

На правах рукописи

Ульд Эли Шейх

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТЕЙ И РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНЫХ
СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАЗЕМНОГО
ТРАНСПОРТА

Специальность: 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2003

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Научный руководитель –

Заслуженный деятель науки РФ

доктор технических наук, профессор **Коськин Ю.П.**

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор Тазов Г. В.

Ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук Федосов М. И.

Ведущее предприятие – АО «Электросила»

Защита состоится “28” ноября 2003 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета К 212.229.02 в ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ауд. 325. Главное здание.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан “28” октября 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук

Терешкин А. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие промышленности и рост городского населения в большинстве стран мира приводят к необходимости решения проблемы увеличения объемов грузовых и пассажирских перевозок, а также повышения скоростей движения транспортных средств.

Одним из перспективных направлений развития высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ) является применение вместо колес магнитного подвеса, основанного либо на притяжении электромагнитов к ферромагнитной шине, либо на отталкивании катушки с током от левитационной шины, в которой при движении экипажа с обмоткой возбуждения индуктируются вихревые токи. Для создания силы тяги при этом используются линейные синхронные (ЛСД) или асинхронные (ЛАД) двигатели.

Анализ опубликованных данных показывает, что ЛАД, используемые на ВСНТ, эксплуатируются с зазором 2 – 4 см и даже при столь небольших клиренсах обладают невысокими эксплуатационными характеристиками: коэффициент мощности $\approx 0.4 - 0.5$ и КПД $\approx 0.5 - 0.6$. Дальнейшее увеличение рабочего зазора ЛАД в еще более значительной степени ухудшит эти показатели. Низкие КПД и коэффициент мощности, в свою очередь, обуславливают необходимость дополнительного подвода электроэнергии и, соответственно, новые затруднения в решении проблемы токоподвода.

Учет указанных обстоятельств позволяет считать, что в системах ВСНТ с электродинамическим подвесом целесообразным является применение в качестве тяговых двигателей ЛСД со сверхпроводниковыми обмотками возбуждения (СПОВ).

Принцип действия ЛСД с СПОВ основан на взаимодействии поля, создаваемого СПОВ, с бегущей МДС индукторной обмотки. Достоинствами ЛСД применительно к ВСНТ являются: допустимость больших рабочих зазоров (0.2–0.3м); относительно высокие технико-экономические показатели (КПД $\approx 0.8 - 0.6$ и $\cos \varphi \approx 0.7 - 0.8$) и более простая система энергоснабжения.

Проблема создания ВСНТ является особенно актуальной для России, имеющей большую территорию и такие города с многомиллионным населением, как Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург и др. Необходимость применения ВСНТ обусловила проведение в СССР в 1970 – 1990гг фундаментальных научных исследований и опытно-конструкторских работ, посвященных созданию тяговых электродвигателей, систем магнитного подвеса и сверхпроводниковых обмоток.

Выполненный анализ опубликованных трудов, посвященных тяговым электроприводам ВСНТ, а также опыт, приобретенный автором при выполнении НИР на кафедре электромеханики и электромеханотроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 1997 – 2002гг, позволяют считать, что несмотря на преимущества ЛСД перед ЛАД при скоростях 400 – 500 км/час, остаются актуальными и, в тоже время, до сих пор недостаточно разработанными и апробированными вопросы, связанные с методиками определения главных размеров, параметров, рабочих характеристик и технико-экономических показателей режимов тяговых, без ферромагнитопроводов ЛСД с протяженными статорными обмотками, образующими путевые структуры, и обмотками возбуждения, находящимися в криогенных модулях движущегося экипажа.

Целью настоящей работы является разработка методики расчета параметров и рабочих характеристик тягового линейного синхронного двигателя, отличающегося отсутствием ферромагнитопроводов, использованием сверхпроводниковых обмоток

возбуждения и предназначенного для ВСНТ.

Основные задачи исследования.

- Разработка математической модели ЛСД в двухмерном приближении и оценка влияния основных размеров ЛСД на магнитное поле и тяговую электромагнитную силу.
- Учет влияния высших пространственных гармоник и толщины обмотки статора на магнитное поле и индуктивности ЛСД.
- Разработка трехмерной математической модели ЛСД, учитывающей влияние поперечного краевого эффекта, связанного с конечностью ширины обмотки статора, на индуктивности.
- Разработка математической модели ЛСД, учитывающей влияние магнитного поля лобовых частей обмотки статора на рабочие характеристики.
- Разработка методики электромагнитного расчета, позволяющей выбрать оптимальные основные размеры ЛСД, и оценка влияния основных размеров на энергетические характеристики ЛСД.
- Разработка физической модели ЛСД, не содержащей ферромагнитопроводов, и выполнение экспериментального исследования магнитного поля обмотки статора с целью проверки основных уравнений и методик расчета индуктивностей и рабочих характеристик.

Методы исследований. Исследование выполнялось с использованием теории электромагнитного поля. Численные методы применялись в виде пакетов прикладных программ Mathcad 7 pro, MATLAB 5.2, МАТЕМАТИКА 3, AG graphic. Обработка экспериментальных данных производилась с применением программы Exell. Оценка адекватности принятых моделей и сходимости полученных результатов выполнялась при проведении и испытаний экспериментального образца ЛСД.

Научная новизна. Научная новизна диссертации заключается в учете особенностей однослойных и двухслойных статорных обмоток ЛСД, используя известные из теории обычных электрических машин и новые уравнения для обмоточных коэффициентов распределения и сокращения шага. Кроме того, вместо уравнений для полного тока на полюс, используемых Л. А. Цейтлиным и Ю. П. Коськиным при разработке теории электрических машин с немагнитным ротором, применяются выражения для намагничивающей силы, получаемые при допущении, что являются заданными числа витков в катушках, способы образования и соединения катушечных групп в фазах, их основные размеры. Получены новые уравнения и методики расчета магнитного поля, индуктивностей и рабочих характеристик ЛСД.

Практическая ценность состоит в следующем:

- Разработан применительно к ЛСД метод искусственной периодизации, позволяющий упростить расчет магнитного поля обмотки статора ЛСД при достаточной для практики точности;
- Разработана методика электромагнитного расчета ЛСД, обеспечивающая выбор и оптимизацию параметров и энергетических показателей ЛСД;
- Даны рекомендации по выбору главных размеров и рабочих режимов ЛСД.

Апробация работы. Основные положения и результаты были представлены и доложены на 2-ей международной конференции “Электромеханика и электротехнологии” ICSE-98, г. Клязьма, 14 – 18 сентября 1998 г.; 4-ой международной конференции по нетрадиционным электромеханическим и электрическим системам UEES-99, г. Санкт-Петербург, 21 – 24 июня 1999 г.;

внутривузовских научно-технических конференциях, а также на научных семинарах кафедр электромеханики и электромеханотроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Публикации. По теме диссертации опубликованы три печатных работы: тезисы и доклад на международных научных конференциях и одно учебное пособие.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из шести глав, заключения, списка литературы, включающего 124 наименования, и семи приложений. Основная часть работы изложена на 143 страницах машинописного текста. Работа содержит 51 рисунок и 4 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе обоснована актуальность темы диссертации, выполнен обзор состояния теории ЛСД, сформулированы цель и задачи исследования, изложено основное содержание диссертации, отражена научная новизна и практическая ценность.

Во второй главе определяется магнитное поле обмотки статора в двухмерном и трехмерном приближениях. При этом рассматривается расчетная схема ЛСД, включающая трехфазную обмотку, распределенную на путепроводе, и катушки ОВ, показанные на рис. 1.

Считается, что статор состоит из катушек, активные стороны которых длиной $2a_s$ перпендикулярны направлению движения (оси Ox).

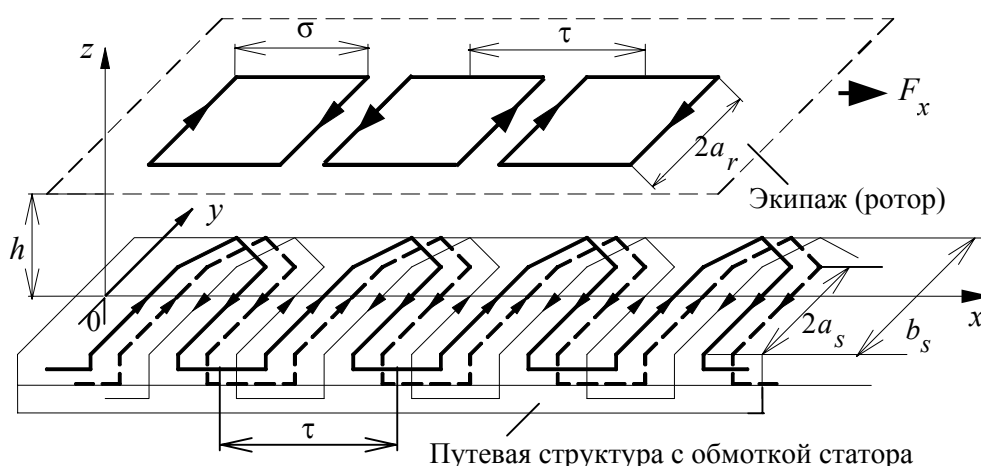


Рис. 1. Расчетная схема ЛСД

Ротор включает ряд одинаковых прямоугольных катушек, со сторонами $l_r = 2a_r$ и σ (рис. 1), расположенных в плоскости $z = h$ так, чтобы их активные стороны были параллельны оси Oy , а расстояние между осями соседних катушек было равно τ . По катушкам текут постоянные токи чередующегося направления.

Бегущее магнитное поле, взаимодействует с токами ротора и создает тяговое усилие F_x , необходимое для движения ротора в направлении Ox с синхронной скоростью $V_0 = 2f\tau$, где f – частота тока в статоре.

Рассматриваемый ЛСД отличается от традиционных синхронных машин полным отсутствием ферромагнитных элементов, создающих определенные пути для прохождения основных магнитных потоков, а также формой, определяемой поступательным характером движения ротора. Кроме того, по конструктивным соображениям и условиям эксплуатации системы ВСНТ рабочий зазор h на рис. 1

должен быть порядка десятых долей метра и поэтому с обмоткой ротора сцепляется относительно небольшая часть магнитного потока статора.

Основные допущения: обмотки статора и ротора предполагаются симметричными в продольном, и поперечном направлениях; токи статора и ротора рассматриваются как поверхностные токовые слои; поверхностные плотности намагничивающей силы в этих слоях предполагаются кусочно-непрерывными функциями соответствующих координат.

Рассматривается установившийся режим работы ЛСД, в котором токи обмотки статора изменяются во времени синусоидально с угловой частотой ω и образуют в нормальном режиме работы симметричную систему токов, сдвинутых друг относительно друга во времени на $1/3$ периода.

В основе разрабатываемых методик лежит определение магнитного поля обмотки статора, рассчитываемое сначала как двухмерное, а затем – как трехмерное. При этом предполагается, что поверхностная плотность намагничивающей силы обмотки статора F изменяется вдоль оси $0x$ синусоидально с периодом 2τ .

В двухмерной модели ЛСД (рис. 2) магнитное поле статора определяется путем решения уравнения Лапласа с соответствующими граничными условиями. Считая, что поверхностная плотность намагничивающей силы обмотки статора имеет только одну составляющую F :

$$F = \alpha F_m \sin \alpha x, \quad (1)$$

где $F_m = 0.9p^{-1}w_1k_{об1}I_1$; w_1 – число витков обмотки статора; $k_{об1}$ – обмоточный коэффициент; p – число пар полюсов; $\alpha = \pi/\tau$, и учитывая, что создаваемое магнитное поле является периодическим в пространстве, рассматривается только область между плоскостями $x = \pm\tau/2$. При сделанных допущениях скалярный потенциал ϑ этого поля удовлетворяет двумерному уравнению Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0, \quad (2)$$

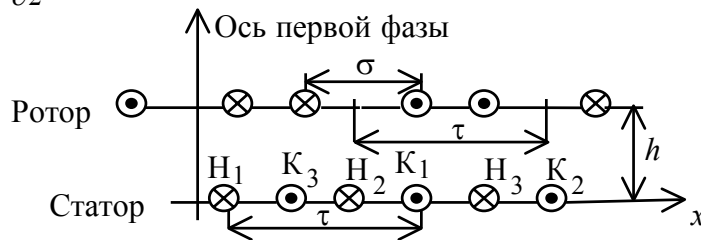


Рис. 2. Двухмерная модель ЛСД

решение, которого позволяет найти составляющие напряженности магнитного поля первой фазы статора в области $z > 0$ в виде:

$$\left. \begin{aligned} H_x &= -\frac{\partial \vartheta}{\partial x} = H \sin \alpha x \\ H_z &= -\frac{\partial \vartheta}{\partial z} = H \cos \alpha x \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $H = 0.5\alpha F_m e^{-\alpha z}$

Поскольку в установившемся режиме работы ротор движется вдоль оси $0x$ со скоростью V_0 , то вводится подвижная система координат x_r, y, z , жестко связанная

с ротором и совпадающая с неподвижной системой координат при $t=0$. При этом координата $x_r = x - V_0 t$. Поверхностная плотность суммарной намагничивающей силы обмотки статора F_Σ , равняется:

$$F_\Sigma = 1.5\alpha F_m \sin(\alpha x - \omega t). \quad (4)$$

В подвижной системе координат F_Σ выражается через x_r точно так же, как в формуле (1) выражалась поверхностная плотность намагничивающей силы первой фазы обмотки статора F через x . Далее из (2) находятся выражения для составляющих напряженности суммарного магнитного поля статора в подвижной системе координат:

$$\left. \begin{aligned} H_{x\Sigma} &= H_m \sin \alpha x_r \\ H_{z\Sigma} &= H_m \cos \alpha x_r \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $H_m = 0.75\alpha F_m e^{-\alpha z}$.

В трехмерной модели ЛСД статор имеет конечную ширину и, следовательно, скалярный потенциал магнитного поля статора удовлетворяет трехмерному уравнению Лапласа с несколько более сложными граничными условиями.

Считается, как и в двухмерной модели, что обмотка статора представляет собой бесконечно тонкий слой с синусоидальным распределением тока по оси $0x$, а ток в активной зоне статора идет параллельно оси $0y$ и замыкается далее по лобовым соединениям вдоль прямых $y = \pm a_s$, где a_s – полуширина статора.

Предполагается, что поверхностная плотность намагничивающей силы в активных частях первой фазы описывается выражением:

$$F = \tilde{F} \sin \alpha x, \quad (6)$$

где $\alpha = \pi/\tau$, а \tilde{F} – величина, изменяющаяся в зависимости от координаты y и времени t по закону:

$$\tilde{F} = \begin{cases} \alpha F_m & \text{при } |y| < a_s; \\ 0 & \text{при } |y| > a_s, \end{cases} \quad (7)$$

Трехмерное уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} = 0, \quad (8)$$

решается при граничных условиях, имеющих вид:

$$1) \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = 0 \text{ при } y = 0; \quad 2) \vartheta = 0 \text{ и } \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = 0 \text{ при } y \rightarrow \infty; \quad 3) \vartheta = 0 \text{ и } \frac{\partial \vartheta}{\partial y} = \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = 0 \text{ при}$$

$$x = \pm \tau/2; \quad 4) \vartheta = i/2 = \tilde{F}/(2\alpha) \text{ при } x = 0, \quad z = 0, \text{ где } i = i_1 w_s - \text{полный ток;}$$

$w_s = 0.63 p^{-1} w_1 k_{об1}$ – расчетное число витков фазы на один полюс (на длине τ).

При решении уравнения (8) методом интегральных преобразований, получены выражения для поправочных коэффициентов, учитывающих краевой эффект, возникающий из-за конечной ширины статора, как отношение значений H_x , H_y и H_z при трехмерном приближении к значениям напряженности магнитного поля $H_{x\infty}$, $H_{z\infty}$ при двухмерном приближении (уравнения (5)):

$$h_x^{(\text{чи})} = \frac{H_x}{H_{x\infty}} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin u}{u} e^{-(\gamma-\alpha)z} \cos\left(\frac{y}{a_s}u\right) du, \quad (9)$$

$$h_y^{(\text{чи})} = \frac{H_y}{H_{z\infty}} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin u}{\alpha a_s} e^{-(\gamma-\alpha)z} \sin\left(\frac{y}{a_s}u\right) du, \quad (10)$$

$$h_z^{(\text{чи})} = \frac{H_z}{H_{z\infty}} = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin u}{u} \sqrt{1 + \frac{u^2}{\alpha^2 a_s^2}} e^{-(\gamma-\alpha)z} \cos\left(\frac{y}{a_s}u\right) du. \quad (11)$$

Поскольку выполнить в общем, виде указанное в формулах интегрирование не удается, для определения значений h_x, h_y, h_z , соответствующих заданным значениям координат x, y, z , используется численное интегрирование (чи). В качестве примера были рассчитаны значения h_z по формуле (11) для случая, когда $a_s = \tau$, и $h=2\tau/\pi$. При этом получены результаты, представленные в таблице 1 (вторая строка).

Таблица 1

y/a_s	0	0.5	1.0	1.5
$h_z^{(\text{чи})}$	1.00	0.75	0.48	0.05
$h_z^{(\text{ип})}$	0.98	0.86	0.42	0.04

Из таблицы 2 следует, что при $y=0$, т. е. в продольной плоскости симметрии ЛСД, вертикальная составляющая напряженности магнитного поля статора конечной ширины практически не отличается от значения этой же составляющей в двухмерной модели.

Недостатком уравнений (9), (10) и (11) является наличие под знаком интеграла осциллирующих функций, затрудняющих численное интегрирование.

С целью исключить интегрирование и выполнить при этом расчеты с достаточной точностью выражения для поправочных коэффициентов были преобразованы, используя метод искусственной периодизации (ип). При этом решение уравнения (8) находится в виде ряда Фурье по переменной y :

$$\mathfrak{A} = \cos \alpha x \sum_{n=1}^{\infty} V_n(z) \cos n\beta_1 y, \quad (12)$$

где $\beta_1 = \pi/(2a_s + b)$.

Поправочные коэффициенты, учитывающие конечность ширины обмотки статора, определяются при этом в виде:

$$h_z^{(\text{ип})} = \frac{H_z}{H_{z\infty}} = e^{\alpha z} \sum_{n=1}^{\infty} a_n R_n e^{-R_n \alpha z} \cos n\beta_1 y \quad (13)$$

$$h_y^{(\text{ип})} = \frac{H_y}{H_{z\infty}} = \frac{\beta_1}{\alpha} e^{\alpha z} \sum_{n=1}^{\infty} a_n n e^{-R_n \alpha z} \sin n\beta_1 y \quad (14)$$

$$h_x^{(\text{ип})} = \frac{H_x}{H_{x\infty}} = e^{\alpha z} \sum_{n=1}^{\infty} a_n e^{-R_n \alpha z} \cos n\beta_1 y \quad (15)$$

Полученные формулы (13), (14) и (15) более удобны для расчета, чем уравнения (9), (10) и (11). Для оценки погрешности, возможной из-за искусственной периодизации

распределения тока, были выполнены расчеты четырех значений h_z по формуле (13), при $a_s = \tau$; $z = h = 2\tau/\pi$, представленные в таблице 1 (третья строка).

Из таблицы 1 видно, что данные 2 и 3 строк различаются не более, чем на 10 – 15 %, что можно считать допустимым.

Установлено что, при определении параметров и характеристик ЛСД целесообразно использовать коэффициенты вида

$$\chi_z^{(h)} = \int_0^1 h_z^{(h)} d(y/a_r), \quad (16)$$

интегрально учитывающие изменение магнитного поля, вызванное конечностью ширины статора ($\chi_z^{(h)}$ – значение h_z , при $z = h$, a_r – полуширина ротора).

Значения коэффициента $\chi_z^{(h)}$ в каждом конкретном случае определяются путем численного интегрирования по предварительно найденным значениям h_z в соответствующих точках плоскости $z = h$.

Предлагается способ, при котором, не прибегая к предварительному определению значения h_z в отдельных точках плоскости $z = h$, определяется коэффициенты $\chi_z^{(h)}$. Для этого выполняется действие, обозначенное в уравнении (16) в общем виде – интегрирование под знаком интеграла. Подставляя h_z из выражения (11) в (16), получено:

$$\chi_z^{(h)} = \frac{2}{\pi} e^{\alpha h} \frac{a_s}{a_r} \int_0^{\infty} \frac{\sin u \sin(a_r u / a_s)}{u^2} \sqrt{1 + \frac{u^2}{\alpha^2 a_s^2}} e^{-\gamma h} du \quad (17)$$

где a_r – полуширина ротора.

Зависимость коэффициента $\chi_z^{(h)}$ и от величины $\mu = \alpha h$ при $a_s = a_r$ и различных значениях параметра $\nu = \alpha a_s$, приведена на рис. 3.

Используя метод искусственной периодизации, подставляя h_z из формулы (13) в (16), меняя порядок интегрирования по u и суммируя по n , получено:

$$\chi_z^{(h)} = e^{\alpha h} \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n / (n\beta_1 a_r) \right) R_n e^{-R_n \alpha h} \sin(n\beta_1 a_r) \quad (18)$$

Наличие дополнительного множителя $1/(n\beta_1 a_r)$ в формуле (18) под знаком суммы обеспечивают лучшую сходимость этих сумм.

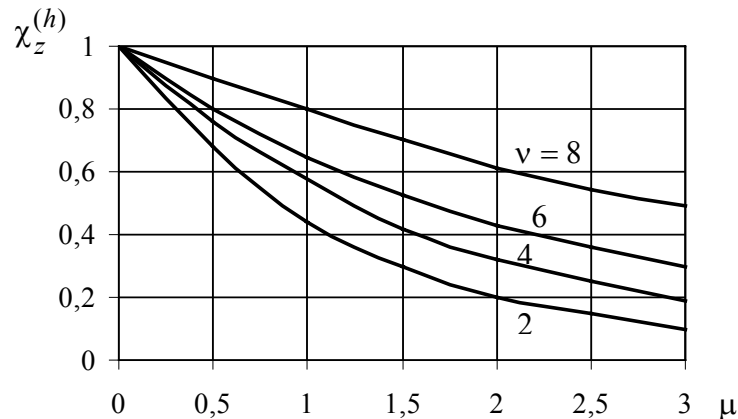


Рис. 3. Зависимость коэффициента $\chi_z^{(h)}$ от высоты расположения ротора

Третья глава посвящена расчету индуктивностей ЛСД в двухмерном и трехмерном приближениях.

В двухмерном приближении катушечная группа фазы статорной обмотки разбивается на элементарные витки с намагничивающей силой витка на один полюс, равной $dF = Fdx$, где $F = \alpha F_m \sin \alpha x$.

Полагая, что ток в элементарном витке равняется току в параллельной ветви фазы или току эффективного провода и используя соотношение $F_m = 0.9p^{-1}w_1k_{об}I$ из уравнения (1), находится поток самоиндукции сквозь часть плоскости $z = 0$, заключенную между нитями витков и прямыми $y = \pm a_s$:

$$\Phi = 2\mu_0 l_s \int_0^x H_z dx = \mu_0 l_s F_m \sin \alpha x, \quad (19)$$

где $l_s = 2a_s$ – расчетная ширина обмотки статора.

Полный поток самоиндукции на один полюс рассматриваемой фазы выражается уравнением:

$$\Psi_s = \frac{1}{i_1} \int \Phi dF = \frac{w_1 k_{об}}{2p} \mu_0 l_s F_m \quad (20)$$

где $i_1 = \frac{\pi p i}{2w_1 k_{об}}$ – ток в проводнике обмотки; $i = \int_0^{\tau/2} F dF = F_m$ – полный ток или полная

намагничивающая сила обмотки на один полюс. В результате индуктивность одной фазы статора на одну пару полюсов определяется в виде:

$$L_{s\infty} = 0.63\mu_0 l_s p^{-2} (w_1 k_{об})^2 \quad (21)$$

Взаимная индуктивность двух фаз обмотки статора на пару полюсов определяется по формуле: $M_{I,II} = M_s = -0.5L_{s\infty} = -0.32\mu_0 l_s p^{-2} (w_1 k_{об})^2$

Для симметричных обмоток и трехфазной системы токов статора эквивалентная или синхронная индуктивность одной фазы, с учетом влияния двух других фаз, определяется по формуле:

$$L_{11} = L_{s\infty} - M_s = 0.32m_1\mu_0 l_s p^{-2} (w_1 k_{об})^2 \quad (22)$$

Для определения взаимной индуктивности обмоток ротора и статора выражение (5), для вертикальной составляющей H_z напряженности поля первой фазы статора, записывается в подвижной системе координат, пользуясь соотношением $x = x_r + V_0 t$. При этом, учитывая соотношение $\alpha V_0 = \omega$, имеем $H_z = H(h) \cos(\alpha x_r + \omega t)$.

Полный магнитный поток, сцепленный с одной секцией ротора, имеет значение:

$$\Psi_1 = w_r \int_{-(\sigma/2+g)}^{\sigma/2-g} \mu_0 H_z l_r dx_r = w_r \mu_0 l_r F_m e^{-\alpha h} \cos \nu \cos(\omega t - \theta) \quad (23)$$

где w_r – число витков секции; σ – размер, показанный на рис. 1; $g = \alpha \theta$.

Полный поток, сцепляющийся со всей обмоткой ротора состоящей из N_r последовательно соединенных секций, определяется по формуле:

$$\Psi_{r1} = N_r \Psi_1 = \mu_0 N_r w_r l_r F_m e^{-\alpha h} \cos \nu \cos(\omega t - \theta). \quad (24)$$

Взаимная индуктивность между первой фазой статора и обмоткой ротора равняется:

$$M_{r1} = \Psi_{r1} / i_1 = 0.63 p^{-1} \mu_0 N_r l_r w_r w_1 k_{об} e^{-\alpha h} \cos v \cos(\omega t - \theta) \quad (25)$$

В трехмерном приближении собственная индуктивность обмотки статора определяется уравнением:

$$L_s = \frac{8}{(\pi p)^2} \mu_0 (w_1 k_{об})^2 \int_0^\infty \frac{[f(\beta)]^2}{\beta^2} \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2}} d\beta. \quad (26)$$

Отношение, L_s по уравнению (26) к значению индуктивности $L_{s\infty}$ для двухмерной модели (по уравнению (21)), дает коэффициент χ_L , учитывающий влияние конечности ширины статора на его индуктивность:

$$\chi_L = \frac{L_s}{L_{s\infty}} = \frac{4}{\pi l_s} \int_0^\infty \frac{[f(\beta)]^2}{\beta^2} \sqrt{1 + \frac{\beta^2}{\alpha^2}} d\beta \quad (27)$$

где $f(\beta) = (2/(\beta c_s)) \sin(0.5\beta c_s) \sin \beta(a_s + c_s/2)$; l_s – расчетная ширина статора в двухмерной модели. Полагая $l_s = 2a_s + c_s$ и вводя обозначения $k = b_s / \tau$; $t = \beta \tau$; $m = c_s / b_s$, получим:

$$\chi_L = \frac{4}{\pi} \frac{1}{(2-m)k} \int_0^\infty \frac{[f(t)]^2}{t^2} \sqrt{1 + \frac{t^2}{\alpha^2}} dt \quad (28)$$

При наличии высших пространственных гармоник в распределении поверхностной плотности намагничивающей силы индуктивность обмотки статора определяется формулой:

$$L_{11k} = 3\mu_0 l_s \frac{(w_1 k_{об} k)^2}{\pi p^2} \left[\left(\sum_k F_{mk}^2 / k \right) / \left(\sum_k F_{mk} / k \right)^{-2} \right] \quad (29)$$

Поскольку в результирующем поле статора гармоники порядка $3k$ (k – целое число) отсутствуют, то суммы в числителях формулы (29) распространяются только на гармоники порядка $(6k \pm 1)$.

В четвертой главе рассматриваются ЭДС, индуцируемые в обмотке статора собственным магнитным полем и полем ротора. При этом, используя выражения для взаимных индуктивностей обмоток статора и ротора и синхронной индуктивности обмотки статора, определяются ЭДС, индуцируемые в фазных обмотках статора его собственным бегущим полем и полем ротора.

ЭДС, индуцируемая, в первой фазе статора полем ротора определяется по формуле:

$$e_{12} = i_2 \omega M_{\max} \sin(\omega t - \theta) = E_{12} \sin(\omega t - \theta), \quad (30)$$

где $E_{12} = \frac{2}{\pi p} \mu_0 \omega l_r N_r w_r i_2 w_1 k_{об} e^{-\alpha h} \cos v$.

При учете высших гармоник уравнение (30) примет вид:

$$e_{12} = \mu_0 \omega i_2 w_r N_r l_r (i_{1k})^{-1} \sum_k F_{mk} e^{-k\alpha h} \cos kv \sin k(\omega t - \theta), \quad (31)$$

где $i_{1k} = \pi p (2w_1 k_{об} k)^{-1} \sum_k F_{mk}$.

ЭДС, индуцируемая в первой фазе обмотки статора его собственным бегущим магнитным полем, определяется по формуле:

$$e_{11} = -L_{11} \frac{di_1}{dt} = \omega L_{11} I_{1m} \sin \omega t. \quad (32)$$

ЭДС, индуцируемая в обмотке статора токами лобовых частей определяется уравнением:

$$e_{11}^{(x)} = \frac{3}{4\pi^2 p} \frac{\mu_0 \omega w_1 k_{об1}}{c_{л}} F_m \tau \sin \omega t \int_0^{2a_s} \frac{1 - e^{-2a_s \gamma}}{\beta \gamma} \sin \beta c_{л} d\beta \quad (33)$$

Результирующая ЭДС, индуцируемая в первой фазе обмотки статора его бегущем полем, находится как сумма ЭДС, определяемых по (32) и (33).

Уравнение напряжений для фазы обмотки статора ЛСД в комплексной форме используется в виде:

$$\dot{U} = -\dot{E}_{12} + (r_s + jx_{11})\dot{I}_1 \quad (34)$$

где r_s и $x_{11} = \omega L_{11}$ – активное и реактивное синхронное сопротивление фазы обмотки статора; I_1 – ток в ней; E_{12} – ЭДС, индуцируемая в этой обмотке полем ротора; U – фазное напряжение двигателя.

По найденному магнитному полю обмотки статора (в двухмерном и трехмерном приближениях) в системе координат, движущейся вместе с ротором, определяются силы, действующие на ротор со стороны статора.

Тяговое усилие:

$$F_x = F \sin \theta, \quad (35)$$

где $F = 1.5\mu_0 l_r N_r i_2 w_r \alpha F_m e^{-\alpha h} \cos \nu$, θ – угол нагрузки.

Составляющие, действующие в направлениях осей z и y равняются:

$$F_z = -2\mu_0 H_m(h) l_r i_2 w_r \cos \nu \cos \theta \quad (36)$$

$$F_y = F / (N_r \alpha a_r) \cos \theta, \quad (37)$$

Силы, действующие на активные стороны секций ЛСД в трехмерной модели, определяются путем умножения выражений (35), (36) и (37) на коэффициенты $\chi^{(h)}$, интегрально учитывающие трехмерный характер магнитного поля статора.

В пятой главе разработана методика электромагнитного расчета ЛСД, позволяющая выбрать главные размеры и оптимизировать рабочие режимы. При этом задаются либо питающее напряжение, либо коэффициент мощности.

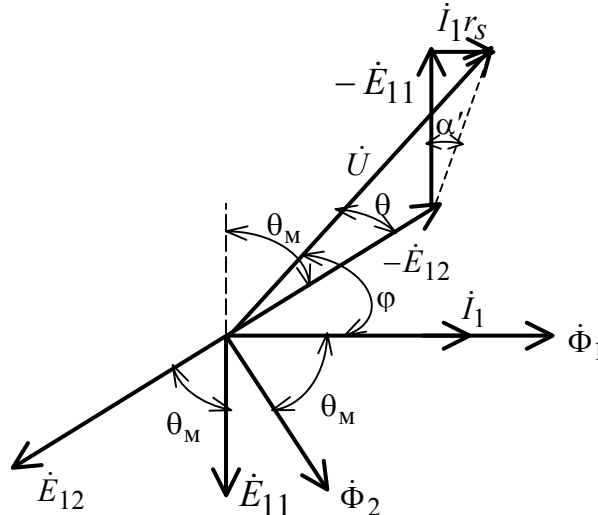


Рис. 4. Видоизмененная векторная диаграмма ЛСД

Используя уравнения и векторную диаграмму ЛСД (рис. 4), определяется длина запитываемого участка обмотки индуктора и величина напряжения, обеспечивающего при заданном токе обмотки ротора I_2 необходимую силу тяги. При решении задачи задается значение угла сдвига θ_m между магнитными системами ротора и статора, а также значение желаемого коэффициента мощности ЛСД.

Из векторной диаграммы следует, что:

$$\operatorname{ctg} \varphi = \left(E_{12} \sin \theta_m + I_1 \left(\frac{r_1}{p} \right) p \right) / \left[\left(\frac{E_{11}}{p} \right) p + E_{12} \cos \theta_m \right] \quad (38)$$

где E_{12} – ЭДС, индуцируемая потоком ротора; $\frac{r_1}{p}$ – активное сопротивление фазы обмотки индуктора на участке с длиной 2τ ; $\frac{E_{11}}{p}$ – ЭДС, индуцируемая потоком статора на участке индуктора, равном 2τ ; p – число пар полюсов запитываемого участка индуктора.

Из уравнения (38), при заданном $\cos \varphi$ можно получить:

$$p = (E_{12} \sin \theta - E_{12} \cos \theta_m \operatorname{ctg} \varphi) / \left[\left(\frac{E_{11}}{p} \right) \operatorname{ctg} \varphi - I_1 \left(\frac{r_1}{p} \right) \right] \quad (39)$$

Длина запитываемого участка обмотки статора

$$L_{\text{ст}} = 2\tau p \quad (40)$$

Приложенное к участку $L_{\text{ст}}$ напряжение должно быть:

$$U = \left(E_{12} \sin \theta_m + I_1 \left(\frac{r_1}{p} \right) p \right) (\cos \varphi)^{-1} \quad (41)$$

В случае заданной величины напряжения решение задачи начинается с определения числа пар полюсов, при котором по обмотке статора протекает ток, обеспечивающий необходимое тяговое усилие экипажа. Параллельно с этим определяется коэффициент мощности, с которым будет работать ЛСД.

При заданных величинах напряжения, ЭДС E_{12} и тока статора I_1 из векторной диаграммы (рис. 4) следует:

$$\left. \begin{aligned} U \sin \varphi &= E_{12} \cos \theta_m + \frac{E_{11}}{p} p \\ U \cos \varphi &= E_{12} \sin \theta_m + I_1 \frac{r_1}{p} p \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Из решения системы уравнений (42) относительно p и $\cos \varphi$, получаем:

$$p = \left(-E_{12} \left(\frac{E_{11}}{p} \cos \theta_m + I_1 \frac{r_1}{p} \sin \theta_m \right) \pm B/2 \right) / \left[\left(\frac{E_{11}}{p} \right)^2 + \left(\frac{I_1 r_1}{p} \right)^2 \right] \quad (43)$$

$$\text{где: } B = \sqrt{4E_{12}^2 \left(\frac{E_{11}}{p} \cos \theta_m + I_1 \frac{r_1}{p} \sin \theta_m \right)^2 - 4(E_{12}^2 - U^2) \left[\left(\frac{E_{11}}{p} \right)^2 + \left(I_1 \frac{r_1}{p} \right)^2 \right]}$$

$$\cos \varphi = \left(E_{12} \sin \theta_m + I_1 \frac{r_1}{p} \right) / U \quad (44)$$

Уравнения (43) и (44) позволяют определить значения p и $\cos \varphi$ при заданной величине напряжения U .

Из условия, что подкоренное выражение в уравнении (43) должно иметь положительное значение, следует:

$$U \geq \sqrt{E_{12}^2 - \left(E_{12}^2 \left(\frac{E_{11}}{p} \cos \theta_m + I_1 \frac{r_1}{p} \sin \theta_m \right)^2 \right) / \left(\left(\frac{E_{11}}{p} \right)^2 + \left(I_1 \frac{r_1}{p} \right)^2 \right)} \quad (45)$$

Уравнение (45) позволяет выполнить расчеты с целью определения оптимальных значений напряжения.

В шестой главе представлены результаты сопоставления расчетов с данными экспериментальных исследований. Для этого использовался специальный макет ЛСД (рис. 5), в котором отсутствуют ферромагнитопроводы и криогенное оборудование.

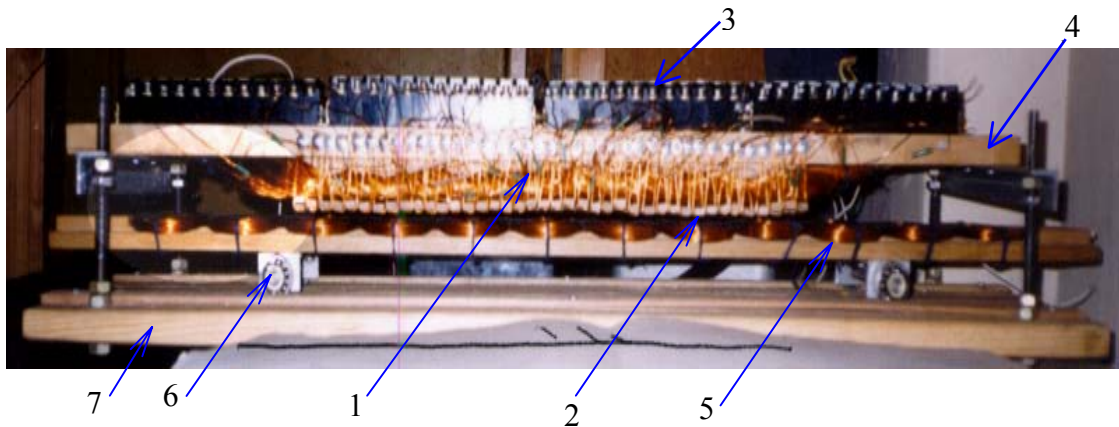


Рис. 5. Общий вид макета ЛСД

Макет ЛСД состоит из трехфазной обмотки статора 1, намотанной из круглых медных проводов диаметром $d = 0.63$ мм и располагаемой на деревянной основе 4. Статорная обмотка состоит из катушечных групп, концы которых выведены на клеммную плату 3. Обмотка ротора 2, состоящая из медных катушек, располагающихся на деревянной основе 5, и движется под действием электромагнитных усилий над статором с помощью роликов 6 по опорной плите 7.

Оборудование, использованное при измерении магнитного поля обмотки статора, включало измерительную катушку и микровольтметр В7– 64/1, предоставленные Санкт-Петербургским НИИ метрологии имени Менделеева. Измерительная катушка входит в комплект государственного эталона ГЭТ 12 - 91 под номером 52. Размеры измерительной катушки были выбраны такими, чтобы индукция в пределах площади, пронизываемой магнитным потоком, оставалась постоянной.

В ходе эксперимента измерительная катушка перемещалась по поверхности статора, обеспечивая измерение составляющих индукции по осям x , z и y . Координаты осей фиксировались с помощью миллиметровой сетки, укрепленной на поверхности статора. Вследствие конструктивных особенностей крепления обмотки статора, а также из-за конечной толщины измерительной катушки индукция измерялась не на поверхности статора, а начиная с высоты $\Delta z = 20$ мм.

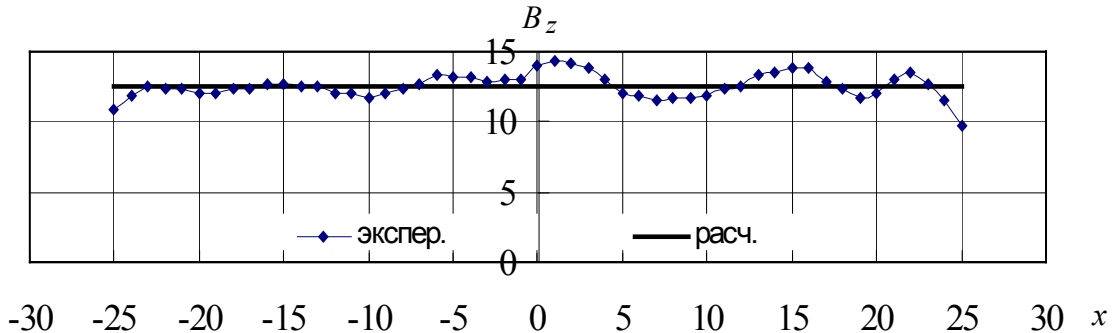


Рис. 6. Зависимость вертикальной составляющей B_z (Гс) от x (см) при $y = 0$

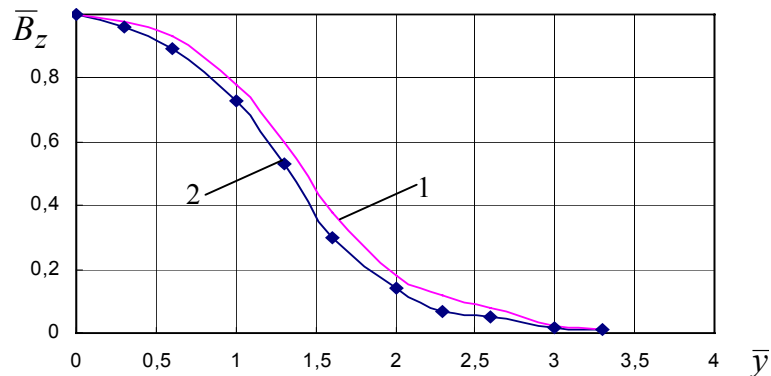


Рис. 8. Кривая зависимости \bar{B}_z от \bar{y} при $x = 0$. 1- расчет; 2- эксперимент

Сравнение экспериментальных данных с расчетными, показало адекватность предложенных моделей в целом, поскольку наибольшие расхождения расчетных и опытных значений составили 10 – 15 %. На рис. 6 – 7 приведены расчетные и экспериментальные кривые изменения вертикальной составляющей индукции по длине и ширине статора. При этом $\bar{B}_z = B_z / B_{z(0,0)}$, $\bar{y} = y / a_s$. На рисунках и в расчетах учитывается наличие продольного, краевого эффекта, обусловленного разомкнутостью магнитопровода в направлении оси x , и пульсационных составляющих магнитного поля, обусловленных лобовыми частями обмотки статора.

В приложениях приведены методики определения намагничивающих сил и ЭДС с учетом пространственных гармоник и лобовых частей.

Заключение

В соответствии с целью и задачами диссертационной работы проведены теоретические и экспериментальные исследования ЛСД, предназначенного для работы в системах высокоскоростного наземного транспорта. Основными результатами научных исследований, выполненных автором, являются:

1. Произведен аналитический обзор литературы по состоянию разработок по прикладной сверхпроводимости и ВСНТ, показывающий, что достигнутые современной промышленностью значения критических параметров сверхпроводящих материалов и достаточно отработанные и налаженные технологии производства криогенного оборудования позволяют уже в настоящее время рассчитывать на создание ВСНТ с комбинированными системами тяги, левитации и стабилизации.
2. С точки зрения надежности и конструктивной выполнимости, реально осуществимым представляется односторонний без ферромагнитопроводов линейный синхронный двигатель со сверхпроводниковыми обмотками возбуждения, располагаемыми на экипаже, и однослойной обмоткой переменного тока, размещаемой на путепроводе.

3. Линейные синхронные двигатели со сверхпроводниковыми обмотками возбуждения рассматриваются в качестве основного варианта линейных тяговых двигателей в системах ВСНТ Японии, Канады и США. В ФРГ также признается целесообразным применение ЛСД в экипажах с большими грузоподъемностью и скоростью.
4. Применение в ЛСД сверхпроводниковых обмоток возбуждения, отсутствие ферромагнитопроводов и относительно большие рабочие зазоры делают невозможным использование теории обычных синхронных машин для проектирования ЛСД ВСНТ.
5. В диссертации разработаны основы теории и методики расчета односторонних ЛСД без ферромагнитопроводов и со сверхпроводниковыми обмотками возбуждения, учитывающие трехмерность магнитного поля и конечные размеры активных проводников:
 - 5.1. Предложены методики расчета бегущего магнитного поля, создаваемого распределенной обмоткой ЛСД, и электромагнитных сил, действующих на обмотку ротора, отличающиеся учетом конечных размеров обмоток при отсутствии ферромагнитопроводов;
 - 5.2. Разработаны применительно к ЛСД метод искусственной периодизации и методики интегрального учета влияния конечной ширины и толщины обмотки статора на магнитное поле и связанные с ним показатели ЛСД;
 - 5.3. Предложены аналитические методики расчета рабочих характеристик и векторные диаграммы ЛСД, обеспечивающие выбор главных размеров и выполнение электромагнитных расчетов по оптимизации параметров;
 - 5.4. Разработаны методики учета высших пространственных гармоник магнитного поля, создаваемого статорной обмоткой, и выполнены расчетные оценки влияния гармоник на показатели ЛСД;
 - 5.5. Разработан макет ЛСД, позволивший экспериментально подтвердить достоверность разработанных методик и возможность выполнения расчета магнитного поля ЛСД в двухмерном и трехмерном приближениях с точностью до 10 – 15%;
 - 5.6. Сформулированы рекомендации по выбору электромагнитных параметров, размеров и энергетических показателей ЛСД для режимов работы при заданных значениях напряжения и коэффициента мощности.
6. Математический аппарат и методы решения уравнений ЛСД, в трехмерной постановке могут быть использованы для получения расчетных формул и методик расчета не только односторонних ЛСД, но и двухсторонних и комбинированных ЛСД.
7. Решение ряда частных вопросов, например, по нагреву обмоток, дополнительным потерям, экранированию, передаче усилий и др., существенным образом зависит от конструктивных особенностей двигателей, применяемых материалов и различных специальных требований, предъявляемых к двигателю. Перечисленные вопросы должны быть предметом специальных исследований.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Коськин Ю.П., Шейх У.Э. О расчете индуктивных сопротивлений линейных синхронных двигателей. // Тезисы докладов МКЭЭ-98, Россия, Клязьма, изд-во МЭИ, 1998, с. 328.
2. Шейх У.Э. Метод искусственной периодизации в расчетах линейных синхронных двигателей/ Труды 4-й международной конференции по нетрадиционным электромеханическим и электрическим системам UEES-99, С.-Петербург, 21-24 июня 1999 г, с. 455.
3. Коськин Ю.П., Шейх У.Э. Линейные синхронные двигатели: Учеб. пособие. С.-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000, 56 с.