

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ**

**На правах рукописи**

**ОМЕЛЬЯНЕНКО Виктор Иванович**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ЭНЕРГИИ  
СО СВЕРХПРОВОДЯЩИМИ ОБМОТКАМИ ВОЗБУЖДЕНИЯ**

**Специальность 05.09.01 - Электрические машины**

**Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Киев - 1994**



00756189 (-)

Диссертацией является рукопись.

Работа выполнена в Харьковском Государственном политехническом университете

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор

- Афонин Анатолий Алексеевич
- доктор технических наук, профессор
- Бахвалов Юрий Алексеевич
- доктор технических наук, профессор
- Дудник Михаил Захарович

Ведущая организация НИИ НПО "Электротяжмаш" (г. Харьков)  
Минмашпрома Украины

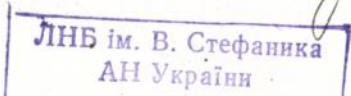
Защита диссертации состоится "21" февраля 1995 г.  
в 14<sup>00</sup> час. на заседании специализированного ученого совета  
Д 016.30.04 при Институте электродинамики НАН Украины по  
адресу: 252680, г. Киев-57, проспект Победы, 56, тел. 446 - 91 - 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
электродинамики НАН Украины.

Автореферат разослан "21" декабря 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета  
доктор технических наук

Г.М.Федоренко



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы. Степень исследования тематики диссертации.* Использование в электроприводах линейных электродвигателей, обеспечивающих перемещение изделия без кинематического механизма, преобразующего вращательное движение в поступательное, дает возможность упростить конструкцию приводного механизма; уменьшить потери в передачах и повысить надежность механизма в целом. Успехи, достигнутые в низкотемпературной сверхпроводимости, криогенной и преобразовательной технике, дали возможность синтезировать такого рода устройства с качественно новыми эксплуатационными свойствами - линейные электромеханические преобразователи энергии (ЛЭМПЭ). В этих устройствах наряду с электромагнитной тягой, реализуемой линейным синхронным двигателем (ЛСД) или линейным двигателем постоянного тока с тиристорным коммутатором (ЛДПТТК), имеет место бесконтактный электродинамический подвес сверхпроводящего индуктора относительно якоря с зазором в несколько десятков миллиметров, обеспечиваемый устройством левитации (УЛ).

Работы по исследованию таких устройств велись в стране в соответствии с Постановлениями ГКНТ СССР N 45 от 02.03.81, N 37 от 27.01.89, N 105 от 04.02.91, Постановлением ГКНТ Украины N 12 от 04.05.90. В процессе выполнения этих работ усилиями В.И.Астахова, Ю.А.Бахвалова, В.И.Бочарова, В.А.Винокурова, К.И.Кима, В.Д.Нагорского, М.Б.Бондаренко, С.В.Васильева, В.А.Дзензерского, В.М.Кочеткова, И.И.Куркалова, В.И.Матина, Н.М.Новогренко, В.А.Петрова, И.И.Тальи и др. достигнуты определенные успехи в изучении теории электродинамической левитации ЛСД для высокоскоростного наземного транспорта (ВСНТ). Однако весьма ограниченное финансирование из довольно разнородных источников, не позволившее исполнителям сформулировать цель в виде задачи создания полной схемы какой-либо из транспортных систем свели усилия отечественных исследователей, в основном, к изучению отдельных элементов и узлов рассматриваемых устройств. При этом по существу вне поля зрения остался такой ключевой момент проектирования ЛЭМПЭ, как выбор основных геометрических размеров и электромагнитных нагрузок. В итоге, недостаточная изученность этих вопросов заставляет потенциальных потребителей относиться скептически даже к очевидным преимуществам этих устройств при обсуждении технических альтернатив. Потребность в эффективных, экономичных

и экологически чистых транспортных технологиях делает необходимым проведение исследований по созданию теоретических основ проектирования ЛЭМПЭ с целью реализации их при создании ВСНТ, электродинамических разгонных устройствах и всевозможных стендов для транспортных средств специального назначения.

*Объект исследования.* Линейные электромеханические преобразователи энергии, включающие: линейные синхронные двигатели, линейные двигатели постоянного тока с тиристорным коммутатором, устройства электродинамической левитации, а также сверхпроводящие магниты систем возбуждения перечисленных устройств.

*Цель работы и основные задачи исследований.* Целью настоящей работы является разработка теоретических основ проектирования ЛЭМПЭ, определяющих для входящих в их состав устройств с заданными функциональными показателями выбор наилучших, с позиций капитальных и эксплуатационных затрат, основных геометрических размеров и электромагнитных нагрузок.

Для достижения этой цели следует решить такие задачи.

Определив показатели эффективности и качества электромеханического преобразования энергии в ЛСД, ЛДПТТК и УЛ, создать математические модели этого преобразования, с максимальной степенью достоверности отражающие электрофизические процессы в каждом из устройств исследуемого класса.

С целью определения функциональных возможностей ЛЭМПЭ исследовать путем численного и физического моделирования влияние основных геометрических размеров и электромагнитных параметров на рабочие характеристики входящих в его состав устройств и отдельных узлов.

На базе созданных математических моделей с учетом результатов определения функциональных возможностей исследуемого класса устройств разработать алгоритм выбора оптимальных значений основных геометрических размеров, обеспечивающих требуемые силовые и энергетические характеристики ЛЭМПЭ при минимуме затрат.

*Общая методика исследований.* Теоретические исследования базируются на численном решении систем дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в магнитосвязанных контурах с током, интегральных уравнений, описывающих трехмерное магнитное поле сверхпроводящего индуктора, а также на использовании метода конечных элементов для определения механических напряжений и перемещений элементов и участков сверхпроводящих

обмоток. Для решения задач многокритериальной оптимизации использован поисковый метод нелинейного программирования. Экспериментальное исследование базируется на методе имитационного моделирования электромагнитных процессов в полномасштабных обмотках якоря и индуктора на лабораторных установках ограниченной длины, а также на методе непосредственных измерений с помощью средств магнитной, электрической, механической, акустической и температурной диагностики электрофизических параметров полномасштабных сверхпроводящих обмоток в процессе их охлаждения, возбуждения током и перехода в нормальное состояние.

*Конкретный личный вклад диссертанта в разработку научных результатов, которые выносятся на защиту.*

Создание с единых позиций энергетического подхода математических моделей электромеханического преобразования энергии в ЛСД, ЛДПТТК и УЛ.

Разработка алгоритмов выбора рациональных значений основных геометрических размеров в процессе проектирования ЛЭМПЭ, основанных на решении задачи оптимизации иерархической последовательности критериев.

Исследование влияния геометрических параметров ЛСД на их угловые характеристики и энергетические показатели.

Организация и проведение комплекса исследований ЛДПТТК триггерного и мостового типов, а также с коммутатором в виде управляемого выпрямителя, касающегося силовых и энергетических характеристик этих двигателей и протекания в них процессов коммутации.

Организация и проведение комплекса исследований УЛ новой конструкции, включающий теоретическое обоснование ее преимуществ и концепцию экспериментальных исследований полномасштабных УЛ на прямоточных стендах ограниченной длины.

Организация и проведение комплекса исследований, направленных на создание полномасштабных сверхпроводящих магнитов для индукторов ЛЭМПЭ.

*Научная новизна* заключается в следующем.

В создании единых математических моделей электромеханического преобразования энергии в ЛСД, ЛДПТТК и УЛ, основывающихся на выраженной в аналитической форме магнитной связи между якорной и сверхпроводящей обмотками прямоугольных конфигураций любых размеров при произвольном их взаимном положении друг относительно друга.

В разработке алгоритмов выбора наилучших значений геометрических размеров при проектировании ЛЭМПЭ с требуемыми силовыми и энергетическими характеристиками при минимуме затрат, базирующихся на решении задачи оптимизации иерархической последовательности разработанных для каждого из устройств исследуемого класса систем критериев методом вложенных сжимающихся допусков.

В установлении наличия в составе угловых характеристик ЛСД при неизменности напряжения питания якоря постоянных составляющих сил, приводящих к увеличению подвеса и снижению тяги.

В получении для ЛДПТТК триггерного и мостового типа аналитического выражения, связывающего обобщенный геометрический фактор с напряжением питания якоря, МДС сверхпроводящей обмотки и скоростью движения индуктора при максимуме развиваемой двигателем силы тяги.

Во введении понятия тока коммутации и создании на его базе объединенной системы дифференциальных уравнений коммутации ЛДПТТК триггерного и мостового типа, решение которых дает возможность оценить влияние геометрических и электромагнитных параметров двигателей на их рабочие и коммутационные характеристики.

В экспериментально подтвержденной идее возможности работы ЛДПТТК на базе управляемого выпрямителя, а также в создании математической модели процесса ускорения индуктора и движения его в составе такого двигателя с постоянной скоростью с учетом демпфирования коммутируемых секций обмотки якоря и наличия переменной составляющей тока в обмотке возбуждения индуктора.

В разработке новой конструкции УЛ, содержащей в себе максимальное количество признаков перспективного устройства и показавшей в результате теоретических и экспериментальных исследований более широкие возможности по сравнению с имеющимися на сегодняшний день конструкциями как в плане эффективности преобразования энергии, так и в плане обеспечения жесткости и устойчивости подвеса.

В оригинальности концепции исследований полномасштабных узлов УЛ для широкого спектра моделируемых скоростей на прямолинейных стендах ограниченной длины при одной определенной реальной скорости индуктора.

В получении путем математического моделирования и подтверждении экспериментально положения об эффективности такого

вида бандажирования сверхпроводящей обмотки возбуждения индуктора, когда опорным элементом служит набор плоских пластин, к которым путем приклейки крепятся секции обмотки.

*Теоретическая и практическая ценность.* Полученные теоретические положения, доведенные в работе до расчетных алгоритмов и экспериментальных методик и апробированные в процессе вычислительных экспериментов, а также физического моделирования, дают возможность выбора в процессе проектирования ЛСД, ЛДПТТК и УЛ геометрических и электромагнитных параметров, обеспечивающих требуемые рабочие и энергетические характеристики этих устройств при минимуме затрат. Приобретенный опыт конструирования и создания экспериментальных разгонных устройств и полномасштабных транспортных сверхпроводящих магнитов, а также разработанные в процессе этого технологические приемы и оснастка могут быть использованы при создании прогрессивных транспортных технологий.

*Реализация результатов работы.* Результаты приведенных в диссертационной работе исследований внедрены ВЭлНИИ в практику проектирования УЛ ВСНТ. Базируясь на изложенных в диссертационной работе научных результатах, разработан и передан НО ИВТАН проект технического задания на ОКР по созданию сверхпроводящего индуктора для управляемого электродинамического разгонного и тормозного устройства летательных аппаратов корабельного базирования. Полученные в работе результаты используются также в настоящее время в ходе разработки для КБ "Южное" экспериментальных установок с приводом от линейных электродвигателей для механических испытаний узлов и конструкций ракетно-космической техники.

*Апробация работы.* Положительные результаты испытаний установок ЛЭМПЭ-1 и ЛЭМПЭ-2, сверхпроводящих магнитов ХПИ-101, В-112, а также магнита для индуктора ЛЭМПЭ-2 подтвердили правомерность конструкторских и технологических решений, принятых при создании этих устройств, и тем самым справедливость изложенных в диссертации теоретических положений, экспериментальных исследований и методик.

Результаты работы докладывались:

- на Всесоюзных и республиканских научно-технических конференциях: г. Новочеркасск, 1980, 1984 г.г.; г. Москва, 1984 г.; г. Ереван, 1985 г.; г. Харьков, 1988 г.; г. Каунас, 1988 г.;

- на международных конференциях: МТ-12 (г. Ленинград, 1990), ISEC-14 (г. Киев, 1992); "Прикладная сверхпроводимость-1994" (г. Бостон, 1994);
- на Первом Советско-японском семинаре по электромагнитным структурам (г. Токио, 1992);
- на Пятом международном симпозиуме по прикладному электромагнетизму ISEM-Sapporo (г. Саппоро, 1993).

Разработки демонстрировались: на ВДНХ СССР в 1985 г. (Серебряная медаль) и в 1988 (Серебряная медаль); на Международной выставке в США "СССР: Человек, Семья, Общество" (1987); на Всесоюзной выставке "Прикладная сверхпроводимость" (г. Москва, 1989).

*Публикации.* Результаты работы отражены в 37 публикациях, включающих монографию, 14 статей, 20 авторских свидетельств, препринт и тезисы доклада.

*Структура и объем работы.* Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 210 наименований и содержит 236 страниц машинописного текста, 24 таблицы и 99 рисунков на 64 страницах.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Введение.* Показана актуальность темы. Приводится краткое описание содержания отдельных глав диссертации. Сформулированы цель работы и основные положения, выносимые автором на защиту.

*Первая глава.* Описаны области применения ЛЭМПЭ, сформулированы их главные признаки и характерные особенности, а также даны основы энергетического подхода к расчету силовых характеристик этих преобразователей.

ВСНТ - это бесконтактный транспорт с направленной структурой, имеющей взаимоохват экипажа и направляющего пути с зазором между ними 150 - 200 мм, в котором подвес и перемещение экипажа вдоль пути со скоростью до 500 км/ч осуществляется за счет электродинамического взаимодействия токовых контуров, размещенных на экипаже и пути. Такой вид транспорта как перспективная технология не имеет альтернатив с точки зрения экологии, ресурсосбережения и безопасности. Ближайший конкурент магнитного транспорта - высокоскоростной колесный - хотя и требует на 25% меньших капитальных вложений, но характеризуется большими на 15 - 20% эксплуатационными затратами.

Приведено полное описание технических проектов Magplane, первого и усовершенствованного вариантов транспортных

систем канадской группы MAGLEV. Обращено внимание на три основных этапа в работе специалистов Японии по созданию ВСНТ. В ходе выполнения третьего этапа созданы полномасштабные экипажи MLU001 и MLU002, продемонстрировавшие возможность движения такого рода транспортных средств с пассажирами на борту, спроектирован прототип и начато строительство магнитолевитирующего транспортного средства для коммерческих перевозок - Центральный Линейный Экспресс MLU00X1. Это говорит о способности современных технологий реализовать уже сейчас магнитный транспорт.

Исследователи, работающие в области создания электромагнитных разгонных устройств, видят возможное применение ЛЭМПЭ для ускорения тел большой массы (десятки, сотни тонн) до умеренных скоростей (сотни метров в секунду). Одним из таких применений может стать замена первой ступени ракеты, имеющей химическую тягу, электромагнитным ускорителем. При этом за счет уменьшения стартовой массы примерно на 70 % стоимость запуска снизится в десятки раз, а также прекратится загрязнение окружающей среды продуктами сгорания ракетного топлива. Электромагнитные ускорители больших масс до умеренных скоростей могут также найти применение в качестве катапульта нового поколения для самолетов короткого взлета, не требующих двигателей чрезмерно большой мощности. Это позволит снизить степень риска, шумность и загрязнение окружающей среды. Разгон с помощью электромагнитных ускорителей радиоуправляемых планеров, которые по баллистической траектории доставят грузы в труднодоступные местности, может стать полезным при швартовке судов, проведении спасательных работ, в борьбе с лесными пожарами и др.

ЛЭМПЭ достаточно эффективно может применяться также в тех областях экспериментальной и специальной техники, где требуется сообщить объекту линейное ускорение при минимальных массо-габаритных параметрах присоединенных к разгоняемому объекту устройств. Это может быть устройство для испытаний прочности кузовов автомобилей, стенд для проведения исследований приводнения гидропланов и посадки самолетов, установки для испытаний на механические перегрузки конструкций ракетно-космической техники.

ЛЭМПЭ по сравнению с ротативными электрическими машинами имеет ряд характерных особенностей.

Во-первых. Применение в качестве обмоток возбуждения индуктора сверхпроводящих магнитов дает возможность получить

величину МДС в них на уровне  $(0,7-1,2) \times 10^5$  А, отказаться от использования в составе магнитопровода ферромагнитных элементов и получить требуемые параметры при расстоянии между центрами обмоток якоря и индуктора на уровне 250 мм.

Во-вторых. Активная и пассивные обмотки якоря размещаются вдоль перемещения индуктора на расстоянии от нескольких сотен метров до нескольких сотен км. Поскольку режим работы каждой катушки якоря во времени импульсный, определяющим в выборе ее параметров считается не тепловой фактор, а расход активного материала обмотки на погонный метр.

В-третьих. В связи со сложным пространственным и временным характером распределения МДС в активной зоне ЛЭМПЭ, а также отсутствием формирующих магнитные поля структур, конструктивные элементы любой из существующих систем - тяги, подвеса и бокового направления выполняют в той или иной мере все эти три функции. Поэтому конструктивно обмотки якоря выполняются не распределенными, а сосредоточенными в виде прямоугольных катушек.

В-четвертых. Система возбуждения индуктора представляет собой ограниченное число следующих друг за другом в одной плоскости сверхпроводящих катушек чередующейся полярности. Следствием указанного обстоятельства является различие в условиях работы сверхпроводящих катушек, расположенных в центре и по краям индуктора, а также неидентичность протекания электромагнитных периодических процессов в катушках якорной обмотки при перемещении их в пределах длины индуктора.

В-пятых. Если в обычных ротативных электрических машинах такой важный параметр как величина воздушного зазора неизменен при работе устройства, то в рассматриваемом классе устройств его изменение даже на 30 - 50% по отношению к номинальному рассматривается как нормальный рабочий режим.

Перечисленные особенности ЛЭМПЭ делают, по нашему мнению, наиболее приемлемым для расчета их характеристик энергетический подход. В соответствии с этим подходе выражения мгновенных значений сил для элементарного ЛЭМПЭ (один сверхпроводящий и один якорный токовый контур) имеют следующий вид:

$$\text{для ЛСД и ЛДПТК} \quad f_x = i_s \cdot i_r \frac{dM_{sr}}{dx} ; \quad (1)$$

для УЛ

$$f_{x(y)} = -i_s \cdot i_r \frac{dM_{sr}}{dz(y)} \quad (2)$$

где  $i_s$  - ток сверхпроводящей обмотки,  $i_r$  - ток якорной обмотки,  $M_{sr}$  - коэффициент взаимной индукции этих обмоток.

Из этих выражений очевидно, что оба основных этапа в процессе нахождения сил, действующих в ЛЭМПЭ, - расчет токов в обмотках якоря  $i_r$ , а также определение коэффициента взаимной индукции и его производных по соответствующим координатам между обмотками якоря и индуктора  $M_{sr}$  и  $\frac{dM_{sr}}{dn}$  ( $n = x, y, z$ ), позволяют непосредственно и наглядно оценивать влияние геометрии и конфигурации якорных и сверхпроводящих обмоток на рабочие и энергетические показатели рассматриваемых устройств.

*Вторая глава.* Здесь содержится математическая модель для расчета силовых и энергетических характеристик ЛСД, а также формулировка и решение задачи многокритериальной оптимизации геометрических и электромагнитных параметров его якорной и сверхпроводящей обмоток.

Ключевым моментом в определении таких энергетических характеристик ЛСД как полная мощность, КПД,  $\cos \varphi$ , при определенной скорости движения индуктора является среднее значение развиваемой им силы тяги

$$F_{cp} = \frac{1}{2\tau} \int_0^{2\tau} f_x dx \quad (3)$$

где  $f_x$  - мгновенное значение силы тяги, действующей на пару магнитов противоположной полярности. Для трехфазного ЛСД

$$f_x = I_s \sum_{l=0,1,2} i_{rl} \sum_{k=-2}^3 \left[ \frac{dM_{sr} \left\{ x + 2\tau \left[ k - \left( 0,25 + \frac{i_l}{3} \right) \right] \right\}}{dx} - \frac{dM_{sr} \left\{ x + 2\tau \left[ k + \left( 0,25 - \frac{i_l}{3} \right) \right] \right\}}{dx} \right] \quad (4)$$

где  $I_s$  - МДС обмотки сверхпроводящего магнита,  $i_{rl}$  - мгновенное значение тока в фазах обмотки якоря (для фазы А -  $i = 0$ , для В - 1, для С - 2). Конфигурация обмоток и принятая система координат приведены на рис. 1.

Ток в якоре  $i_{rl}$  находился нами как сумма двух токов, один из которых обусловлен питающим напряжением, а другой - противо-

ЭДС от потока возбуждения. Используемые при этом значения  $M_{sg}$  определялись в соответствии со следующими выражениями

$$M_{sg} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \oint \frac{dl_1 \cdot dl_2}{r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^4 (-1)^{k+1} I_{mn}^{(j)(k)} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} I_{mn} = & (\alpha_2 - \alpha_1) \ln \left[ (\alpha_2 - \alpha_1) + \sqrt{(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + \Gamma} \right] - \sqrt{(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + \Gamma} - \\ & - (\alpha_2 - \beta_1) \ln \left[ (\alpha_2 - \beta_1) + \sqrt{(\alpha_2 - \beta_1)^2 + \Gamma} \right] - \sqrt{(\alpha_2 - \beta_1)^2 + \Gamma} - \\ & - (\beta_2 - \beta_1) \ln \left[ (\beta_2 - \beta_1) + \sqrt{(\beta_2 - \beta_1)^2 + \Gamma} \right] - \sqrt{(\beta_2 - \beta_1)^2 + \Gamma} + \\ & + (\beta_2 - \alpha_1) \ln \left[ (\beta_2 - \alpha_1) + \sqrt{(\beta_2 - \alpha_1)^2 + \Gamma} \right] - \sqrt{(\beta_2 - \alpha_1)^2 + \Gamma} \quad (6) \end{aligned}$$

$\Gamma = \Delta^2 + Z^2$ ;  $\Delta$  - для участков, параллельных оси  $X$ , разность координат  $Y$ , для участков, параллельных оси  $Y$  - разность координат  $X$ ; значения  $\alpha$  и  $\beta$  для интегралов (6) определяются конфигурацией якорной и сверхпроводящей катушек (рис. 2).

На базе полученной математической модели электромеханического преобразования энергии в ЛСД разработан алгоритм и энергетических характеристик ЛСД при работе его в двух режимах: постоянства тока якоря и постоянства напряжения питания обмотки якоря. Установлено, что в составе силовых характеристик  $F_x(\epsilon)$  и  $F_z(\epsilon)$  ( $\epsilon$  - угол силы) в режиме неизменности питающего напряжения имеют место постоянные составляющие, увеличивающие силу подвеса  $F_z$  и снижающие силу тяги  $F_x$  (рис. 3).

Выбор алгоритма определения наиболее рационального варианта геометрических и электромагнитных параметров ЛСД при их проектировании базируется на двух предпосылках. Первая заключается в неприемлемости для ЛЭМПЭ в целом методик, используемых для этих целей в ротативных электрических машинах традиционной конструкции. Это определяется отсутствием на сегодняшний день опыта построения и длительной эксплуатации ЛЭМПЭ, а также глубоких теоретических и экспериментальных исследований процессов, происходящих в них. Вторая предпосылка состоит в том, что электромагнитные процессы в ЛЭМПЭ описываются системой дифференциальных уравнений, коэффициенты в которых, хотя и весьма сложно, но достаточно определенно зависят



от геометрических размеров обмоток якоря, индуктора, и их взаимного расположения. Поэтому задача выбора оптимальных геометрических размеров обмоток может быть сведена к общей задаче нелинейного программирования.

Если ряд ограничений представить в качестве критериев, то общая задача нелинейного программирования в постановочном плане станет задачей многокритериальной оптимизации. Для ее решения наиболее приемлем иерархический подход, дающий возможность оперировать критериями, имеющими конкретный физический смысл, вследствие чего процесс оптимизации становится доступным для текущего контроля и анализа. Для решения таких задач предложено использовать метод вложенных сжимающихся допусков при модифицированном алгоритме сравнения критериев с допуском. Общий порядок определения размеров обмоток якоря и индуктора для любого из устройств, входящих в ЛЭМПЭ (ЛСД, ЛДПТК, УЛ), сводится к следующему: - определить целевую функцию - критерий младшего порядка; - сформировать иерархическую последовательность критериев; - выбрать и обосновать величину ограничений проекций вектора критериев, а также границы допустимой области изменений вектора варьируемых переменных; - произвести масштабирование критериев и переменных; - выбрать начальную точку и начальный размер многогранника; - используя метод вложенных сжимающихся допусков при модифицированном алгоритме сравнения критериев с допуском, осуществить поиск оптимального решения.

Для ЛСД, основное назначение которого состоит в создании заданной силы тяги  $F_x$  при определенной скорости индуктора  $V$ , ценой выполнения этой функции могут служить капитальные затраты, выражающиеся расходом проводниковых материалов на погонный метр длины якоря  $\Pi$  и текущие затраты, выражающиеся через полную мощность источника питания  $S$ . Если  $\Pi$  отнести в состав варьируемых параметрических ограничений, а в качестве целевой функции принять отношение  $F_x/S$ , то иерархическая последовательность критериев может быть сформирована следующим образом. Максимальный приоритет присвоим критерию, объединяющему в себе параметрические ограничения в виде неравенств и характеризующему тем самым степень нарушения границ гиперпараллелепипеда  $D = \{ x | a_i < x_i < b_i \}$  в пространстве  $R^6$  допустимой области изменения вектора варьируемых переменных

$x(\tau, a, b, c, z, x_{ik})$ . Вторым по степени старшинства принимается критерий среднего значения силы тяги. Далее следует критерий, определяющий перегрузочную способность двигателя  $K_p = F_{x0} / F_{x90}$  ( $F_{x0}$  - сила тяги при произвольном угле силы  $E$ ,  $F_{x90}$  - значение силы тяги при угле силы  $90^\circ$ ). И замыкает иерархическую последовательность критерий младшего порядка - целевая функция.

$$U_1(x) = \sum_{i=1}^6 (\max\{0; a_i - x_i\} + \max\{0; x_i - b_i\}) \quad (7)$$

$$U_2(x) = |F_{x0}(x) - F_{x00}| \quad (8)$$

$$U_3(x) = \max\{0; -K_p(x) + K_{p0}\} \quad (9)$$

$$U_4(x) = S(x) / F_{x0}(x) \quad (10)$$

Решение задачи (7)-(10)  $x = x^*$  будет оптимальным, если выполняются равенства

$$U_1(x^*) = U_2(x^*) = U_3(x^*) = 0 \quad (11)$$

$$U_4(x^*) = \min S(x) / F_{x0}(x) \quad (12)$$

Здесь  $F_{x00}$  - требования к среднему значению силы тяги,  $K_{p0}$  - требования к минимально допустимому значению перегрузочной способности.

В работе в качестве иллюстрации приведено решение задачи по оптимизации ЛСД с взятыми из литературных источников типичными параметрами. Полученные в результате этих оптимизационных расчетов зависимости целевой функции от среднего значения силы тяги  $F_{x0}$  при различных значениях тока якоря  $I_{g0}$  и перегрузочной способности  $K_{p0}$  приведены на рис.4. Рис.5 иллюстрирует изменение проекций оптимального вектора  $X^*$  в зависимости от  $F_{x0}$ ,  $I_{g0}$ ,  $K_{p0}$ , то есть дает представление о характере поведения при изменении ограничений  $F_{x0}$ ,  $I_{g0}$  и  $K_{p0}$  того набора переменных проектирования, на котором реализуются характеристики, представленные на рис.4.

Анализ полученных зависимостей позволяет заключить следующее. Один и тот же уровень силы тяги можно реализовать при разных значениях тока якоря и перегрузочной способности с различными значениями целевой функции. Рост тока или перегрузочной способности требует более высокого уровня полной мощности на

единицу развиваемого усилия тяги. Стремление получить ту же силу тяги при меньших потерях или при большем значении перегрузочной способности приводит к снижению максимального значения силы тяги в принятой системе ограничений варьируемых параметров.

Увеличение мощности, развиваемой двигателем при минимальном уровне потребляемой мощности сопровождается ростом размеров катушек обмотки якоря и сокращением полюсного деления. Причем, в рассмотренном диапазоне изменения критериев средние значения размеров катушек обмотки якоря и сверхпроводящей практически не зависят от тока якоря, а среднее значение полюсного деления увеличивается с ростом тока якоря.

Снятие ограничений в виде неравенств ведет к уменьшению полной мощности источника питания для создания заданной силы тяги (пунктирная кривая на рис.4). Это обстоятельство является основой для рекомендации, которая представляется ключевой в выборе исходной позиции при оптимальном проектировании ЛЭМПЭ. Именно с определения минимальной мощности источника питания для обеспечения ЛСД заданной силы тяги при минимальном количестве параметрических ограничений следует начинать проектирование ЛСД с тем, чтобы в дальнейшем, накладывая постепенно те или иные ограничения, лицо, принимающее техническое решение, могло оценить влияние каждого из них как на целевую функцию, так и на остальные параметры двигателя.

Установлено, что изменение расхода активного материала якорной обмотки ЛСД на погонный метр мало сказывается на уровне полной мощности источника питания двигателя. В то время как увеличение длины питаемого участка вызывает резкий рост полной мощности, потребляемой ЛСД.

*Третья глава* посвящена исследованиям электрофизических процессов в ЛДПТТК. Изложены рабочие свойства и описаны процессы коммутации трех типов двигателей - с коммутатором триггерного и мостового типов, а также с коммутатором на базе управляемого выпрямителя. Приведено сопоставление расчетных и экспериментальных результатов. Изложены соображения относительно рационального использования этих двигателей в перспективных транспортных технологиях.

В ЛДПТТК триггерного и мостового типов (рис.6 и рис.7) обмотка якоря состоит из отдельных секций, выполненных конструктивно в виде многовитковых катушек (рис. 8). Секции, смещенные друг относительно друга в направлении движения индуктора на

расстояние  $2\tau$  и установленные в один ряд, соединяясь последовательно, образуют фазу обмотки.  $2n$  таких фаз, смещаясь в пространстве по направлению движения индуктора друг относительно друга на расстояние  $\tau/n$  и накладываясь друг на друга образуют конструкцию  $2n$ -фазной обмотки.  $k$ -ая и  $(k+n)$ -ая фазы обмотки якоря включаются в нагрузку однофазных инверторов тока, которые, в свою очередь, соединяясь последовательно, образуют цепь обмотки якоря двигателя. Последовательное соединение однофазных инверторов практически исключает возможность возникновения режима короткого замыкания двигателя.

Математическая модель электромеханического преобразования энергии в ЛДПТТК триггерного типа при заданной МДС обмотки возбуждения устанавливает связь между напряжением  $U_g$ , током якоря  $I_g$ , скоростью индуктора  $v$ , а также развиваемой силой тяги  $F_{хсп}$

$$F_{хсп} = \zeta \cdot I_s \cdot I_g, \quad I_g = (U_g - \zeta \cdot I_s \cdot v) / R_g \quad (13)$$

через обобщенный геометрический фактор

$$\zeta = n_{инд} W_{фа} \frac{1}{m} \sum_m \frac{d}{dx} \sum_{k=1}^n \sum_{l=0; \pm 1; \pm 2} M_{згk} \left[ x_{ik} + 2\tau \cdot l + (k-1) \frac{\tau}{n} \right] \quad (14)$$

Здесь  $R_g = n \cdot N_{ке} \cdot R_c$  - сопротивление обмотки якоря,  $N_{ке}$  - число элементарных катушек в фазе обмотки якоря,  $R_c$  - сопротивление элементарной катушки,  $n_{инд}$  - число сверхпроводящих обмоток в индукторе,  $W_{фа}$  - число витков в катушке фазы обмотки якоря,  $m$  - число точек усреднения на интервале  $[0, \tau/n]$ ,  $x_{ik}$  - фазовый угол коммутации, представляющий собой координату оси индуктора относительно начала координат, совмещенных с осью катушки фазы в момент времени, когда ток якоря противоположной по отношению к току индуктора полярности включается в фазу  $(k+n)$ .

Аналитическое выражение, устанавливающее соотношение между обобщенным геометрическим фактором, напряжением обмотки якоря, МДС сверхпроводящей обмотки возбуждения и скоростью движения индуктора при условии максимума развиваемой двигателем силы тяги, имеет следующий вид

$$\zeta = U_g / 2I_s \cdot v \quad (15)$$

Установлено, что КПД двигателя при этом составляет 50%.

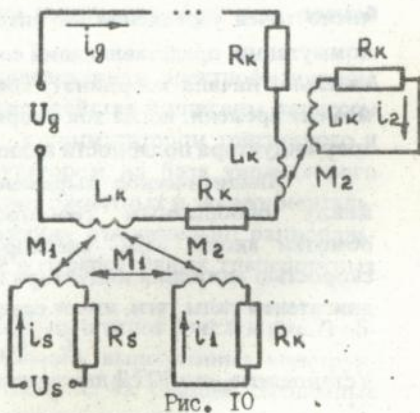
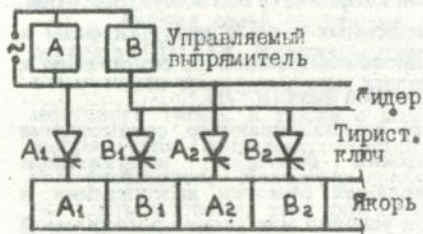
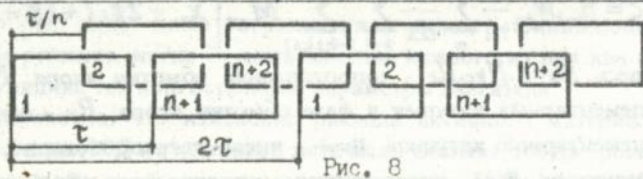
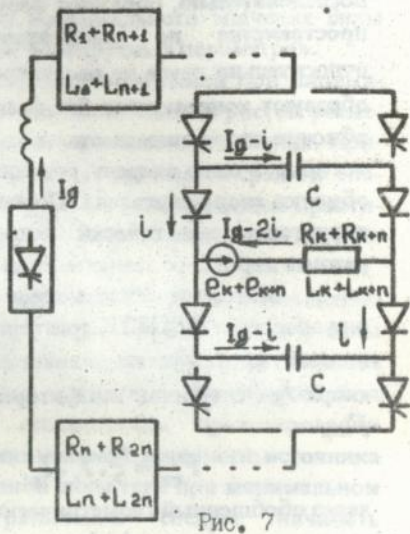
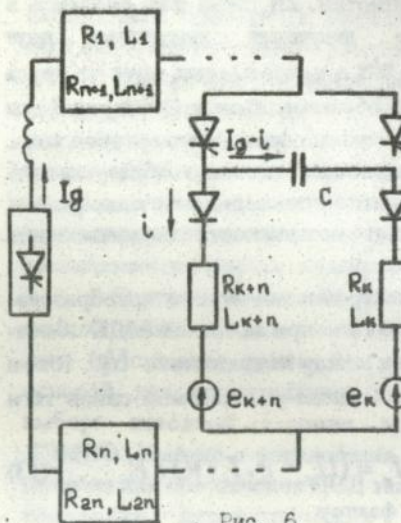


Рис. 9

Рис. 10

Анализ рабочих характеристик показал, что рассматриваемый двигатель, обладая по сравнению с ЛСД значительно меньшим значением потребляемой мощности на единицу развиваемого усилия, имеет также отличные пуско-регуляционные характеристики. Это обеспечивается как линейностью и жесткостью его регуляционных и механических характеристик, так и наличием у него возможности эффективного регулирования силы тяги в широких пределах от  $+F_{x\max}$  до  $-F_{x\max}$  в соответствии с выражением

$$F_{xcp} = -F_{x\max} \cdot \cos \frac{\pi \chi_{lk}}{\tau}$$
 путем изменения фазового угла коммутации.

Введено понятие тока коммутации  $i$  и на его базе создана математическая модель процесса коммутации в виде объединенной системы дифференциальных уравнений

$$\frac{du_c}{dt} = -\frac{I_g - i}{C} \quad (16)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{(e_k - e_{k+n}) - u_c + R(I_g - 2i)}{2L} \quad (17)$$

где  $R=R_k=R_{k+n}$ ,  $L=L_k=L_{k+n}$ .

Решения этой системы, представляющие собой мгновенные значения токов в ветвях тиристорного коммутатора и напряжений на элементах его силовой схемы, полученные с учетом реального характера изменения во времени ЭДС в коммутируемом контуре, обусловленной МДС сверхпроводящей обмотки возбуждения, дают возможность рассмотреть влияние геометрических и электромагнитных параметров двигателя на закономерности протекания процессов коммутации, определять номиналы для основных элементов тиристорного коммутатора, а также оценивать влияние коммутационного процесса на рабочие характеристики двигателя. На основе математической модели составлен алгоритм расчета процесса коммутации, учитывающий все возможные варианты поведения переменных при различных сочетаниях параметров схемы замещения коммутирующего контура.

Найдено, что характер и время протекания коммутационного процесса существенно определяются величиной емкости коммутационного конденсатора и значением фазового угла коммутации.

Коммутация при отрицательных фазовых углах сопровождается повышенным уровнем напряжения на отсекающем диоде. Стремление понизить его, увеличив емкость коммутационного кон-

денсатора, ощутимого результата не дает, а лишь затягивает общее время протекания коммутационного процесса.

Коммутация при положительных фазовых углах протекает более благоприятно. Если ее процесс организован таким образом, что ток в подключаемой фазе обмотки якоря достигает номинального значения в момент перехода ЭДС через ноль из положительного значения в отрицательное, то сила тяги, развиваемая двигателем, будет максимальна, а напряжение на отсекающем диоде минимальным. При этом показано, что для двигателя с определенными геометрическими и электромагнитными параметрами всегда может быть подобрана емкость коммутационного конденсатора и величина фазового угла коммутации, которые обеспечат успешное протекание коммутационного процесса в широком диапазоне скоростей движения индуктора. Однако работа при положительных значениях фазовых углов коммутаций в случае завышения емкости коммутационного конденсатора может сопровождаться явлением дозаряда конденсатора, вызывающим колебания силы тяги и тем самым отрицательно сказывающимся на рабочих характеристиках двигателя.

Для снижения перенапряжений на элементах схемы тиристорного коммутатора предложено использовать демпфирующие контура и указаны обстоятельства, ограничивающие их применение.

В ЛДПТТК мостового типа катушки  $K$ -ой и  $(K+n)$ -ой фаз, соединенные между собой встречно, включаются в диагонали инверторов мостового типа, которые, в свою очередь, соединяясь между собой последовательно, образуют цепь обмотки якоря. Уравнения напряжения, тока и ЭДС для цепи якоря такого двигателя, а также сила тяги описываются выражениями, аналогичными ЛДПТТК триггерного типа. Отличаться будут лишь выражения для сопротивления обмотки якоря  $R_g = 2n \cdot N_{кв} \cdot R_c$  и обобщенного геометрического фактора

$$\zeta = n_{инд} W_{фа} \frac{1}{m} \sum_m \frac{d}{dx} \sum_{k=1}^n \sum_{l=0;1;2} M_{гk} \left[ x_{ik} + \tau \cdot l + (k-1) \frac{\tau}{n} \right] \quad (18)$$

Обобщенный геометрический фактор для ЛДПТТК мостового типа приблизительно в два раза превосходит аналогичный параметр для ЛДПТТК триггерного типа (речь идет, разумеется, для случая одинаковых размеров обмоток якоря и индуктора). Поэтому для создания той же силы тяги в ЛДПТТК мостового типа потребуются ток якоря  $I_g$  в два раза меньший, чем в ЛДПТТК триггерного типа. Столь существенное снижение тока якоря дает возможность

улучшения экономических показателей машины по двум направлениям: - оставив неизменным по сравнению с ЛДПТТК триггерного типа расход материала на обмотку якоря, повышать КПД машины; - оставив неизменной плотность тока в обмотке якоря, снижать расход активного материала.

Установлено, что процесс коммутации в ЛДПТТК мостового типа может быть так же как и для ЛДПТТК триггерного типа описан объединенной системой дифференциальных уравнений при том условии, что под  $R$  и  $L$  в инверторе мостового типа следует понимать  $R=R_k+R_{k+n}$  и  $L=L_k+L_{k+n}$ . И хотя напряжение питания в ЛДПТТК мостового типа и число полупроводниковых элементов вдвое больше, при одинаковой суммарной емкости коммутационных конденсаторов на один инвертор удается обеспечить идентичный характер протекания коммутационного процесса в двигателях с коммутаторами мостового и триггерного типа. В итоге, если для инвертора триггерного типа в момент коммутации ток в нагрузке меняется так же, как и ток коммутации в пределах  $0 \leq i_{ng} \leq I_g$ , то для инвертора мостового типа ток в нагрузке меняется в пределах  $-I_g \leq i_{ng} \leq I_g$ , в то время как ток коммутации по-прежнему лежит в пределах  $0 \leq i \leq I_g$ .

Многофазная конструкция обмотки якоря в сочетании с инверторами токов позволяет существенно облегчить процесс коммутации и снизить пульсации силы тяги. Однако рост числа фаз приводит к увеличению общей мощности инвертора, усложнению конструкции якорной цепи и повышению ее стоимости. Поэтому в устройствах, где условия коммутации позволяют и требования к качеству силы тяги (в смысле уровня пульсации) не столь высоки, использовать в качестве коммутатора непосредственно управляемые выпрямители в сочетании с тиристорными ключами (рис.9). Это возможно, если соответствующим образом согласовать с расположением индуктора относительно группы катушек обмотки якоря, питаемых от этого выпрямителя, моменты подачи и снятия сигналов на управляющие электроды тиристоров, составляющих элементную базу силовой схемы выпрямителя.

Математическая модель электромеханического преобразования энергии для ЛДПТТК на базе управляемого выпрямителя с нормальнопроводящей или криорезистивной обмоткой возбуждения выглядит следующим образом (рис. 10)

$$(N+1) \left( L_x \frac{di_x}{dt} + R_x i_x \right) = U_x - M_1 \left( \frac{di_1}{dt} - N \frac{di_2}{dt} \right) - M_1 \frac{di_x}{dt} - \frac{dM_1}{dx} v \cdot i_1 \quad (19)$$

$$L_x \frac{di_1}{dt} + R_x i_1 = -M_1 \frac{di_x}{dt} - M_2 \frac{di_x}{dt} - \frac{dM_1}{dx} \cdot v \cdot i_1 \quad (20)$$

$$L_x \frac{di_2}{dt} + R_x i_2 = -M_2 \frac{di_x}{dt} \quad (21)$$

$$L_x \frac{di_x}{dt} + R_x i_x = U_x - M_1 \left( \frac{di_x}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right) - \frac{dM_1}{dx} \cdot v \cdot (i_x - i_1) \quad (22)$$

$$m \frac{dv}{dt} = i_x \cdot i_1 \cdot \frac{dM_1}{dx} - i_1 \cdot i_x \cdot \frac{dM_1}{dx} - F_{mp} \quad (23)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (24)$$

$N$  - число последовательно включенных катушек в фазу обмотки якоря и соответствующее ему число демпфирующих контуров. В случае сверхпроводящей обмотки возбуждения уравнение (22) принимает следующий вид

$$L_x \frac{di_x}{dt} = -M_1 \left( \frac{di_x}{dt} - \frac{di_1}{dt} \right) - \frac{dM_1}{dx} \cdot v \cdot (i_x - i_1) \quad (25)$$

На первой в стране установке ЛЭМПЭ-1 и самом мощном на сегодняшний день макете электродинамического разгонного устройства ЛЭМПЭ-2 (длина 14.3 м, масса индуктора 75 кГ, скорость 25 м/с) экспериментально подтверждена идея возможности работы ЛДПТК на базе управляемого выпрямителя. Доказана адекватность описания созданной математической моделью как процесса ускорения индуктора, так и его движения с постоянной скоростью, а также отражения происходящих в таких двигателях электрофизических процессов, связанных с генерированием силы тяги, ролью демпфирования в процессе коммутации и наличием переменной составляющей в обмотке возбуждения. Использование в экспериментальных устройствах криорезистивных обмоток возбуждения, охлаждаемых жидким азотом, дало возможность наблюдать работу обмоток якоря и их электронной инфраструктуры в условиях, близких к условиям работы этих узлов в составе ЛЭМПЭ со сверхпроводящим индуктором.

Однократность прохождения индуктора вдоль обмотки якоря в рабочем цикле таких устройств дает возможность, изменяя зазор и МДС обмотки якоря по длине устройства, а также выполняя статор

из нескольких состыкованных последовательно друг за другом типов исследуемых двигателей, создавать ЛЭМПЭ с такими возможностями, о реализации которых при использовании схемы "ротативная электрическая машина - кинематический механизм преобразования вращательного движения в поступательное" не могло быть и речи.

Разработаны алгоритмы выбора оптимальных значений геометрических размеров ЛДПТК всех рассмотренных типов. Для двигателей с коммутаторами триггерного и мостового типов алгоритм предусматривает решение задачи оптимизаций в два этапа. Вначале, приняв в качестве целевой функции отношение мощности питания якоря к значению средней силы тяги, решается задача определения оптимальных значений вектора варьируемых переменных для двухфазного варианта двигателя. На втором этапе находится минимально необходимое число фаз обмотки якоря, при котором обеспечивается требуемое качество (в смысле уровня пульсаций) силы тяги и реализуемость процесса коммутации. Для двигателя с коммутатором на базе управляемого выпрямителя иерархическая последовательность критериев формируется, исходя из необходимости определения такого сочетания геометрических размеров и электромагнитных нагрузок якоря и индуктора, которое при заданном значении потребляемой от источника питания мощности на создание требуемой силы тяги обеспечит минимальный уровень пульсаций тока в сверхпроводящей обмотке.

*Четвертая глава* посвящена исследованию УЛ. Излагаются результаты исследования эффективности и качества преобразования энергии в процессе генерирования сил подвеса в перспективном УЛ. Приводится концепция экспериментальных исследований УЛ на прямолинейных стендах ограниченной длины.

На основании анализа фундаментальных конструкций УЛ в качестве объекта исследований принят такой вариант устройства, в котором вертикальные сверхпроводящие магниты индуктора охвачены сверху и снизу отогнутыми в горизонтальной плоскости верхними и нижними частями якорных катушек, каждая из которых выполнена в виде двух встречно соединенных петель, расположенных одна над другой (рис. 11). Этот вариант содержит в себе максимальное количество признаков перспективного УЛ и по своей геометрической конфигурации является более общей структурой, в которую устройства, считающиеся другими исследователями на сегодняшний день перспективными, входят как частный случай.

Математическая модель для расчета характеристик предложенного УЛ будет объективно и полно отражать происходящий в нем процесс электромеханического преобразования энергии, если в качестве показателей эффективности и качества оперировать набором критериев, который бы отражал как способность устройства качественно выполнять свою основную функцию, так и ту цену, которую приходится платить за проявление этой способности. В качестве критериев, характеризующих основную функцию УЛ, приняты средняя величина силы подвеса  $F_L$  и торможения  $F_D$  при номинальной скорости движения индуктора, коэффициент пульсаций  $\gamma_L$  и жесткость  $C$ . А роль цены играют: объемный расход материала проводника для якорных катушек  $\Pi$  и на этапе исследования рабочих свойств - левитационное качество  $\gamma$ .

$$F_L = \frac{1}{H} \int_{-H/2}^{H/2} f_L dx, \quad f_L = I_s \sum_{r=-\infty}^{+\infty} i_r \frac{\partial M_{sr}}{\partial y} \quad (26)$$

$$F_D = \frac{1}{H} \int_{-H/2}^{H/2} f_D dx, \quad f_D = I_s \sum_{r=-\infty}^{+\infty} i_r \frac{\partial M_{sr}}{\partial x} \quad (27)$$

$$\gamma_L = (f_{L_{\max}} - f_{L_{\min}}) / F_L, \quad c = \nabla F \quad (28) \quad \gamma = F_L / F_D \quad (29)$$

Отличительной особенностью модели является то, что ток якорной обмотки  $i_k$  находился нами в виде решения системы линейных алгебраических уравнений, представляющей результат интегрирования исходной системы дифференциальных уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа для магнитосвязанных контуров. УЛ. В матричной форме решаемая система выглядит так

$$[A] \cdot [i] = [B] \quad (30)$$

Правило нахождения элементов матриц  $[A]$  и  $[B]$  таковы:

$$A[I, J] = \begin{cases} M_{io} + p, & \text{если } Q \neq 0 \text{ и } Q/k - \text{целое } (i = -Q/k) \\ p, & \text{если } Q \neq 0 \text{ и } Q/k - \text{дробное} \\ L + p/2, & \text{если } Q = 0 \\ 0, & \text{если } Q > 0 \text{ и } Q/k - \text{дробное} \\ M_{io}, & \text{если } Q > 0 \text{ и } Q/k - \text{целое } (i = Q/k) \end{cases} \quad (31)$$

$$[B] = -I_s \cdot M_{io} \left\{ I - \left[ I - (kN_r + 1) \cdot \frac{H}{k \cdot V} \right] \right\} \quad (32)$$

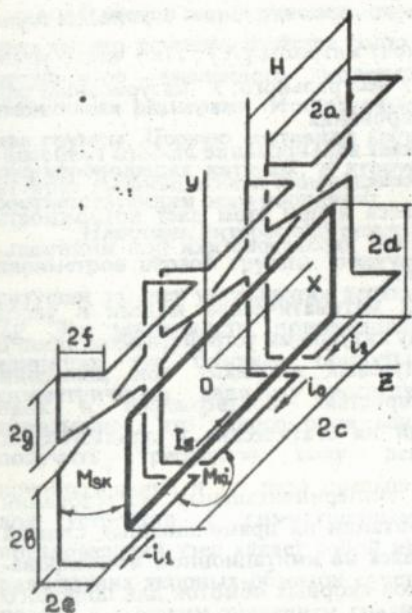


Рис. II

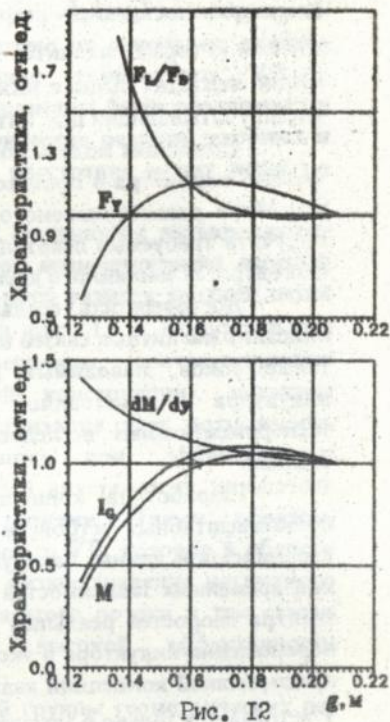


Рис. I2

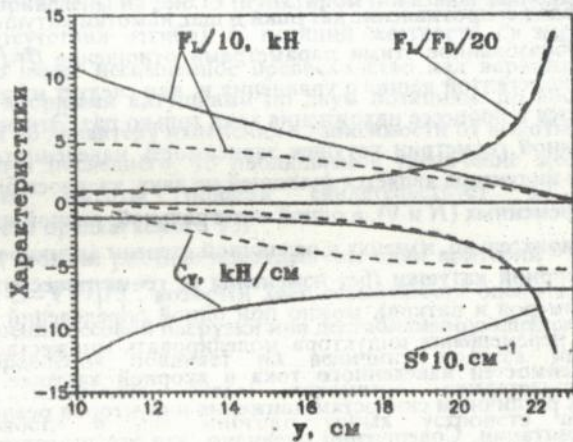


Рис. I3

Здесь принято:  $Q=J-I$  - разность номеров столбца и строки, на пересечении которых находится элемент матрицы  $[A]$ ;  $N_k$  - число уравнений, лежащих выше и ниже от центрального;  $K$  - натуральный ряд чисел, учитывающий шаг интегрирования.

Созданная модель допускает варьирование любого геометрического параметра в процессе исследования левитационных свойств устройств рассматриваемого класса и при этом дает возможность получить требуемые левитационные характеристики при минимальных затратах машинного времени.

Достоверность созданной математической модели в части описания магнитных связей между катушками устройств левитации, а также токов, наводимых в путевых катушках при движении индуктора с постоянной скоростью, подтверждена в ходе экспериментальных исследований на статических и динамических стендах.

Разработана концепция экспериментальных исследований полномасштабных устройств левитации на прямолинейных стендах ограниченной длины, базирующаяся на имитационном моделировании временных зависимостей токов якорных обмоток для широкого спектра скоростей реальных устройств при ограниченной скорости перемещения индуктора в экспериментальном стенде. Теоретической предпосылкой концепции является тот факт, что скорость индуктора  $V$  встречается только в тех элементах  $[A]$  матрицы системы (30), куда также входит сопротивление катушки и шаг намотки катушек якоря.

Образованное этими параметрами отношение  $p=R \cdot (H/k \cdot v)$  является константой данного уравнения и, как следует из алгоритма, вычисляется в процессе нахождения тока только раз. Это значит, что при заданной геометрии катушек зависимость наведенного тока от смещения индуктора является функцией не двух, казалось бы, независимых переменных ( $R$  и  $V$ ), а одной интегральной, равной их отношению. Следовательно, изменяя в различной степени активное сопротивление якорной катушки (без изменения ее геометрических параметров - размеров и витков), можно при одной определенной реальной скорости перемещения индуктора моделировать множество временных зависимостей наведенного тока в якорной катушке, соответствующих различным скоростям движения индукторов реальных устройств левитации. Совершенно очевидно, что это утверждение справедливо также для мгновенных и средних значений электродинамических сил, действующих в устройствах левитации.

Влияние геометрических параметров перспективного устройства на его рабочие свойства было оценено на основании анализа результатов численного моделирования конкретного УЛ с типичными размерами. Исследуемые параметры были разделены на две группы. Первую составили геометрические размеры якорных и сверхпроводящих катушек, а вторую - расстояние между ними по соответствующим осям координат.

Наиболее интересный результат, связанный с варьированием параметров первой группы, получен при асимметризации якорной катушки за счет уменьшения вертикального размера верхней петли  $2g$ . Эти зависимости, приведенные на рис. 12 в относительных единицах (за базовые приняты величины, соответствующие симметричному варианту исследуемой конструкции), наглядно показывают, что такого рода асимметризация дает возможность получить требуемую силу левитации при эффективности преобразования в 1,5 раза превышающей аналогичный показатель для устройств с симметричными петлями. Таким образом, предложенный узел являет собой именно то УЛ, которое в области размещения якорных обмоток сочетает низкое значение магнитного потока с высоким значением градиента этого потока и тем самым обеспечивает заданную силу при высокой эффективности преобразования энергии.

Результаты исследования второй группы геометрических параметров приведены на рис. 13 (пунктиром показаны зависимости для УЛ при отсутствии отгиба). С позиций жесткости  $S_y$  исследуемое устройство имеет несомненное превосходство над вариантом УЛ с плоскими якорными катушками по двум позициям: по абсолютной величине и по характеру изменения в зависимости от высоты подвеса. Что касается последнего, то наблюдаемое увеличение жесткости с увеличением высоты подвеса свидетельствует о большей устойчивости предлагаемого УЛ.

На этом же рисунке приведен еще один критерий - параметр жесткости  $S = \sqrt{F/|F|}$ , который дает возможность оценить, в какой мере изменение весовой нагрузки или дестабилизирующей силы бокового направления повлияет на величину подвеса индуктора. Характер изменения этого параметра свидетельствует о справедливости и для многоконтурных устройств левитации фундаментального соотношения между жесткостью подвешивания и

КПД, выражающегося прямопропорциональной зависимостью между левитационным качеством и параметром жесткости

$$\gamma = \nu \cdot \frac{L_{\varepsilon}}{R_{\varepsilon}} \cdot S \quad (33)$$

Для решения задачи оптимизации УЛ в качестве целевой функции предложен параметр податливости  $e(x)$  (величина, обратная параметру жесткости  $S$ ). Замена параметра жесткости на параметр податливости обусловлена тем, что разработанный нами алгоритм решения задачи оптимизации предусматривает минимизацию положительно определенных критериев. Параметр податливости, имея однозначную зависимость от левитационного качества, определяет тем самым влияние геометрических параметров на текущие затраты и в дополнение к этому может связать геометрические параметры еще и с капитальными затратами через трудоемкость по изготовлению статора.

Задача поиска оптимального решения сведена к процедуре сравнения минимальных значений целевых функций, полученных для варьируемых параметров, определяющих уровень пульсаций, не во всем диапазоне границ допустимой области, а лишь в тех его интервалах, где коэффициент пульсаций не превосходит заданных ограничений. Задача решается в три этапа. На первом этапе во всем предполагаемом диапазоне поиска определяются интервалы варьирования длин сверхпроводящей и якорной обмоток, в которых коэффициент пульсаций не превосходит заданных ограничений. На втором этапе для каждого из этих интервалов формируется иерархическая последовательность критериев в виде

$$U_1(x) = \sum_{i=1}^{10} (\max\{0; a_i - x_i\} + \max\{0; x_i - b_i\}) \quad (34)$$

$$U_2(x) = |F_L(x) - F_{L0}| \quad (35)$$

$$U_3(x) = \max\{0; -c_y(x) + c_{y0}\} \quad (36)$$

$$U_4(x) = \max\{0; \gamma_L(x) - \gamma_{L0}\} \quad (37)$$

$$U_5(x) = e(x) \quad (38)$$

$$\text{где } \mathbf{x}(H, a, b, c, d, y, g, h, f, e) \quad (39)$$

вектор варьируемых переменных для каждого из интервалов, и находится решение  $U_5(\mathbf{x}^*) = \min e(\mathbf{x})$ . На третьем этапе эти результаты

сравниваются между собой и лицом, принимающим решение, выбираются лучшие из них.

*Пятая глава* описывает комплекс теоретических, конструкторско-технологических и экспериментальных исследований, направленных на создание полномасштабных сверхпроводящих магнитов для ЛЭМПЭ.

На базе анализа условий работы сверхпроводящих магнитов в составе ЛСД, ЛДПТТК и УЛ определены требования к сверхпроводящим магнитам для транспортных систем, а также сформулированы основные принципы их конструирования и технологии изготовления. В соответствии с этими принципами, создание надежных, компактных и легких сверхпроводящих магнитов может быть осуществлено при условии многофункциональности элементов конструкции вспомогательных систем (бандажа, устройства охлаждения и защиты) и максимальной связи этих элементов с основным элементом - обмоткой, а также при наличии технологии, обеспечивающей пооперационный контроль и минимальную степень технологического риска.

В результате обобщения, с позиций современных представлений о приоритете механической природы деградации, опыта создания сверхпроводящих магнитов для транспорта и других электротехнических устройств принято, что основным фактором, который ограничивает уровень механических возмущений, действующих на провод и приводящих к импульсным тепловыделениям, а в конечном итоге - к переходу обмотки в нормальное состояние, является качество бандажирования обмотки, в значительной мере определяемое конструкцией опорных элементов.

Теоретическая оценка этого качества производилась нами по результатам расчетов механических напряжений и степени деформации обмотки от действия пондеромоторных сил. Представив основные соотношения плоского напряженного состояния магнитов исследуемого класса в виде

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\}, \quad \{\varepsilon\} = [D]\{q\} \quad (40)$$

где  $[E]$  - матрица упругости,  $[D]$  - матрица дифференцирования,  $\{\sigma\}$  - вектор напряжений,  $\{\varepsilon\}$  - вектор деформаций,  $\{q\} = \{u, v\}^T$  - вектор перемещений, и используя метод конечных элементов, расчет напряжений и перемещений обмотки и бандажа сводим к решению системы линейных уравнений вида

$$[K]\{q\} = \{F\} \quad (41)$$

где  $[K]$  - глобальная матрица жесткости,  $\{F\}$  - вектор обобщенных сил, действующих на узлы.

Глобальная матрица  $[K]$  формировалась в соответствии с матрицей индексов суммированием матриц жесткости четырехугольных элементов. Поля перемещений  $U$  и  $V$  по элементу задавались двухточечной интерполяционной функцией Лагранжа.

Нахождению составляющих вектора обобщенных сил предшествовало определение магнитного поля в зоне расположения сверхпроводящей обмотки методом, связанным с использованием интегральных уравнений. При этом реальная физическая обмотка заменялась модельным аналогом, представляющим собой совокупность базисных токонесящих элементов, которые обеспечивают аналитическое интегрирование в законе Био-Савара. Для рассматриваемых нами конфигураций сверхпроводящих магнитов при переходе от реальной физической обмотки к ее модельному аналогу использованы два упрощающих фактора: - реальное (квазиоднородное) распределение тока в сечении обмотки заменяется дискретным; - реальная форма витков заменяется приближенной конфигурацией, которая аппроксимируется набором последовательно соединенных базисных токонесящих элементов стержневой формы.

Процедура построения модельного аналога состоит в следующем: - Поперечное сечение реальной обмотки разбивается на области с квазиоднородной плотностью тока - участки. - Группа витков реальной физической обмотки, проходящая через сечение данного участка заменяется одним элементарным витком (фрагментом) бесконечно малого сечения. - Каждый фрагмент заменяется набором последовательно соединенных базисных токонесящих элементов стержневой формы, приближающих его реальную форму. Форма фрагмента модели выбирается такой, чтобы его магнитный момент совпадал с магнитным моментом соответствующей группы реальных витков.

Свойство аддитивности компонент магнитного поля позволило в отсутствие ферромагнитных элементов вычислять магнитное поле модельного аналога суммированием магнитных полей, создаваемых отдельными элементами

$$H_{(r)}^q = \sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L I_{n,l} \cdot \alpha_{n,l}^q(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n, \bar{r}) \quad (42)$$

$$q(x, y, z), \quad k = 1, 2, \dots, k$$

где  $\alpha_{n,l}^q(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n, \bar{r})$  - коэффициент связи между током в  $l$ -том элементе  $n$ -ого фрагмента и  $q$ -той компонентой напряженности поля, создаваемого этим элементом в точке  $\bar{r}$ ;  $(\bar{r}) = (x_1, y_1, z_1)$  - радиус-вектор точки, в которой вычисляется магнитное поле  $H^q(\bar{r})$ ;  $H^q(\bar{r})$  - значение одной из компонент напряженности магнитного поля системы в точке.

После того, как компоненты результирующего поля в зоне размещения фрагментов моделируемой обмотки вычислены, можно, зная направляющие косинусы токов, найти пондеромоторные силы как векторные произведения тока и поля в соответствии со следующим алгоритмом

$$\bar{F} = (I_y B_z - I_z B_y) \bar{i} + (I_z B_x - I_x B_z) \bar{j} + (I_x B_y - I_y B_x) \bar{k} \quad (43)$$

где  $B_x, B_y, B_z$  - проекции вектора индукции магнитного поля на оси координат,  $I_x, I_y, I_z$  - проекции вектора тока на выделенном элементе,  $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$  - единичные векторы (орты) основной системы координат магнита.

Для определения составляющих вектора перемещений  $\{q\}$ , используя  $L^T DL$  - разложение матрицы  $[K]$ , систему (41) записываем в виде двух уравнений

$$[L]^T \{v\} = \{F\} \quad (44) \quad \{v\} = [D][L]\{u\} \quad (45)$$

где решения  $v$  получаются преобразованием вектора нагрузок, а перемещения  $u$  вычисляются обратной подстановкой. Затем на основании соотношений (40) по найденным узловым перемещениям могут быть определены напряжения в обмотке и бандаже  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ . Эквивалентные напряжения определялись по критерию прочности Треска-Сен-Венана.

Используя описанные выше алгоритмы, нами путем численного моделирования были исследованы распределения напряжений и деформаций сверхпроводящей катушки с размерами по среднему витку  $1,7 \times 0,5$  м, сечением окна  $45 \times 71$  мм, имеющей плотность тока  $219$  А/мм при двух вариантах исполнения конструкции бандажа. В одном

варианте (РАМА) опорный элемент представлял собой массивный пояс, охватывающий обмотку по ее наружной боковой поверхности, в другом он выполнен в виде пластины, к которой тем или иным способом крепится своими торцевыми поверхностями обмотка (ЛИСТ). Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вариант конструкции		РАМА	ЛИСТ
Габаритные размеры,	мм	2180×1110	1854×654
Толщина,	мм	45	2
Масса,	кг	395	18,8
Наибольшее перемещение,	мм	1,2	0,45
Наиб. экв. напряжение,	МПа	170	170

Анализ этих результатов дает основание утверждать, что эффективность такого вида бандажирования, когда опорным элементом служит плоская пластина, к которой тем или иным способом крепится обмотка, так что обуславливающие напряжения и перемещения силы действуют в направлении ее наибольшей жесткости, не вызывает сомнений.

В табл. 2 приведены параметры созданных в процессе проведенных автором исследований транспортных сверхпроводящих магнитов.

Таблица 2

Тип магнита	ХПИ-001	ХПИ-101	В-112	ЛЭМПЭ-2
Размер, м	1×0,3	1×0,3	1,2×0,4	0,77×0,3
Число витков	941	843	610	180
Сверхпровод.	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb-Ti	Nb3Sn
Провод	СКНТ-1,2-54-0,5	СКНТ-1,2-54-0,5	НТ-50	МПНОС-4,5×1-14641
МДС, кА	100	261	450	144
Масса, кг	56	64	87	25
Год изгот.	1978	1982	1985	1991

Очевидно, что реализация результатов теоретических исследований, а также сформулированных принципов конструирования и сверхпроводящих устройствах в виде оригинальных конструкций бандажа, схем охлаждения и внутренней защиты позволила создать и испытать ряд полномасштабных сверхпроводящих магнитов для ЛЭМПЭ, которые по своим массогабаритным и электромагнитным параметрам находятся на уровне мировых образцов.

### Основные результаты и выводы.

1. С единых позиций энергетического подхода созданы математические модели электромеханического преобразования энергии в ЛСД, ЛДПТК и УЛ, позволяющие наглядно представлять и анализировать влияние геометрических, а также электромагнитных параметров обмоток якоря и индуктора на рабочие характеристики устройств исследуемого класса.

2. На основе решения задач оптимизации иерархической последовательности критериев разработаны алгоритмы выбора рациональных значений основных геометрических размеров в процессе проектирования ЛЭМПЭ, обеспечивающие требуемые силовые и энергетические характеристики входящих в их состав двигателей и УЛ при минимуме затрат.

3. Выполнено сравнение рабочих свойств ЛСД в двух режимах - при постоянстве тока и постоянстве напряжения на якоре. Решена задача оптимизации геометрических размеров электрических обмоток якоря и индуктора. Установлен характер реакции оптимального вектора варьируемых параметров на изменение функциональных ограничений.

4. Установлено, что ЛДПТК триггерного и мостового типа, обладая по сравнению с ЛСД значительно меньшим значением потребляемой мощности на единицу развиваемого усилия тяги, имеют также возможность более эффективного регулирования силы тяги.

5. Создана математическая модель процесса коммутации ЛДПТК мостового и триггерного типов в виде объединенной системы дифференциальных уравнений. Исследовано влияние на характер и время протекания коммутационного процесса параметров коммутирующего контура и значений фазового угла коммутации. Обоснованы их наиболее благоприятные сочетания.

6. Подтверждена идея возможности работы линейного двигателя постоянного тока с коммутатором в виде управляемого выпрямителя. Созданная математическая модель, описывающая как процесс ускорения индуктора, так и его движение с постоянной скоростью, адекватно отражает происходящие в таких двигателях электрофизические процессы, связанные с генерированием силы тяги, ролью демпфирования в процессе коммутации, а также с наличием переменной составляющей тока в обмотке возбуждения.

7. Предложена и исследована конструкция перспективного УЛ, обладающая более широкими возможностями по сравнению с имеющимися на сегодняшний день устройствами как в плане

эффективности преобразования энергии, так и в плане обеспечения жесткости и устойчивости подвеса.

8. Разработана оригинальная концепция экспериментальных исследований полномасштабных УЛ на прямолинейных стендах ограниченной длины, базирующаяся на имитационном моделировании токов якорных обмоток.

9. Выполнен комплекс теоретических, конструкторско-технологических и экспериментальных исследований, направленных на разработку сверхпроводящих магнитов для ЛЭМПЭ, итогом которого стало создание ряда подмасштабных транспортных магнитов.

*Автор искренне признателен своему учителю - доктору технических наук, профессору В.П.Толкунову, а также доктору технических наук В.И.Бочарову, положившим начало данной работе.*

*Автор глубоко благодарен доктору физико-математических наук, профессору Е.Ю.Клименко, кандидату технических наук С.И.Новикову и кандидату технических наук С.А.Сергееву за их плодотворную помощь в проработке ряда теоретических и технических вопросов, изложенных в диссертации.*

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Омеляненко В.И. Линейные двигатели постоянного тока с тиристорным коммутатором/ - X.: Основа, 1994. - 96 с.
2. Klímenko E.Yu., Novikov S.I., Omelyanenko V.I. and Sergeev S.A. Superconducting Magnet for High Speed Ground Transportation// Cryogenics.- January.1990. v.30.N 1. P.41-45.
3. Омеляненко В.И., Сапелкин С.А., Сергеев С.А. Расчет индуктивных параметров устройств электродинамической подвески// Вестник Харьковского политехнического института. Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий.- 1988. вып. 13. N 255. С. 81 - 84.
4. Омеляненко В.И., Сергеев С.А., Болух В.Ф. Импульсный режим работы криорезистивной обмотки возбуждения линейного электро-механического преобразователя энергии// Вестник Харьковского политехнического Института. Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий.- 1990. вып. 15. N 279. С. 86 - 90.

5. Omelyanenko V.I., Klimenko E.Yu., Sergeev S.A. et al. Superconducting Magnets for transport/ IEEE Trans. on Magnetics.- 1992. v. 28. N 1. P. 470 - 473.

6. Omelyanenko V.I., Klimenko E.Yu., Sergeev S.A. et al. Laboratory Installation for Testing Full-scale Magnetic Levitation Modules// The First Japan-CIS Joint Seminar on Electromagnetomechanics in Structures. Tokyo, Japan. January 22-23. - 1992. p.122-125.

7. Омеляненко В.И., Походенко Р.Н. Анализ пассивного экранирования переменной составляющей магнитного поля в активной зоне линейного электромеханического преобразователя энергии// Вестник Харьковского политехнического института. Энергоэнергетика и автоматизация энергоустановок.- 1993. вып. 18. N14. С.123-129.

8. Омеляненко В.И., Бочаров В.И., Набока Б.Г. и др. Метод расчета сил подъема и торможения электродинамического подвеса с дискретной путевой структурой// Изв. ВУЗов. Сер.: Электромеханика.- 1977. N 8. С. 865-870.

9. Omelyanenko V.I., Sergeev S.A. Optimization of the Vertical Coils Option of the Maglev Vehicle Levitation Units// In: Simulation and Design of Applied Electromagnetic Systems.-(Ed: T.Honma). 1994. Amsterdam. Elsevier. P. 539 - 542.

10. Omelyanenko V.I., Sergeev S.A., Severin V.P Multiple Criteria Optimization of the Maglev Vehicle Levitation Unit//The Proceedings of the First Japan-CIS Joint Seminar on Electromagnetomechanics in Structures. January 22-23.- 1993. Tokyo, Japan. P.140-143.

11. Омеляненко В.И., Бочаров В.И. и др. Сверхпроводящие соленоиды для подвеса высокоскоростных наземных транспортных средств// Известия ВУЗов.Сер.:Электромеханика.- 1977.N 8.С.875-878.

12. Омеляненко В.И., Сергеев С.А. и др. Конструктивные особенности обмоток возбуждения линейных синхронных двигателей// В кн.: Моделирование, автоматизация и механизация процессов производства строительных материалов. М.- 1984. С. 157-160.

13. Омеляненко В.И., Клименко Е.Ю. и др. Полномасштабный криомодуль для электродинамического подвеса высокоскоростного наземного транспорта // Известия ВУЗов. Сер.: Электромеханика.- 1985. N 9. с.79-83.

14. Omelyanenko V.I., Klimenko E.Yu. et al. Niobium-tin superconducting inductor for levitated vehicles // Cryogenics.- 1992. vol.32. ICEC Supplement. p.328-331.

15. Омеляненко В.И., Боллох В.Ф. и др. К вопросу намотки полномасштабных транспортных сверхпроводящих магнитов // Известия ВУЗов. Сер.: Электромеханика.- 1985. N 8. с.89-93.
16. А.с. СССР N 1531374. М.кл. В61В 13/08. Устройство магнитной электродинамической подвески и направления транспортного средства/ Омеляненко В.И., Боллох В.Ф. - заявл. 20.03.85; опубл. 23.12.89 // Бюлл. N 47, 1989.
17. А.с. СССР N 1056541. М.кл. В 60 L 13/08. Устройство магнитной электродинамической подвески и направления экипажа транспортного средства/ Омеляненко В.И., Бочаров В.И., Новогренко Н.М., Сергеев С.А. - заявл. 24.05.82; опубл. 23.11.83 // Бюлл. N 43, 1983.
18. А.с. СССР N 1146933 М.кл. В 61 В 13/08. Устройство электродинамической подвески и направления экипажа транспортного средства/ Омеляненко В.И., Сергеев С.А., Боллох В.Ф. - заявл. 13.07.83; опубл. 23.03.85 // Бюлл. N 11, 1985.
19. А.с. СССР N 1121872. М.кл. В 61 В 13/08. Устройство магнитной электродинамической подвески и направления экипажа транспортного средства/ Омеляненко В.И., Сергеев С.А., Боллох В.Ф. - заявл. 26.05.83; опубл. 30.10.84 // Бюлл. N 40, 1984.
20. А.с. СССР N 1685764. М.кл. В 60 L 13/04. Способ испытания электродинамического подвеса/ Омеляненко В.И., Сергеев С.А., Боллох В.Ф. - заявл. 24.05.88; опубл. 23.11.91 // Бюлл. N 39, 1991.
21. А.с. СССР N 1354561. М. кл. В 60 L 13/04. Электродинамическая подвеска транспортного средства/ Омеляненко В.И., Сергеев С.А. - заявл. 26.12.86; опубл. 23.11.87 // Бюлл. N 43; 1987.
22. А.с. СССР N 1389171 М.Кл. В60L 13/10. Устройство электродинамической подвески и направления экипажа транспортного средства/ Омеляненко В.И., Сергеев С.А., Боллох В.Ф. - заявл. 15.05.85; опубл. 15.04.88 // Бюлл. N 14, 1988.
23. А.с. СССР N 1284129. М. кл. В 61 В 13/08. Электродинамическая подвеска экипажа транспортного средства/ Омеляненко В.И., Боллох В.Ф., Сергеев С.А. - заявл. 26.04.85; опубл. 15.01.87 // Бюлл. N 2, 1987.
24. А.с. СССР N 1308079. М.Кл. Н01F 7/22, В61В 13/08. Транспортный криомодуль / Омеляненко В.И., Черкасов А.К. и др. - заявл. 25.06.85; опубл. 30.04.87 // Бюлл. N 30.04.87.
25. А.с. СССР N 1121871. М.Кл. В61В 13/08, Н01F 7/22. Сверхпроводящая катушка для транспортного средства на магнитной подушке / Омеляненко В.И., Боллох В.Ф., Сергеев С.А. - заявл. 26.05.83; опубл. 30.10.84 // Бюлл. N 40, 1984.

26. А.с. СССР N 1249828. М.Кл. В61в 13/08, H01F 7/22. Сверхпроводящая катушка для транспортного средства на магнитной подушке / Омеляненко В.И., Болдох В.Ф. - заявл. 25.05.84; опубл. 07.05.84 // Бюлл. N 29, 1986.

27. А.с. СССР N 1297368. М.Кл. В61в 13/08, H01F 7/22. Сверхпроводящая катушка для транспортного средства на магнитной подушке / Омеляненко В.И., Болдох В.Ф. - заявл. 17.10.85; опубл. 15.03.87 // Бюлл. N 10, 1987.

28. А.с. СССР N 1233739. М.Кл. H01L 39/04. Криомодуль для транспортного средства на магнитной подвеске / Омеляненко В.И., Сергеев С.А. и др. - заявл. 29.04.84; опубл. 23.05.86 // Бюлл. 19, 1986.

29. А.с. СССР N 1233740. М.Кл. H01L 39/04. Криомодуль для транспортного средства на магнитной подвеске / Омеляненко В.И., Сергеев С.А. и др. - заявл. 29.04.84; опубл. 23.05.86 // Бюлл. N 19, 1986.

30. А.с. СССР N 1277813. М.Кл. H01F 5/08. Сверхпроводящая катушка для транспортного средства на магнитной подушке / Омеляненко В.И., Клименко Е.Ю., Новиков С.И. и др. - заявл. 28.01.85; опубл. 15.12.86 // Бюлл. N 46, 1986.

31. А.с. СССР N 1360467. М.кл. H01F 7/22. Способ изготовления сверхпроводящего магнита / Омеляненко В.И., Клименко Е.Ю., Новиков С.И. и др. - заявл. 5.05.85; опубл. 15.12.87 // Бюлл. N 46, 1987.

32. А.с. СССР N 1243542. М.Кл. H01F 7/22. Сверхпроводящее устройство / Омеляненко В.И., Холодова Ю.И. и др. - заявл. 28.01.85; опубл. 07.07.86 // Бюлл. N 25, 1986.

33. А.с. СССР N 1358286. М.Кл. В60L 13/04. Криомодуль для транспортного средства на магнитной подвеске / Омеляненко В.И., Сергеев С.А. и др. - заявл. 10.12.85; опубл. 15.09.86 // Бюлл. N 34, 1986.

34. А.с. СССР N 1124665. М.Кл. F17C 13/08. Опорное устройство / Омеляненко В.И., Болдох В.Ф. - заявл. 16.11.83; опубл. 15.11.84 // Бюлл. N 42, 1984.

35. А.с. СССР N 1285844. М.Кл. F17C 13/08. Опорное устройство / Омеляненко В.И., Жук С.И. и др. - заявл. 17.06.85; опубл. 23.01.87 // Бюлл. N 3, 1987.

36. Омеляненко В.И., Клименко Е.Ю. и др. Разработка и испытания овальных сверхпроводящих магнитов с косвенным охлаждением для экипажа ВСНТ // Препринт ИАЭ - 4101/10. - 1985. М., 10 с.

37. Omelyanenko V., Klimenko E., Mokhnatuk V. et al. Adhesive Bounded SC Windings // 1994 Applied Superconductivity Conference. October 16-21, - 1994. Boston, Massachusetts. - p. 100.

*Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве*

В работах [3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 37] соискателю принадлежит постановка задачи на исследование, разработка математических моделей и алгоритмов для проведения численного моделирования, а также обобщение результатов математического моделирования и выводы.

В работах [2, 5, 11, 13, 14, 36] соискателю принадлежит формулировка задачи исследований, разработка методологических основ проведения экспериментов, обоснование результатов и формулировка выводов.

В остальных совместно написанных работах соискателю принадлежит техническая идеология в получении оригинальных схем и конструктивных решений отдельных узлов устройств исследуемого класса, а также разработка технологических процессов и оборудования для их создания.

## АНОТАЦІЯ

Омельяненко В.І. Теоретичні основи проектування лінійних електромеханічних перетворювачів енергії з надпровідними обмотками збудження.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.09.01. - електричні машини, Інститут електродинаміки НАН України, Київ, 1994.

Захищається 37 робіт та авторських свідоцтв, які містять математичні моделі електромеханічного перетворювання енергії в лінійних синхронних двигунах, лінійних двигунах постійного струму з тиристорним коммутатором, пристроях левітації, а також алгоритми вибору основних геометричних параметрів цих пристроїв, які забезпечують їх функціонування з мінімумом витрат. Викладаються також теоретичні та конструкторсько-технологічні запитання створення транспортних надпровідних магнітних систем.

## ANNOTATION

Omelyanenko V.I. Theoretical basis for designing linear electromechanical transformers with superconducting force coils.

Doctoral dissertation on speciality 05.09.01 - Electrical Machines, Institute for Electrodynamics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1994.

37 papers and patents containing mathematical models for electromechanical transforming in a linear synchronous motor, a dc linear motor with a thyristor commutator, and a levitation unit, as well as algorithms for choosing main geometric parameters of such systems which provide their functioning with minimal costs, are defended. Besides, theoretical and technological problems in developing superconducting magnetic systems for high-speed ground transportation are considered.

Ключові слова: математичні моделі, лінійні синхронні двигуни, лінійні двигуни постійного струму, тиристорні коммутатори, пристрої левітації, надпровідні магніти.

Соискатель

*V. Omelyanenko*

150208

Ав 31.670

Подписано и печати 7 декабря 1994 г. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная. Усл.печ. лист 2,0. Тираж 100, Заказ 631  
Р-ч НПО "Электротяжмаш"