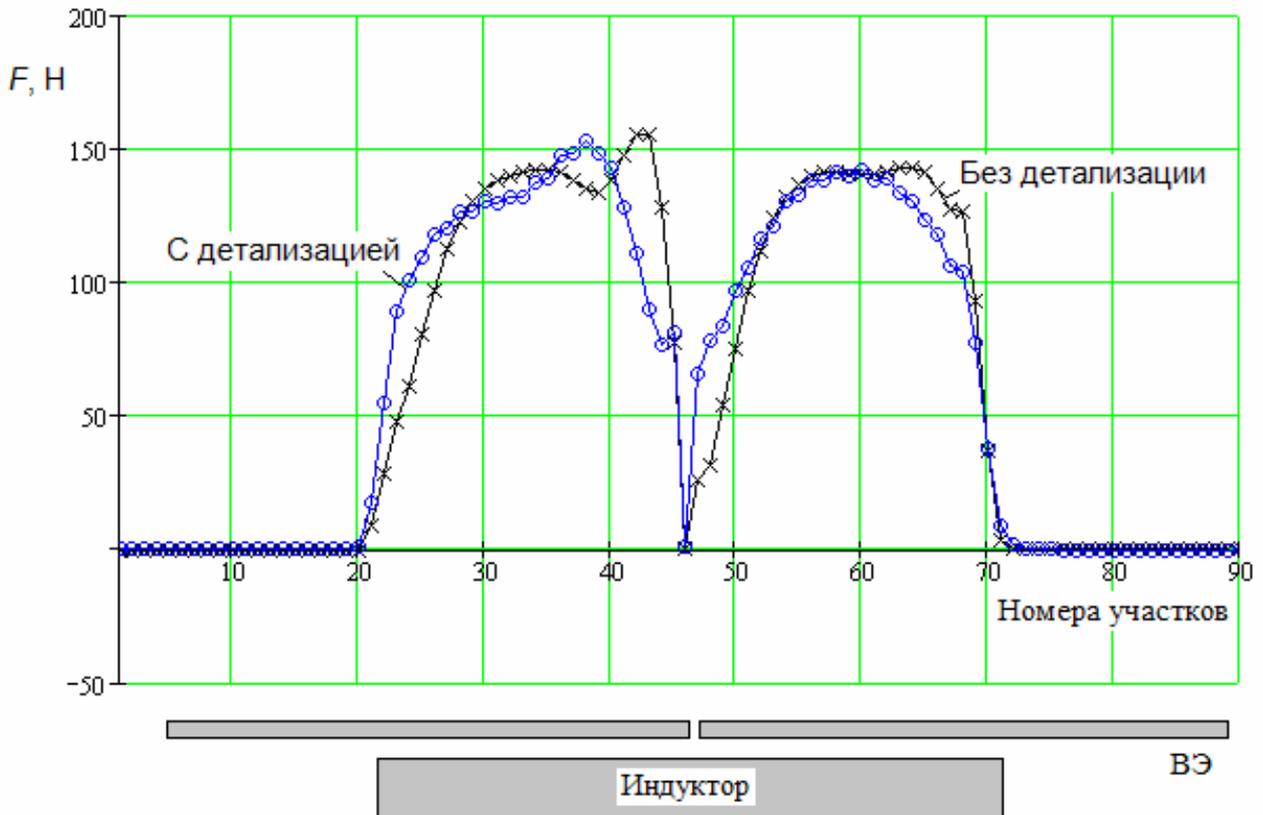


Рис.7. Распределения тягового усилия по длине при разрыве во ВЭ, полученные при и без детализации по поперечной оси

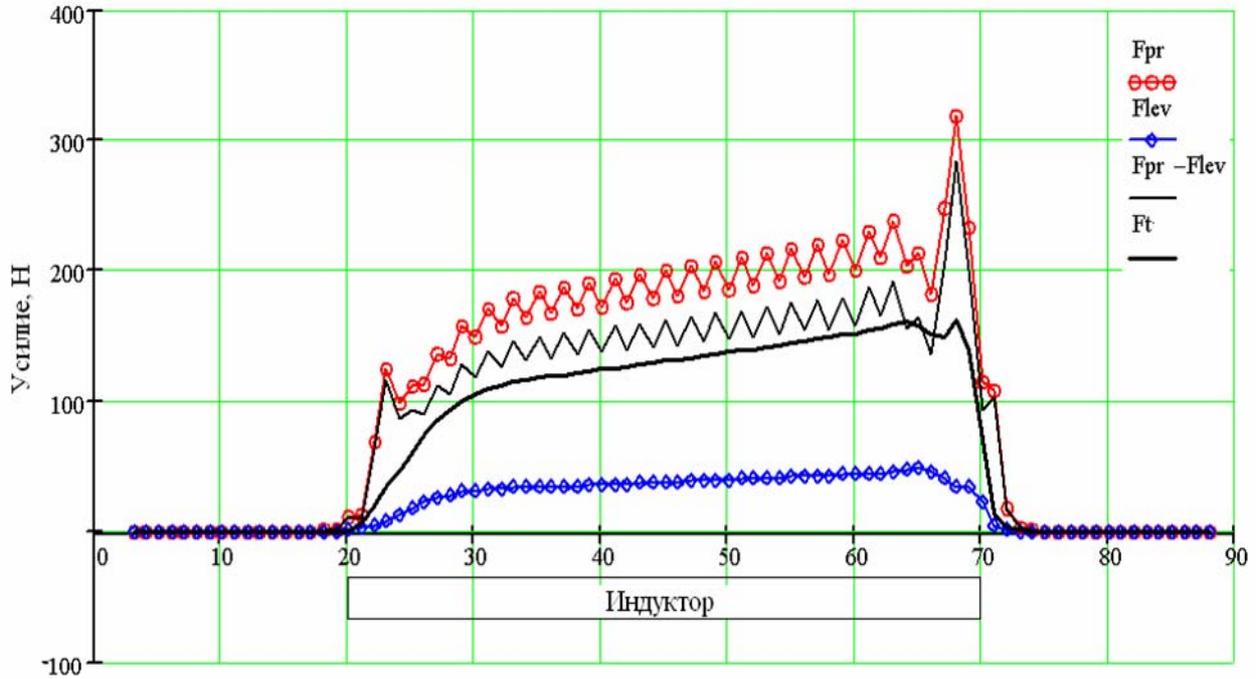


Рис.8. Распределение усилий по длине индуктора при $\delta_{\text{вых}} = 20, \delta_{\text{вх}} = 10$

На основе анализа полученных данных, дана рекомендация о необходимости учета распределения усилий при проектировании опор транспортной системы. Неравномерность этого распределения влечет за собой дополнительную нагрузку на опоры, а также возникновение «опрокидывающих усилий», воздействующих на положение вагона относительно вторичного элемента. Следует отметить также, что неравномерность зазора между вторичным элементом и индуктором уменьшает тяговые усилия двигателя в среднем на 15%, что необходимо учитывать при проектировании системы.

На гистограмме (рис. 9) дано сравнение расчетных и экспериментальных значений тяговых усилий для частоты 5Гц при различных значениях тока. В среднем расхождение между расчетными и экспериментальными данными не превышает 17%, что позволяет использовать данную математическую модель в дальнейших расчетах.

Промышленный образец линейного асинхронного двигателя (рис.10) используется в качестве привода наземной монорельсовой транспортной системы.

ЛАД состоит из шихтованного статора (магнитопровода), выполненного в форме прямоугольного параллелепипеда с односторонней зубцовой зоной, обращенной в сторону вторичного элемента (ВЭ). В пазы статора уложены плоские кольцевые катушки с шагом, соответствующим схеме соединения обмотки.

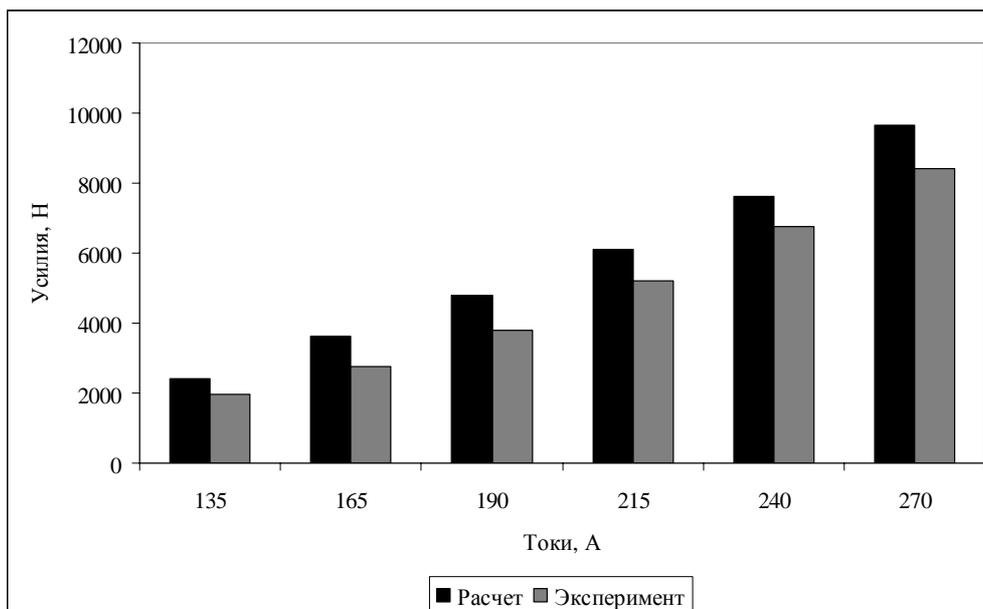


Рис. 9 .Сравнение расчетных и экспериментальных тяговых усилий

С учетом габаритных размеров корпуса базовый вариант статора ЛАД имеет следующие размеры магнитопровода: длина $L_i = 1764$ мм, ширина $B_i = 240$ мм (220 мм в модификации), высота $H_i = 110$ мм. Вторичный элемент представляет собой биметаллическую пластину, состоящую из алюминиевого и ферромагнитного (стального) слоев. ВЭ обращен алюминиевым слоем в сторону зубцовой зоны статора ЛАД. Алюминиевый слой - технологически выполнен из листов алюминия шириной $B_z = 400$ мм, толщиной высокопроводящего слоя $\Delta se = 6$ мм, длиной $l = 2000$ мм (в расчетной модели считается протяженной), ферромагнитный слой – выполнен из стали толщиной $H_{se} = 20.7$ мм, с шириной, равной ширине алюминиевого слоя. Воздушный зазор между зубцовой зоной статора и вторичного элемента δ изменяется от 6 до 15 мм



Рис.10. Линейный асинхронный двигатель

В работе рассмотрено несколько вариантов исполнения обмотки индуктора, катушки которой находятся в двух плоскостях. Схема укладки катушек в пазы магнитопровода одного из вариантов, которая была реализована в реальном ЛАД, представлена на рис 11, а исполнительная схема соединения обмотки на рис 12.

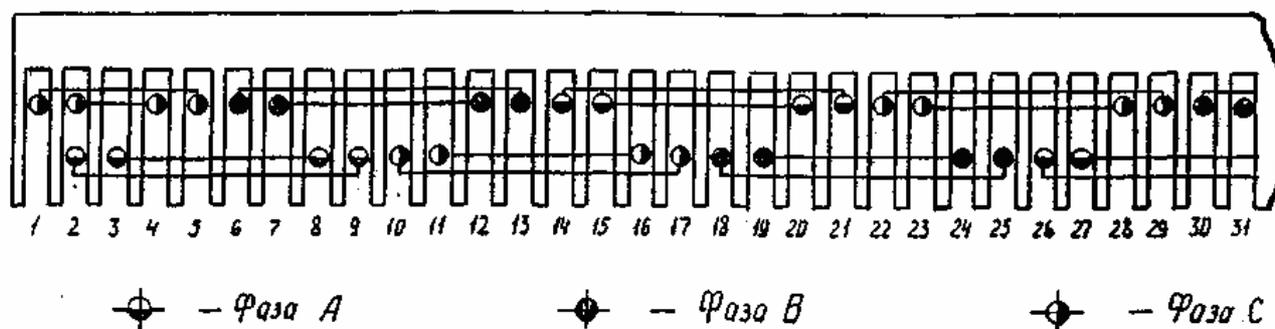


Рис. 11. Схема укладки катушек в пазы магнитопровода

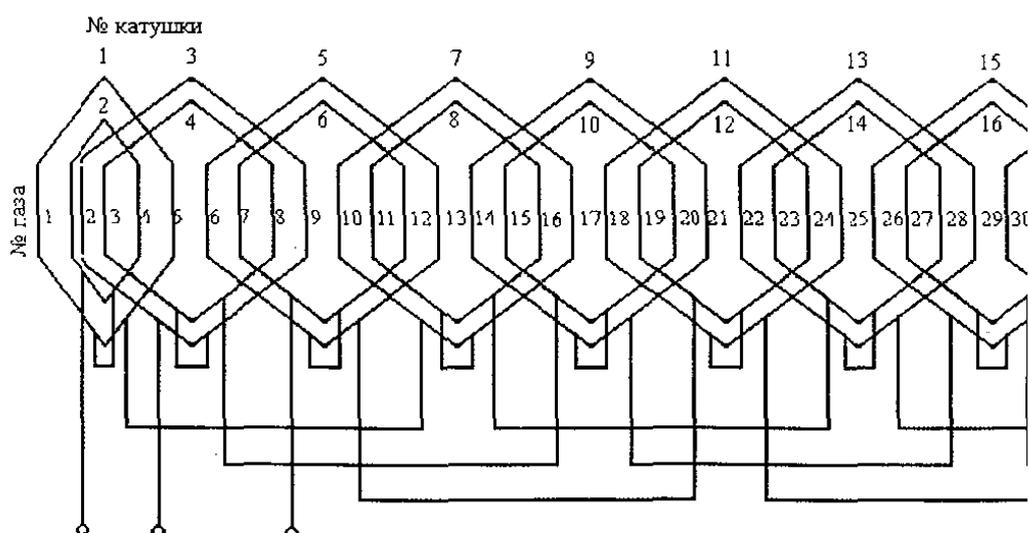


Рис.12. Исполнительная схема соединения обмотки

При таком исполнении обмотки все ветви катушек находятся в пазах, и торцевые зоны магнитопровода могут практически примыкать к стенкам корпуса, т.е. максимально используется длина магнитопровода. Кроме этого при такой схеме обмотки катушки не имеют развитых лобовых частей, что позволяет выбрать максимально возможную ширину магнитопровода, при заданной габаритной ширине корпуса ЛАД.

В то же время для такого исполнения характерен низкий коэффициент заполнения паза $= 0.216$.

Проведена оценка компенсации сил притяжения с помощью дополнительных обмоток (ДО) при питании током основной частоты. Схема раскладки одного из вариантов ДО представлена на рис.13.

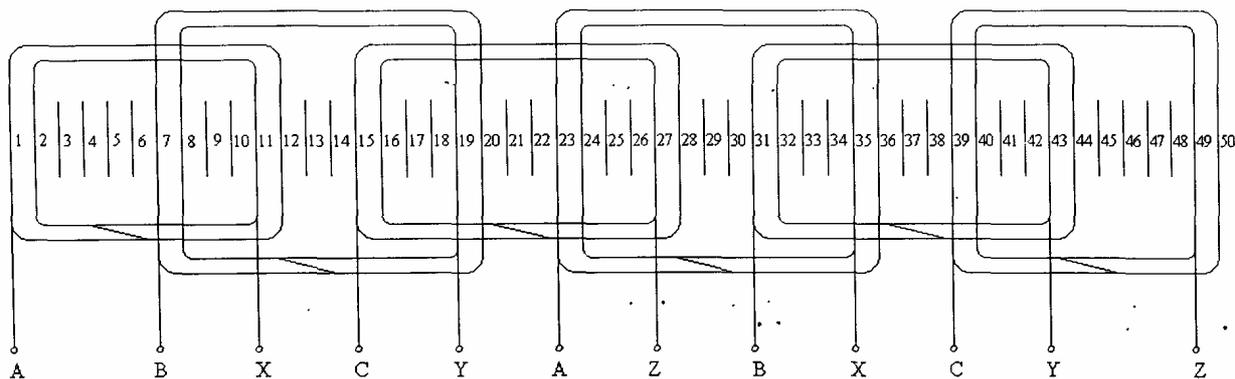


Рис. 13. Схема раскладки дополнительной обмотки по пазам

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что введение дополнительной обмотки не дает значительной компенсации усилия притяжения.

В главе 5 проведено сравнение экспериментальных и расчетных характеристик тягового двигателя на экспериментальном стенде

В рамках исследования тяговых характеристик линейного асинхронного двигателя для транспортной системы проводились стендовые испытания тягового двигателя. Проведено сравнение с расчетными значениями усилий (тягового и притяжения) базового варианта двигателя и модифицированного двигателя, в котором изменена ширина вторичного элемента, в катушках обмотки использован провод другого сечения, изменено количество витков в пазу. Результаты испытаний и расчетов приведены на рис.14.

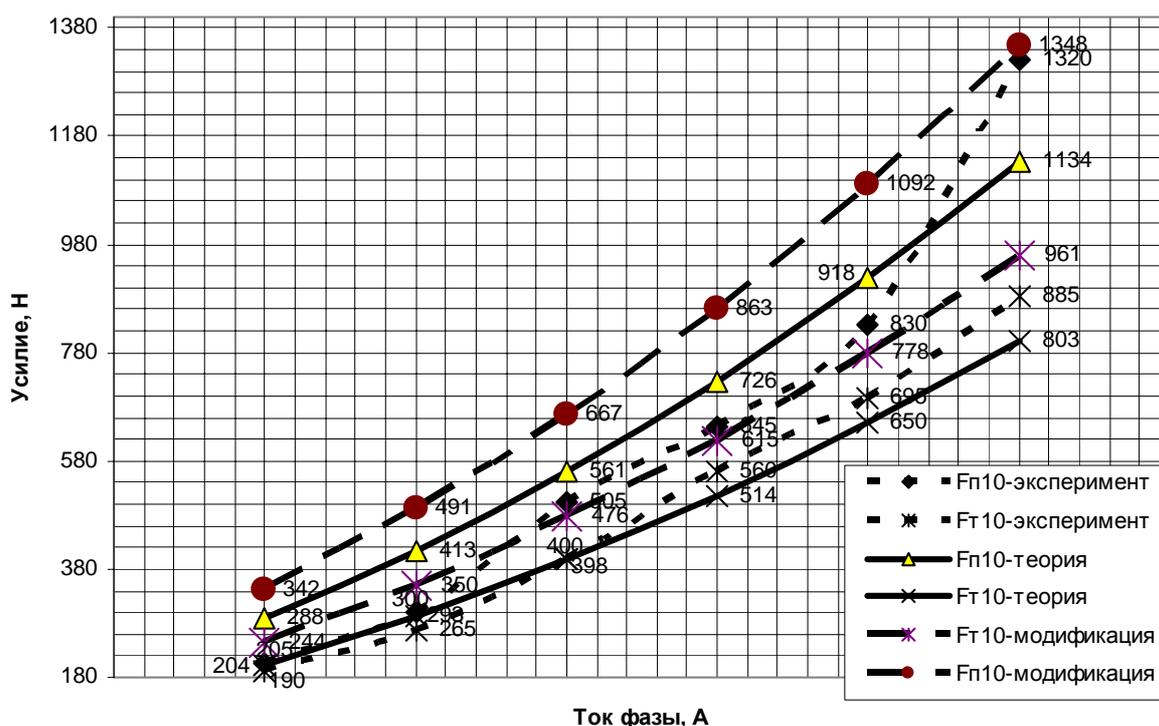


Рис.14. Сравнение расчетных усилий в модификациях двигателя с экспериментом для зазора 10 мм при фиксированной частоте

В приложениях приводятся документы о внедрении, а также основные блоки формуляра динамической модели ЛАД.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

Диссертационная работа выполнена на кафедре электротехники и электротехнологических систем УрФУ и является продолжением разработок коллектива кафедры в области исследования линейных индукционных машин и создания программных средств их математического моделирования, в частности, для использования в учебном процессе и научных исследованиях кафедры.

На основе разработанной модели, реализованной в компьютерных программах в среде *MATHCAD*, выполнен анализ ряда режимов тягового ЛАД, применяющегося в Монорельсовой транспортной системе (г. Москва).

Основные результаты исследований могут быть выражены в следующих выводах:

1. Разработана математическая модель индукционной машины, основанная на однослойной магнитной схеме замещения, введены основные допущения, необходимые для формирования математической модели ЛИМ в статических и динамических режимах. Создана динамическая модель линейной индукционной машины на основе двухслойной магнитной схемы замещения. Показаны формирование основных математических блоков в программной реализации с помощью пакета *Mathcad*, возможности модели для расчета характеристик линейного асинхронного двигателя с различными параметрами индуктора, а также отличия динамической модели от известных статических.
- Показаны особенности формирования модели в краевых зонах магнитной цепи. Сравнение результатов расчета магнитной индукции с результатами, полученными с помощью метода конечных элементов а также с помощью физической модели, позволяет сделать вывод о корректности использования данной модели в практических целях. Предложена методика учета влияния потоков рассеяния в немагнитном зазоре на основе двухслойной МСЗ, позволяющая проводить исследование неуравновешенных нормальных усилий при разработке тягового привода с ЛАД.
- Разработаны модификации модели ЛИМ для уточненного учета поперечного краевого эффекта на основе детализированных по поперечной оси магнитных и электрических схем замещения, и для учета влияния зубчатости сердечника индукционной машины путем введения различных магнитных сопротивлений под пазом и зубцом. С их помощью проведено моделирование режимов работы линейного асинхронного двигателя для транспортной системы. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало хорошую сходимость результатов.
- Созданы унифицированные блоки математической модели, позволяющие формировать обмоточные матрицы различных обмоток тягового ЛАД.

2. Созданы модификации модели тягового ЛАД, которые позволяют учесть следующие конструктивные и эксплуатационные особенности реальной системы монорельсового транспорта:
 - неравномерность зазора между индуктором и вторичным элементом по длине учитывается в базовой модели на этапе формирования матрицы магнитных сопротивлений зазора;
 - модуляция параметров модели по длине ВЭ позволяет учитывать технологические разрывы вторичного элемента и изменение толщины его проводящего слоя. Модификация модели с детализацией по поперечной оси позволяет оценить влияние на характеристики двигателя смещения индуктора относительно продольной оси вторичного элемента;
 - моделирование обмотки индуктора с помощью обмоточных функций позволяет рассчитать усилия тягового двигателя при питании обмотки индуктора токами двух различных частот.
3. При анализе тяговых и энергетических характеристик ТЛАД получены следующие результаты:
 - Расчеты характеристик ЛАД при питании обмотки токами разной частоты позволили определить режимы, наиболее благоприятные по сочетанию тягового усилия и усилия притяжения;
 - Применение двухслойной обмотки и изменение полюсного деления при сохранении габаритов двигателя показали возможность увеличения его тяговых усилий;
 - Сформулированы рекомендации по возможному изменению ширины вторичного элемента на участках разгона и торможения, которые позволяют обеспечить максимум тягового усилия в этих зонах.
4. Анализ нормальных усилий тягового двигателя при возникновении неравномерности зазора между индуктором и вторичным элементом по длине позволил сделать вывод о необходимости учета неравномерного распределения усилий при проектировании опор транспортной системы и конструктивных элементов двигателя, а также контроля уменьшения тягового усилия из-за технологического перекоса. Исследование тяговых и нормальных усилий при использовании дополнительных обмоток индуктора показало малую эффективность такого способа компенсации усилия притяжения за счет усилий отталкивания, созданных этими обмотками. Модификация модели с учетом технологических разрывов по длине вторичного элемента позволила оценить их воздействие на электромагнитные процессы в ЛАД, а также на изменение тягового усилия при различных значениях ширины разрыва во вторичном элементе.
5. Сравнение характеристик тягового линейного асинхронного двигателя для монорельсовой системы, полученных с помощью математической модели и на экспериментальном стенде, показало сходимость в пределах 17%. Из этого можно сделать вывод о корректности применения модели для расчетов ТЛАД как на этапе проектирования, так и для оценки эффективности работы действующего тягового двигателя.

**Основное содержание диссертации опубликовано в
следующих работах:**

В изданиях по списку ВАК РФ

1. Учет зубчатости сердечника индукционной машины в ее магнитной схеме замещения. / Шымчак П., Сарапулов Ф.Н., Сокунов Б.А., Миронов С.Е., Карась С.В. Вестник №5(25) УГТУ-УПИ, часть 2: Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. Екатеринбург 2003г. С. 80-83.
2. Миронов С.Е., Бегалов В.А., Горелов А.Т. Исследование характеристик тягового линейного асинхронного двигателя. /Вестник №5(25) УГТУ-УПИ, часть 2: Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. Екатеринбург 2003г. С. 103-106.
3. Гоман В.В., Иваницкий С.В., Миронов С.Е. Моделирование тепловых и электромеханических процессов в линейных асинхронных двигателях / Промышленная энергетика №5. Екатеринбург 2010.С. 37-40.

Прочие публикации

1. Бегалов В.А., Миронов С.Е., Горелов А.Т., Андрюхин Е.А. Исследование тяговых и нормальных усилий линейного асинхронного двигателя. 5-я Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение», труды МКЭЭ-2003, ч. I, Крым, Алушта, 2003г. С. 561-571.
2. Динамическая модель линейной индукционной машины / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, С.Е. Миронов, П. Шымчак. Труды 7-й научно-практической конференции «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург: ЗАО «Уральские выставки-2000», 2007. С. 106-108.
3. Исследование динамических режимов работы линейной индукционной машины / Ф.Н. Сарапулов, И.В. Черных, С.Е. Миронов, В.А. Бегалов. Труды 7-й научно-практической конференции «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург: ЗАО «Уральские выставки-2000», 2007. С. 118-122.
4. Исследование модели устройства, предназначенного для электромагнитного перемешивания расплавов / С.А. Бычков, С.Е. Миронов, Б.А. Сокунов. Труды 7-й научно-практической конференции «Проблемы и достижения в промышленной энергетике». Екатеринбург: ЗАО «Уральские выставки-2000», 2007.С 82-85.
5. Исследование силовых характеристик тягового линейного асинхронного двигателя / В.А. Бегалов, А.Т. Горелов, С.Е. Миронов, А.И. Прохоров. Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования. Пятый международный симпозиум ЭЛМАШ-2004. Т.1. Москва, 2004. с. 169-173.
6. Исследование электропривода на базе линейного двигателя для монорельсового состава. Отчет по НИР №01996 от 11 ноября 2003г. Рук. Бегалов В.А., Отв. Исполнитель Миронов С.Е. Екатеринбург 2003г.

7. Математическое моделирование линейной индукционной машины с ограниченными размерами вторичного элемента / С.Е. Миронов, В.А. Бегалов, С.Ф. Сарапулов, П. Шымчак. Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий. Труды Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006.. С.315-322.
8. Особенности формирования энергоэффективных режимов работы линейного асинхронного двигателя / Ф.Н. Сарапулов, В.А. Бегалов, С.Е. Миронов, А.И. Прохоров. Всероссийская научно-техническая конференция «Энергосбережение в электрохозяйстве предприятий». Ульяновск, май 2004. С. 38-40.
9. Применение имитационного моделирования для создания динамической модели электромеханической системы / С.Е. Миронов, Ф.Н. Сарапулов. Научные труды V отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. Сб. статей. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004.. С. 433-435.

Вклад автора в совместных публикациях заключается в постановке задачи исследования, разработке математической модели, составлении программы исследований, анализе полученных результатов.

Подписано в печать 16.11.2010
Офсетная печать

Формат 60 x 84 1/16
Тираж 100

Бумага писчая
Заказ №

Ризография НИЧ УрФУ
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19